

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

พลังงานแสงอาทิตย์

1. ดวงอาทิตย์

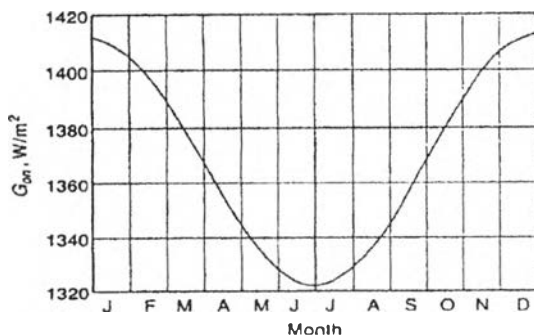
ซากดึกดำบรรพ์ เป็นหลักฐานที่แสดงว่าดวงอาทิตย์ได้แผ่รังสีมายังโลกในอัตราสม่ำเสมอเป็นเวลาประมาณหนึ่งพันล้านปีมาแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ในอัตรา 3.85×10^{23} kW อย่างต่อเนื่องนั้น เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบหลอมนิวเคลียส (Fusion) ของไฮโดรเจน ทำให้มวลของดวงอาทิตย์ลดลงในอัตราโดยประมาณ $4 \times 10^{19} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ พื้นผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5,777 K ในขณะที่อุณหภูมิแกนกลางมีค่าอยู่ระหว่าง $8-40 \times 10^6$ K และมีความหนาแน่นประมาณ 100 เท่าของน้ำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.39×10^9 m อยู่ห่างจากโลกประมาณ 1.5×10^{11} m เมื่อสังเกตจากโลกจะใช้เวลาหมุนรอบตัวเองประมาณ 4 สัปดาห์ รังสีที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์จัดออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีผลกระทบต่อโลกทันที ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงผิวโลกในทันที ประกอบไปด้วยพลังงานความร้อนและแสงสว่างเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นเป็นคลื่นวิทยุที่สามารถรับได้โดยใช้กล้องโทรทรรศน์วิทยุ (Radio Telescope) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet Rays) ซึ่งผ่านชั้นบรรยากาศมายังผิวโลกได้เพียงเล็กน้อย รังสีกลุ่มที่สองได้แก่ อนุภาคที่มีประจุต่างๆ ซึ่งไม่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศมายังผิวโลกได้ เช่น อนุภาครังสีคอสมิก (Cosmic Rays) เป็นอนุภาคโปรตอน และลมสุริยะ (Solar Wind) เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกที่มีความเร็วต่ำ และอิเล็กตรอน เป็นต้น อนุภาควัดดังกล่าวจะเดินทางมายังโลกภายหลังที่เกิดการลุกจ้าบนดวงอาทิตย์แล้วประมาณ 20-40 ชั่วโมง

3. ค่าคงตัวสุริยะ

เนื่องจากโลกโคจรเป็นวงรีรอบดวงอาทิตย์ เป็นสาเหตุให้ระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (ประมาณร้อยละ ± 1.7) ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลก (Extraterrestrial Radiation, G_{on}) จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเปลี่ยนแปลงร้อยละ ± 3 ต่อมาได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลก ค่ามาตรฐานนี้เรียกว่า ค่าคงตัวสุริยะ (Solar Constant, G_{sc}) มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้พยายามวัดค่าคงตัวสุริยะ ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน จนกระทั่ง World Radiation Center (WRC) ได้กำหนดมาตรฐานของค่าคงตัวสุริยะให้มีค่าเท่ากับ $1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงร้อยละ ± 1.0

Thekaekara (1976) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลกกับระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปี โดยกำหนดให้ n ($1 \leq n \leq 365$) เป็นลำดับที่ของวันในรอบปี โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์

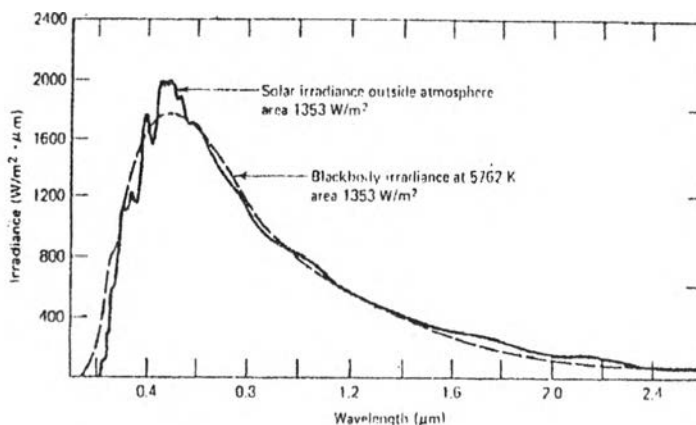
$$G_{on} = G_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right]$$



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลกในเดือนต่างๆ ในรอบปี ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

3. สเปกตรัมของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมาจากดวงอาทิตย์ จะมีช่วงความยาวคลื่นและความเข้มของการแผ่รังสีต่างกัน มีสาเหตุ 2 ประการ ประการแรกอุณหภูมิของดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งต่างๆ มีความแตกต่างกัน ประการที่สอง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนดวงอาทิตย์ไม่ได้มีการแผ่รังสีแบบวัตถุดำ ดังนั้นสเปกตรัมของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ จึงคล้ายกับสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 5762 K



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลก ; ที่มา Lunde (1980)

เหนือบรรยากาศโลก พบว่าความยาวคลื่นประมาณ 0.46 μm จะมีความเข้มของการแผ่รังสีมากที่สุด และประมาณร้อยละ 50 ของพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.38-0.78 μm ซึ่งเป็นรังสีที่มองเห็นได้ (Visible Rays) พลังงานแสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นไม่เกิน 4 μm

4. เวลาสุริยะ

เวลาสุริยะ (Solar time) เป็นเวลาที่พิจารณาจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ซึ่งไม่ใช่เวลาฬิกาท้องถิ่น (Local Clock Time) หรือเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard Time) ความจำเป็นในการ

เปรียบเทียบเวลาสุริยะกับเวลามาตรฐานท้องถิ่น มาจากสาเหตุ 2 ประการ ประการแรกเวลามาตรฐานท้องถิ่นยึดถือจากเส้นลองจิจูด (Longitude) ซึ่งในความเป็นจริงเวลามาตรฐานท้องถิ่นจะแตกต่างกันประมาณ 4 นาที ต่อ 1 องศาของเส้นลองจิจูด (ประเทศไทยใช้เส้นลองจิจูดที่ 105 องศาตะวันออก กำหนดเวลามาตรฐานท้องถิ่น และกรุงเทพมหานคร ตั้งอยู่ในตำแหน่งเส้นลองจิจูดที่ 100.5 องศาตะวันออก และเส้นละติจูด (Latitude) ที่ 13.7 องศาเหนือ) ประการที่สองโลกหมุนรอบตัวเอง โดยแกนหมุนของโลก (Axial of the earth's rotation) เกิดการกวัดแกว่ง (Perturbation) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของเวลา (Equation of Time, E) โดยจะมีผลต่อเวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นลองจิจูดของเมริเดียน (meridian) การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์กำหนดเวลา คือ เวลาสุริยะ ความสัมพันธ์ของเวลาสุริยะกับเวลามาตรฐานท้องถิ่น กล่าวคือ

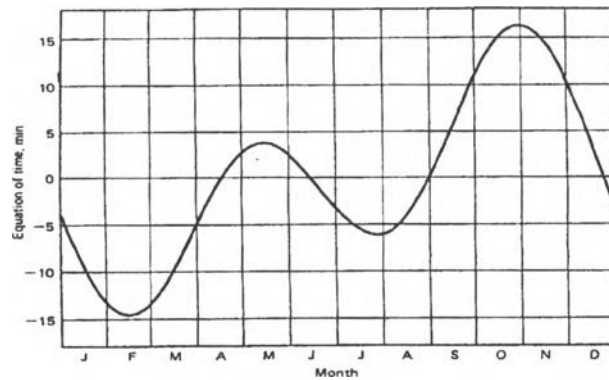
$$\text{solar time} = \text{standard time} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

L_{st} = เส้นลองจิจูดของเมริเดียนที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น

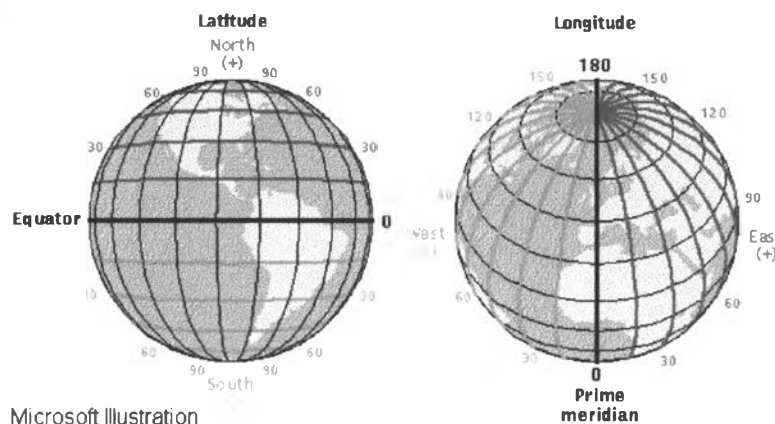
L_{loc} = เส้นลองจิจูดของเมริเดียนของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะหรือตำบลที่ตั้ง

E = สมการเวลา (นาที) ; $B = \frac{360(n-1)}{365}$ = มุม (เรเดียน)

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868) + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B$$

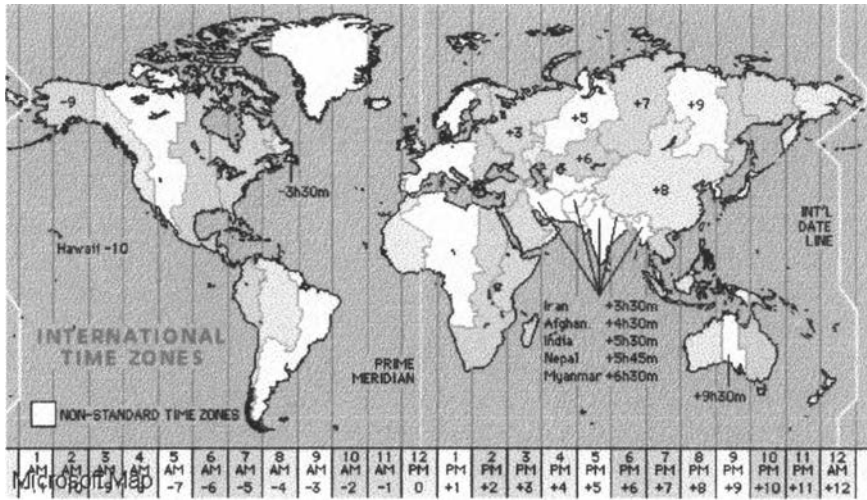


รูปที่ 2.3 สมการเวลาในหน่วยนาทีที่แปรผันกับเวลาในช่วงปี ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)



Microsoft Illustration

รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งของโลกด้วยเส้นลองจิจูดและเส้นละติจูด ; ที่มา Microsoft (1999)



รูปที่ 2.5 แสดงเวลามาตรฐานท้องถิ่น อ้างอิงจาก เส้นเมริเดียนที่ผ่านตำบลกรีนวิช (Greenwich) ในประเทศอังกฤษ เรียกว่า เส้นเมริเดียนมาตรฐาน (standard meridian) หรือ เส้นเมริเดียนกรีนวิช (meridian of Greenwich) ; ที่มา Microsoft (1999)

6. การแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ

รังสีจากดวงอาทิตย์ เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศของโลกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับออกไปยังอวกาศ อีกส่วนหนึ่งจะเกิดกลไกของ การดูดกลืน (Absorption) และการกระเจิง (Scattering) ในชั้นบรรยากาศของโลก การดูดกลืนรังสี เกิดขึ้นจากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ หรือไอน้ำ รังสีอัลตราไวโอเล็ตจะถูกดูดกลืนโดยก๊าซโอโซน (O_3) และก๊าซออกซิเจน (O_2) รวมทั้งก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยโมเลกุลของก๊าซเหล่านี้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต สำหรับรังสีที่มองเห็นได้จะถูกดูดกลืนด้วย O_3 , O_2 และ N_2 เช่นกัน ส่วนรังสีอินฟราเรดหรือรังสีได้แดง (Infrared Rays) จะถูกดูดกลืนโดย O_3 , O_2 , N_2 และไอน้ำ (H_2O) ในชั้นบรรยากาศ ตลอดจนก๊าซจำพวก คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และมีเทน (CH_4) ผลของการดูดกลืนรังสีต่างๆ ของก๊าซ O_3 , O_2 , N_2 , H_2O , CO_2 , CO, NO_2 และ CH_4 (ก๊าซเหล่านี้จะดูดรังสีต่างๆ ได้ในสัดส่วนไม่เท่ากัน) จะทำให้ชั้นบรรยากาศมีพลังงานสะสมมากขึ้น หมายความว่าเกิดความร้อนสะสมในชั้นบรรยากาศ สรุปได้ว่ารังสีที่ตกกระทบบนผิวโลกจะประกอบไปด้วยรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ และรังสีคลื่นยาวจากบรรยากาศที่ร้อน สำหรับการกระเจิงของรังสีเกิดขึ้นจากโมเลกุลของอากาศ (O_2 , N_2), ฝุ่นและไอน้ำ อยู่อย่างกระจัดกระจาย ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ และมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นของรังสี จึงเกิดการกระเจิงของรังสีขึ้น

7. การแผ่รังสีบนพื้นผิวโลก และแอร์มาต

ที่พื้นผิวโลกการแผ่รังสีมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลกมีค่าไม่เท่ากัน รวมทั้งปัจจัยจากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ฝุ่นละออง ไอน้ำ และเมฆในบรรยากาศ ทำให้ความเข้ม ทิศทาง และองค์ประกอบของสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไป จึงได้มีการกำหนดประเภทของการแผ่รังสีที่พื้นผิวโลก กล่าวคือ

- การแผ่รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) เป็นรังสีที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ และผ่านลงมายังพื้นโลกโดยตรง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง

- การแผ่รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีที่ถูกสะท้อนและกระเจิงโดย โมเลกุลของก๊าซ ฝุ่นละอองและไอน้ำ วัตถุต่างๆ การแผ่รังสีกระจายนี้จะมาจากทุกทิศทุกทางในท้องฟ้า

- การแผ่รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของการแผ่รังสีตรงและการแผ่รังสีกระจาย สำหรับการศึกษารื่องพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อพูดถึงการแผ่รังสีรวมจะจำกัดความเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น มีความคลื่นอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 3 μm ซึ่งเป็นช่วงของความยาวคลื่นของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ โดยไม่พิจารณาการแผ่รังสีคลื่นยาว ซึ่งเกิดจากการแผ่รังสีของผิวโลกและชั้นบรรยากาศ

ณ เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) ดวงอาทิตย์จะอยู่ตรงศรีษะ ตำแหน่งนี้มุมเซนิต (Zenith Angel, θ_z) มีค่าเท่ากับศูนย์ มุมเซนิต จะหมายถึงมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นราบที่ผิวโลกกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ อาจกล่าวได้ว่าความเข้มของการแผ่รังสีบนพื้นราบที่ผิวโลกจะมีค่าสูงสุด เมื่อการแผ่รังสีจะใช้ระยะทางในการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศสั้นที่สุด การดูดกลืนและการกระเจิงของรังสีในชั้นบรรยากาศจะน้อยที่สุด ตัวแปรที่บ่งบอกถึงระยะในการเดินทางของการแผ่รังสีมายังพื้นผิวโลก ได้แก่ แอร์มาส (Air Mass, m) ดังนั้นแอร์มาส จะหมายถึง อัตราส่วนความหนาแน่นของบรรยากาศที่เกิดการแผ่รังสีตรง ณ เวลาสุริยะใดๆ ต่อความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศที่เกิดการแผ่รังสีตรง ณ เวลาเที่ยงสุริยะ เมื่อพิจารณาพื้นผิวโลกที่ระดับน้ำทะเล ในขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ตรงศรีษะ $m = 1$

มุมเงย (Altitude Angle, α_s) เป็นค่ามุมเงยวัดจากเส้นขอบฟ้า(Horizon) ไปตามวงกลมแนวโค้งจนถึงตำแหน่งดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า มีค่าที่ 0° ที่เส้นขอบฟ้า และ 90° ที่จุดเซนิต ($\theta_z = 0^\circ$) และ $\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$ ความสัมพันธ์ของมุมเงย กล่าวคือ

$$\sin \alpha_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \gamma}$$

γ = มุมเซอร์เฟสแอซิมัท (Surface Azimuth Angle, องศา) คือ มุมที่วัดบนพื้นราบขนานผิวโลกของเส้นฉายของผิวระนาบเอียงใดๆ กับเส้นเมริเดียนท้องถิ่น มีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในแนวทิศใต้ ถ้าวัดจากทิศตะวันตกก็มีค่าเป็นบวก และวัดจากทิศตะวันออกมี

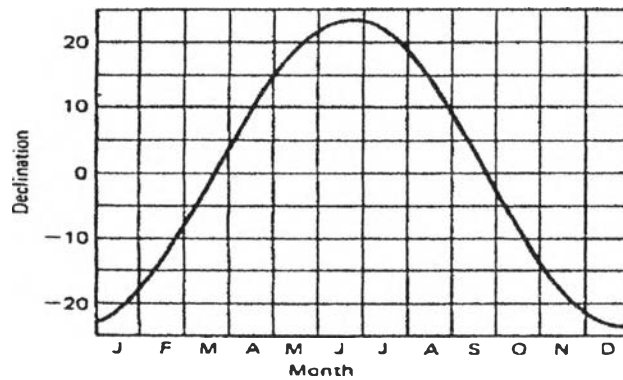
ค่าเป็นลบ มุมนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง ± 180 องศา

ω = มุมชั่วโมง (Hour Angle, องศา)

δ = มุมบ่ายเบน (Declination Angle, องศา)

เราสมมติให้ท้องฟ้าเป็นทรงกลมกลวงใบหนึ่งที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ผู้สังเกต ภาชนะทรงกลมนี้เรียกว่า ทรงกลมท้องฟ้า (Celestial Sphere) รัศมีทรงกลมท้องฟ้านี้มีค่าเท่ากับระยะทางที่แสงเดินทางมาถึงเราได้มีค่าเป็นอนันต์ เราจึงพูดได้ว่าวัตถุท้องฟ้า (Celestial Body) ทุกชนิดจะปรากฏอยู่บนพื้นผิวของทรงกลมนี้เสมอ รวมทั้งดวงอาทิตย์ด้วย เราจึงสามารถประดิษฐ์ระบบพิกัดของวัตถุท้องฟ้าต่างๆ ให้คล้ายคลึงกับระบบพิกัดของโลก (ลองจิจูดและละติจูด) เพื่อกำหนดตำแหน่งของของวัตถุท้องฟ้า ต่างๆ ในอวกาศ ระบบพิกัดเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า (Ecliptic Coordinate System) เป็นระบบที่ใช้กำหนดตำแหน่งของของวัตถุท้องฟ้าต่างๆ ในทรงกลมท้องฟ้า โดยมีการบอกพิกัดเป็นเส้นเคคิลินชัน (Declination) เทียบได้กับเส้นละติจูดบนโลก และเส้นไรต์แอสเซนชัน (Right Ascension) เทียบได้กับเส้นลองจิจูดบนโลก ถ้าเราต่อแกนหมุนของโลกไปทางขั้วเหนือเรื่อยๆ จนไปถึงพื้นผิว

ทรงกลมท้องฟ้า ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ขั้วท้องฟ้าเหนือ (North Celestial Pole, NCP) และพิจารณาที่ขั้วโลกใต้เช่นกัน จุดนี้เรียกว่า ขั้วท้องฟ้าใต้ (South Celestial Pole, SCP) ปัจจุบันขั้วท้องฟ้าเหนืออยู่ห่างจาก ดาวโพลาริส (Polaris) ซึ่งเป็นดาวอยู่ในกลุ่มดาวเหนือประมาณ 1 องศา เมื่อพิจารณาระบบพิกัดเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า พบว่า แกนหมุนของโลกจะทำมุมกับเส้นเศคลิเนชัน โดยมุมนี้มีชื่อเรียกว่า มุมบ่ายเบน (δ) ตามธรรมชาติเมื่อโลกหมุนรอบตัวเอง แกนหมุนของโลกจะเกิดการการกวัดแกว่งจากเส้นเศคลิเนชัน จึงทำให้มุมบ่ายเบน มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง ± 23.45 องศา รายละเอียดพิจารณาจากรูปที่ 2.6



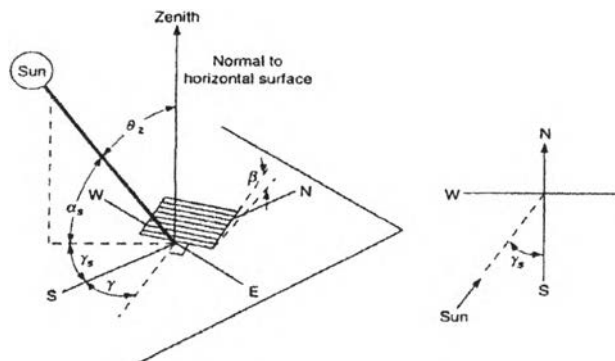
รูปที่ 2.6 แสดงอิทธิพลของฤดูกาล ที่มีผลต่อมุมบ่ายเบน ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

Cooper (1969) พบว่า δ มีความสัมพันธ์ กับวันที่ n ของปี คือ
$$\delta = 23.45 \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

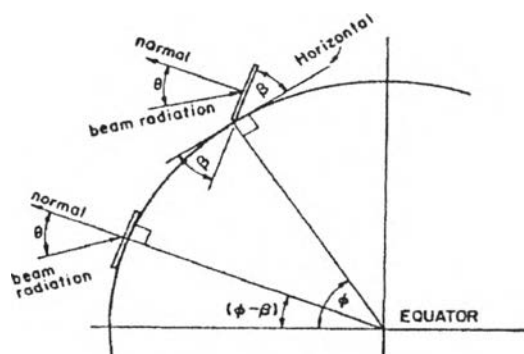
เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งที่มุมเซนทิมีค่าเป็นศูนย์ นั้นหมายถึงดวงอาทิตย์กำลังจะข้ามเส้นเมริเดียนของสถานทีนั้นๆ หรือเส้นเมริเดียนท้องถิ่น เวลาก็คือเวลาที่เที่ยงสุริยะนั้นเอง เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งอื่นจากเส้นเมริเดียนท้องถิ่น เราสามารถบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในท้องถิ่นนั้น เรียกว่า มุมชั่วโมง (ω) ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นองศา มุมชั่วโมง มีค่าเป็นบวกหลังเวลาที่เที่ยงสุริย และ มีค่าเป็นลบก่อนเวลาที่เที่ยงสุริย

ละติจูด (ϕ) หมายถึง มุมที่วัดจากจุดกึ่งกลางของเส้นศูนย์สูตรตามเส้นเมริเดียนไปยังเส้นละติจูดของพิกัดนั้นๆ ถ้าวัดไปทางขั้วโลกเหนือมีค่าเป็นบวก และวัดไปทางขั้วโลกใต้มีค่าเป็นลบ $\phi = \pm 90$ องศา

มุมเอียงของผิวระนาบ (Slope, β) หมายถึงมุมระหว่างผิวระนาบเอียงใดๆ กับระนาบขนานผิวโลก มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศา



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ กับระนาบเอียง ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม β θ ϕ และ $(\phi - \beta)$ กับเส้นศูนย์สูตร ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

มุมโซลาร์แอสิมัท (Solar Azimuth Angle, γ_s) คือ มุมที่วัดในแนวพื้นราบขนานผิวโลก โดยวัดจากเส้นฉายของแนวการแผ่รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ไปยังจุดสังเกตกับเส้นลองจิจูด ถ้าวัดจากทิศตะวันออกมาข้างไปทิศใต้จะมีค่าเป็นลบ และถ้าวัดจากทิศตะวันตกไปยังทิศใต้จะมีค่าเป็นบวก

มุมตกกระทบ (Angle of Incidence, θ) คือ มุมระหว่างแนวการแผ่รังสีตรงที่ตกกระทบบนระนาบใด ๆ กับแนวตั้งฉากของระนาบนั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างที่มุม θ , θ_z , β , γ_s , ϕ , ω และ γ ใดๆ กล่าวคือ

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

และ

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

ในกรณีที่ ผิวระนาบเอียงใดๆ มี $\beta = 90$ องศา (ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก)

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

ในกรณีที่ ผิวระนาบเอียงใดๆ มี $\beta = 0$ องศา (ขนานกับพื้นผิวโลก)

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta)$$

ในกรณีที่ผิวระนาบเอียงใดๆ β องศา ที่ตำแหน่งเหนือเส้นศูนย์สูตร

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

ในกรณีที่ผิวระนาบเอียงใดๆ β องศา ที่ตำแหน่งใต้เส้นศูนย์สูตร

$$\cos \theta = \cos(\theta + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta$$

8. การประเมินการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลก

ข้อมูลการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะว่าเป็นข้อมูลที่จะต้องนำมาประกอบในการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับดวงอาทิตย์ มีรายละเอียดดังนี้

การประเมินการแผ่รังสีรายวัน

$$H_o = \frac{(24)(3600 G_{sc})}{\pi} \left(1 + 0.033 \frac{360 n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

H_o = การแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลกรายวัน (Daily Extraterrestrial Radiation, $\frac{MJ}{m^2 \cdot day}$)

ω_s = มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ตก (Sunset Hour Angle, องศา)

การประเมินการแผ่รังสีรายชั่วโมง

$$I_o = \frac{(12)(3600 G_{sc})}{\pi} \left(1 + 0.033 \frac{360 n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right)$$

I_o = การแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลกรายชั่วโมง (Hourly Extraterrestrial Radiation, $\frac{MJ}{m^2 \cdot hour}$)

ω_1 = มุมชั่วโมงที่เวลาเริ่มต้น (องศา)

ω_2 = มุมชั่วโมงที่เวลาสุดท้าย (องศา) (เวลาที่ ω_1 และ ω_2 จะต้องห่างกัน 1 ชั่วโมง)

9. ความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีตรง รังสีกระจายและรังสีรวม

บ่อยครั้งที่เกิดความแปรปรวนจากสภาพบรรยากาศ เช่น เมฆ หมอก คว้น เป็นต้น ปังจึยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการแผ่รังสีบนพื้นผิวโลกโดยตรง

Liu และ Jordan (1960) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบ (Total Radiation on Horizontal Plane) ที่ผิวโลกและการแผ่รังสีเหนือบรรยากาศโลก โดยพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลจากเมฆ ซึ่งส่งผลต่อการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลก จะได้ว่า

กรณีรายวัน
$$K_T = \frac{H}{H_o}$$

กรณีรายชั่วโมง
$$k_T = \frac{I}{I_o}$$

H = การแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน (Daily Total Radiation on Horizontal

- Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$)
- H_d = การแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน (Daily Diffuse Radiation on Horizontal Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$)
- H_b = การแผ่รังสีตรงบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน (Daily Beam Radiation on Horizontal Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$)
- I = การแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง (Hourly Total Radiation on Horizontal Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$)
- I_d = การแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง (Hourly Diffuse Radiation on Horizontal Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}}$)
- I_b = การแผ่รังสีตรงบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง (Hourly Beam Radiation on Horizontal Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}}$)
- K_T = ครรชนีความแจ่มใสรายวัน (Daily Clearness Index)
- k_T = ครรชนีความแจ่มใสรายชั่วโมง (Hourly Clearness Index)

และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีกระจายและการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน โดยมีความสัมพันธ์กับมุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ตก จะได้ว่า

สำหรับ $\omega_s < 81.4$ องศา

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.2727K_T + 2.4495K_T^2 \\ - 11.9514K_T^3 + 9.3879K_T^4 & ; \text{ for } K_T < 0.715 \\ 0.143 & ; \text{ for } K_T \geq 0.715 \end{cases}$$

สำหรับ $\omega_s \geq 81.4$ องศา

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.2832K_T + 2.5557K_T^2 \\ + 0.8448K_T^3 & ; \text{ for } K_T < 0.722 \\ 0.175 & ; \text{ for } K_T \geq 0.722 \end{cases}$$

พิชัย นามประกาย และคณะ (2532) ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีกระจายและการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวันโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัด ณ กรุงเทพฯ ฯ ในช่วงปี 2524-2531 สรุปได้ว่า

$$\frac{H_d}{H} = 1.663 - 7.307K_T + 27.853K_T^2 - 49.639K_T^3 + 29.241K_T^4 ; \text{ for } 0.17 < K_T < 0.75$$

จากหลักการสมมูลพลังงานกล่าวได้ว่า $H = H_b + H_d$

Erbs และ คณะ (1982) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีกระจายและรังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง โดยมีความสัมพันธ์กับเมฆในบรรยากาศ ซึ่งใช้ข้อมูล 4 สถานี ในประเทศสหรัฐอเมริกา และ 1 สถานี ในประเทศออสเตรเลีย กล่าวคือ

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & ; \text{ for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & ; \text{ for } 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & ; \text{ for } k_T > 0.80 \end{cases}$$

จากหลักการสมมูลพลังงานอาจกล่าวได้ว่า $I = I_b + I_d$

10. ความสัมพันธ์ระหว่างครชนีความแจ่มใสรายวัน จำนวนชั่วโมงที่มีแดดและความยาวนานของวัน

แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลกในแต่ละวันนั้นมีเวลาไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามเราสามารถประเมินเวลาที่มีแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ในแต่ละวันได้ ดังนั้น ความยาวนานของวัน (Day Length, N_1) มีความสัมพันธ์ กล่าวคือ

$$N_1 = \frac{2}{15} \cos^{-1}(\tan \phi \tan \delta)$$

จำนวนชั่วโมงที่มีแดด (Sunshine Duration, SD) จะได้จากการวัดตามสถานีต่างๆ ตามพิกัดบนผิวโลก อย่างไรก็ตามในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างครชนีความแจ่มใสรายวัน กับจำนวนชั่วโมงที่มีแดดและความยาวนานของวันนั้น จะต้องใช้หลักสถิติช่วยในการประเมิน ซึ่งอาจวิเคราะห์แบบดอดอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) หรือวิเคราะห์แบบดอดอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression Analysis)

จิรธรรม สันติสิริสมบุญ (2537) ได้ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างครชนีความแจ่มใสรายวันสามารถกับจำนวนชั่วโมงที่มีแดดและความยาวนานของวัน โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานี คือ กรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่, อุบลราชธานี และสงขลา สรุปได้ว่า (เฉพาะกรุงเทพมหานคร)

$$K_T = 0.2873 + 0.4826 \left(\frac{SD}{N_1} \right) - 0.1018 \left(\frac{SD}{N_1} \right)^2$$

และ ค่าเฉลี่ยของ K_T ในแต่ละวันเท่ากับ 0.5194

11. การประเมินการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง จากการรังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน

จากการศึกษาในเชิงสถิติของการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง และรังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละวัน และค่าเฉลี่ยรายเดือนในหลายสถานีตรวจวัด พบว่าการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง และรังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน มีความสัมพันธ์กันโดยใช้หลักวิเคราะห์ในเชิงสถิติ กล่าวคือ

$$r_t = \frac{I}{H}$$

r_t = อัตราส่วนการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมงต่อการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน (Ratio of Hourly Total to Daily Total Radiation)

Collares-Pereira และ Rabl (1979a) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง r_t , ω , ω_s ได้ว่า

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

และเมื่อพิจารณาการแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมงต่อการแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวันมีความสัมพันธ์กันโดยหลักวิเคราะห์ในเชิงสถิติ กล่าวคือ

$$r_d = \frac{I_d}{H_d}$$

r_d = อัตราส่วนการแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมงต่อการแผ่รังสีกระจายบนพื้นราบที่ผิวโลกรายวัน (Ratio of Hourly Diffuse to Daily Diffuse Radiation)

Liu และ Jordan (1960) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง r_d , ω และ ω_s จะได้ว่า

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

12. ความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีตรงบนพื้นราบที่ผิวโลกและการแผ่รังสีตรงบนพื้นเอียงที่ผิวโลก

ในการออกแบบระบบที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีตรงบนพื้นราบที่ผิวโลก และการแผ่รังสีตรงบนพื้นเอียงที่ผิวโลก เพื่อที่จะสามารถประเมินการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

Hottel และ Woertz (1942) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีตรงบนพื้นราบที่ผิวโลก และการแผ่รังสีตรงบนพื้นเอียงที่ผิวโลก ซึ่งขึ้นกับค่ามุม θ และ θ_z กล่าวคือ

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

R_b = ตัวประกอบเชิงเรขาคณิต (Geometric Factor) เมื่อพิจารณารังสีตรง

มุมเอซิมัท ที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ปกติจะมีค่า 0 องศา ในซีกโลกด้านเหนือของเส้นศูนย์สูตร (Northern Hemisphere) หรือ 180 องศา ในซีกโลกด้านใต้ของเส้นศูนย์สูตร (Southern Hemisphere)

กรณี $\gamma = 0$ องศา

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}$$

กรณี $\gamma = 180$ องศา

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}$$

13. การประเมินการแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง

ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสอาจกล่าวได้ว่า การแผ่รังสีกระจายจะมาจาก 3 แหล่งใหญ่ๆ กล่าวคือ การแผ่รังสีส่วนแรกเป็นการแผ่รังสีที่มาจากทุกทิศทุกทางจากท้องฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เรียกว่า การแผ่รังสีกระจายไอโซทรอปิก (Isotropic Part) และการแผ่รังสีส่วนที่สองจะมาจากการกระเจิงของรังสีจากท้องฟ้าในตำแหน่งรอบดวงอาทิตย์ เรียกว่า การแผ่รังสีกระจายรอบดวงอาทิตย์ (Circumsolar Diffuse) สำหรับการแผ่รังสีส่วนสุดท้าย เป็นการแผ่รังสีจากเส้นขอบฟ้า (Horizon Brightening) โดยเป็นการแผ่รังสีที่กระจายมาจากเส้นขอบฟ้า (Diffuse from Horizon) อย่างไรก็ตามยังมีการแผ่รังสีอีกประเภทหนึ่งซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากพื้นโลกโดยจะกระจายไปในบรรยากาศหรือวัตถุที่อยู่ในแนวราบ เรียกว่า การแผ่รังสีที่สะท้อนจากพื้นโลก (Ground-reflected radiation) และค่าการสะท้อนจากพื้นโลก (Reflectance of the ground, ρ_g) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถในการสะท้อนของรังสีที่พื้นโลก ปกติพื้นที่เป็นหิมะ $\rho_g = 0.7$ ดังนั้นแบบจำลองท้องฟ้า (Sky Model) จะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับการประเมินรังสีกระจาย และเมื่อพิจารณาการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบและพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมงจะมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ

$$R = \frac{I_T}{I}$$

R = ตัวประกอบเชิงเรขาคณิต เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีรวม

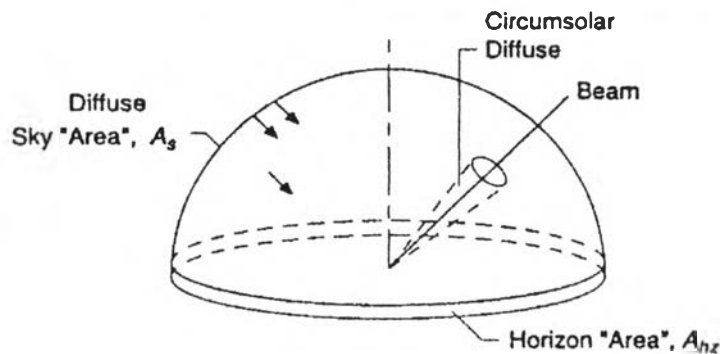
I_T = การแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง (Total Incident Radiation on Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}}$)

13.1 ท้องฟ้าไอโซทรอปิก (Isotropic Sky)

Hottel และ Woertz (1942) ได้สร้างความสัมพันธ์ของการแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง โดยตั้งสมมติฐานว่าท้องฟ้ามีการแผ่รังสีกระจายอย่างความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง และพิจารณาการแผ่รังสีที่สะท้อนจากพื้นโลกและการแผ่รังสีตรง เรียกว่า แบบจำลองการกระจายไอโซทรอปิก (Isotropic Diffuse Model) ต่อมา Liu และ Jordan (1963) ได้ปรับปรุงความสัมพันธ์ดังกล่าว กล่าวคือ

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g I \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$



รูปที่ 2.9 การแผ่รังสีจากท้องฟ้าไอโซทรอปิก ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

13.2 ท้องฟ้าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Sky)

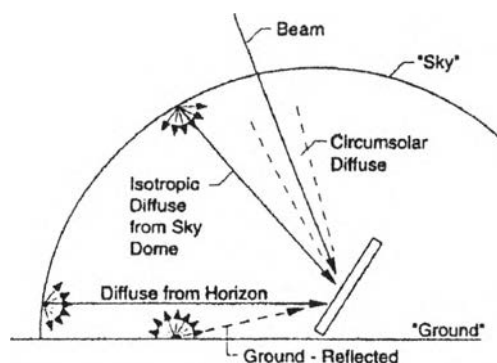
Hay และ Davies (1980) ได้ปรับปรุงลักษณะของท้องฟ้าไอโซทรอปิก โดยการพิจารณาการแผ่รังสีกระจายรอบในตำแหน่งท้องฟ้ารอบดวงอาทิตย์และการแผ่รังสีกระจายมาจากเส้นขอบฟ้าเพิ่มเติม เรียกว่าแบบจำลองของ Hay และ Davies (Hay And Davies Model) ต่อมา Reindl และคณะ (1990b) รวมทั้ง Klucher (1979) ได้ปรับปรุงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยมีชื่อเรียกว่า แบบจำลอง HDKR (HDKR Model) กล่าวคือ

$$I_T = (I_b + I_d A_1) R_b + I_d (1 - A_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$A_1 = \frac{I_b}{I_0} \quad ; \quad f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$$

A_i = ครรชนีแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Index)

f = ตัวประกอบโมดูลเลตัง (Modulating Factor)



รูปที่ 2.10 การแผ่รังสีจากท้องฟ้าแอนไอโซทรอปิก ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

Perez และคณะ (1988) ได้วิเคราะห์รายละเอียดการแผ่รังสีกระจายจาก 3 แหล่งใหญ่ๆ โดยสร้างความสัมพันธ์ของการแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง โดยพิจารณากรณีท้องฟ้าแอนไอโซทรอปิก เรียกว่าแบบจำลอง Perez และคณะ (The Perez et al. Model) กล่าวคือ

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \left(\frac{a_p}{b_p} \right) + I_d F_2 \sin \beta + I_{p_g} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$F_1 = \max \left(0, \left(f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right) ; \quad F_2 = f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23}$$

$$a_p = \max[0, \cos \theta] ; \quad b_p = \max[0, \cos \theta]$$

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{\text{tot}}} ; \quad \epsilon = \frac{I_d + I_n + 5.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{I_d + 5.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} ; \quad I_n = \frac{I_b}{\cos \theta}$$

F_1 = สัมประสิทธิ์ความสว่างในตำแหน่งท้องฟ้ารอบดวงอาทิตย์ (Circumsolar Brightness Coefficients)

F_2 = สัมประสิทธิ์ความสว่างเส้นขอบฟ้า (Horizon Brightness Coefficients)

a_p, b_p = ค่าคงตัวของมุมรูปกรวยของการแผ่รังสีในตำแหน่งท้องฟ้ารอบดวงอาทิตย์บนพื้นราบ

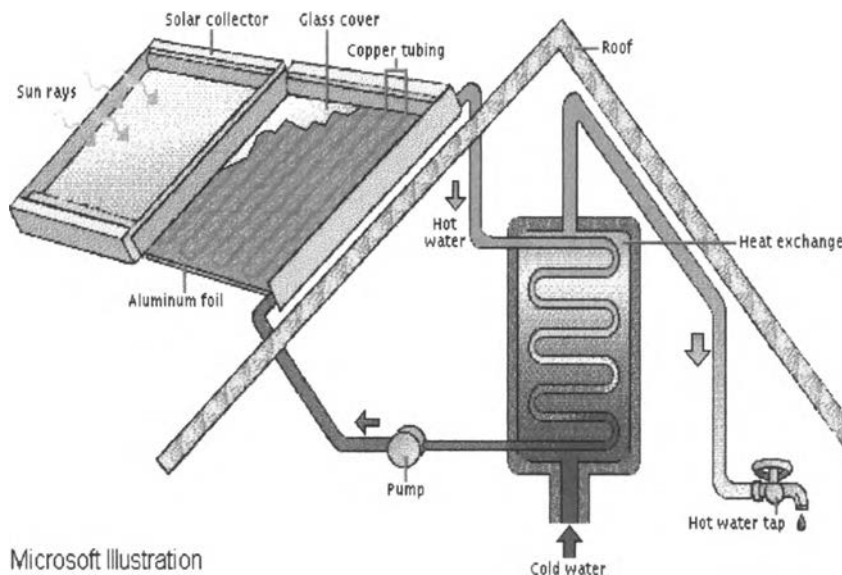
- Δ = ความสว่าง (Brightness)
 ϵ = ความแจ่มใส (Clearness)
 I_n = การแผ่รังสีตรงที่ตั้งฉากกับพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง (Normal Incidence Beam Radiation on Surface, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}}$)
 $f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$ = ค่าคงที่แปรผันกับความแจ่มใส

ตาราง 2.1 ค่าคงที่แปรผันกับความแจ่มใส สำหรับท้องฟ้าแอนไอโซทรอปิก
 (Perez และคณะ ; 1988)

Range of ϵ	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
0 - 1.065	-0.196	1.084	-0.006	-0.114	0.180	-0.019
1.065 - 1.230	0.236	0.519	-0.180	-0.011	0.020	-0.038
1.230 - 1.500	0.454	0.321	-0.255	0.072	-0.098	-0.046
1.500 - 1.950	0.866	-0.381	-0.375	0.203	-0.403	-0.049
1.950 - 2.800	1.026	-0.711	-0.426	0.273	-0.602	-0.061
2.800 - 4.500	0.978	-0.986	-0.350	0.280	-0.915	-0.024
4.500 - 6.200	0.748	-0.913	-0.236	0.173	-1.045	-0.065
6.200 - \uparrow	0.318	-0.757	0.103	0.062	-1.698	0.236

ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ แล้วถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับของเหลวที่ไหลผ่านแผ่นดูดกลืนรังสี (Absorber Plate) สำหรับวัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดกลืนรังสี จะต้องมีความสมบัติในการดูดกลืนรังสีและถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของของเหลวที่อุณหภูมิสูง เช่น ทองแดง อลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้น การนำวัสดุมาทำแผ่นดูดกลืนรังสีจำเป็นต้องพิจารณาค่าใช้จ่ายว่าคุ้มหรือไม่ ปัจจุบันได้มีการทดลองนำเอาวัสดุราคาถูกมาเคลือบผิวด้านบน โดยกรรมวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้สารละลายนิกเกิลดำ เรียกว่าแผ่นดูดกลืนรังสีแบบผิวเลือกรังสี (Selective Absorber Plate) ซึ่งมีความสมบัติในการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ออกแบบไว้ ส่วนมากเป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของรังสีอินฟราเรดหรือรังสีได้แดง และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนประมาณร้อยละ 94-95 เพื่อให้มีความสมบัติในการดูดกลืนรังสีได้ดี สำหรับกระจกซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ มีหน้าที่ในการป้องกันมิให้รังสีความร้อนคลื่นยาวสะท้อนออกไปจากแผ่นดูดกลืนรังสีได้



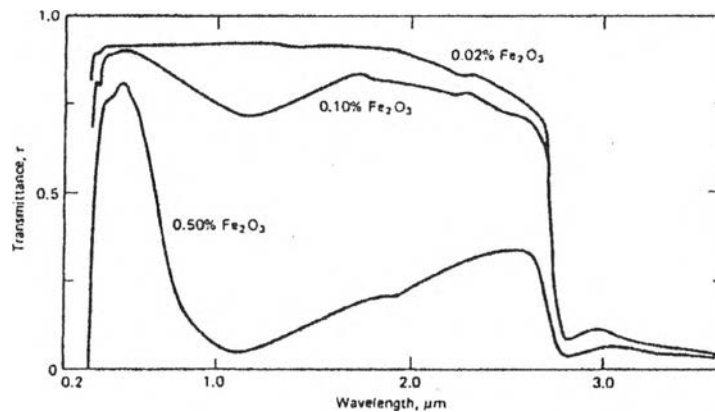
รูปที่ 2.11 การประยุกต์ใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบในการทำน้ำร้อน ; ที่มา Microsoft (1999)

1. ปัจจัยจากการสะท้อน การหักเห การดูดกลืนและการสูญเสียพลังงานของรังสีที่ผ่านกระจก

รังสีที่ส่องผ่านทะลุกระจกพบว่าเกิดการสะท้อนและหักเห ซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนล (Snell's Law) ในความเป็นจริงพบว่ากระจกไม่ได้เป็นตัวกลางที่ถ่ายเทรังสีได้ทั้งหมด โดยจะเกิดการสูญเสียและดูดกลืนรังสีที่กระจกไว้ส่วนหนึ่ง การดูดกลืนของกระจก ทำให้อุณหภูมิของกระจกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้การสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีลดลง ผลคูณของค่าตัวประกอบการส่งผ่านรังสีรวม (τ) และค่าตัวประกอบการดูดกลืนรังสี (α) เรียกผลคูณนี้ว่า ประสิทธิภาพของการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีของกระจก (Effective Transmittance-absorptance Product, $(\tau\alpha)$) อย่างไรก็ตามในการประเมินเราอาจใช้ความสัมพันธ์จาก

$$(\tau\alpha) = 1.01 \tau\alpha$$

แร่ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) เป็นส่วนผสมทางเคมีของกระจก มีอิทธิพลต่อการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 - 3.0 μm เป็นอย่างมาก ดังนั้นกระจกที่มีส่วนผสมของแร่ฮีมาไทต์สูง จะดูดกลืนรังสีได้ดี ในทางตรงกันข้าม ถ้าส่วนผสมของแร่ฮีมาไทต์ต่ำ จะทำให้การดูดกลืนรังสีน้อยลง ผลก็คือ ปริมาณรังสีจะส่งผ่านกระจกได้มากขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการส่งผ่านรังสีรวมกับความยาวคลื่นของรังสี ใช้กระจกที่มีส่วนผสมของที่มีสัดส่วนแร่ฮีมาไทต์ในระดับต่างๆ (กระจกหนา 6 มิลลิเมตร) ; ที่มา Dietz (1954)

2. หลักการทำงานของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

เมื่อแผ่นดูดกลืนรังสีได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์จะถ่ายเทความร้อนไปยังของไหล จากหลักการสมดุลความร้อน (Heat Balance) ในเงื่อนไขสถานะสม่ำเสมอ (Steady State Condition) กล่าวคือ

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [S - U_L (T_f - T_a)]$$

และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพ

$$\eta_c = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int I_T dt}$$

\dot{Q}_u = อัตราพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์โดยถ่ายเทให้กับของเหลว (W)

U_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Heat Transfer Coefficient of Flat-plate Collector, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

A_c = พื้นที่ของแผ่นดูดกลืนรังสี (m^2)

S = $I_T (\tau\alpha)$ รังสีที่แผ่นดูดกลืนรังสีได้รับจากดวงอาทิตย์ ($\frac{MJ}{m^2 \cdot hour}$)

I_T = การแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง ($\frac{MJ}{m^2 \cdot hour}$)

η_c = ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Efficiency of Flat-Plate Collector)

T_a = อุณหภูมิของอากาศในบรรยากาศ (K)

T_i = อุณหภูมิของของไหลก่อนไหลเข้าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (K)

F_R = ตัวคูณปัจจัยการดึงความร้อนมาใช้ของแผ่นดูดกลืนรังสี (Collector Heat Removal Factor)

3. การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) และการพาความร้อน (Convection Heat Transfer) ตำแหน่งของการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นที่ด้านบน ด้านล่างและด้านข้าง การสูญเสียความร้อนในตำแหน่งต่างๆ เขียนเป็นสมการ ได้คือ

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

U_t = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

U_b = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านล่างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

U_e = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านข้างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

3.1 การสูญเสียความร้อนจากด้านบนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

พิจารณาตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่มีกระจกอยู่ด้านบน ด้านล่างและด้านข้างหุ้มด้วยฉนวน การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนของกระจก ใช้หลักสมดุลความร้อนและการถ่ายเทความร้อน เขียนเป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งมีรูปแบบซับซ้อน มีความยุ่งยากและไม่สะดวกต่อการใช้งาน อีกทั้งจะต้องทราบอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืนรังสี ความเร็วลม อุณหภูมิบรรยากาศ ตลอดจนอุณหภูมิเฉลี่ยของกระจกในแต่ละชั้นเพื่อหาคำตอบ และยังต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข (Numerical Method) ประเภทการทำซ้ำ (iteration) เข้าแก้ปัญหา

Klein (1979) ดำเนินการทดลอง เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ โดยพัฒนาสมการของ Hottel, Woertz และ Klein (1975) กล่าวคือ

$$U_t = \left[\frac{N_g}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)^e}{(N_g + f_t)} \right]} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.00591N_g h_w)^{-1} + \frac{2N_g + f_t - 1 + 0.113\epsilon_p}{\epsilon_g} - N_g}$$

$$f_i = (1 + 0.089 h_w - 0.116 h_w \epsilon_p)(1 + 0.07866 N_g) ; e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}}\right)$$

$$\text{กรณี } 0^{\circ} < \beta < 70^{\circ} \quad C = 520 (1 - 0.000051 \beta^2)$$

$$\text{กรณี } \beta > 70^{\circ} \quad \text{ให้แทนค่า } \beta = 70^{\circ}$$

N_g = จำนวนแผ่นกระจกใส (Number of Glass Cover)

T_{pm} = อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นตุ้ดกลืนรังสี (Mean Plate Temperature, K)

ϵ_g = ค่าการแผ่รังสีของกระจกใส (Emittance of Glass, 0.88)

ϵ_p = ค่าการแผ่รังสีของแผ่นตุ้ดกลืนรังสี (Emittance of Plate)

h_w = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเนื่องจากลมพัดผ่านผิวกระจกด้านบนสุด (Wind Heat Transfer Coefficient, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

σ = ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stephan-Boltzmann Constant, $5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$)

3.2 การสูญเสียความร้อนด้านล่างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

ในความเป็นจริงด้านล่างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบจะหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสีย ดังนั้นเมื่อพิจารณาการพาความร้อนและการแผ่รังสี ที่ด้านล่างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถอนุมานไม่พิจารณาได้ การสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ พิจารณาได้จากความสัมพันธ์ กล่าวคือ

$$U_b = \frac{k_b}{L_b}$$

L_b = ความหนาของฉนวน (m)

k_b = การนำความร้อนของวัสดุฉนวน (Thermal Conductivity of Insulating Material, $\frac{W}{m \cdot K}$)

3.3 การสูญเสียความร้อนด้านข้างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

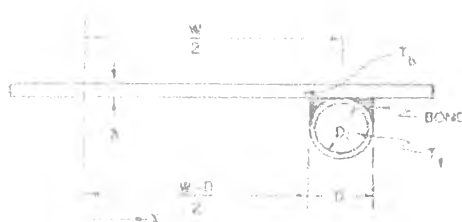
การสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ เป็นการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการหุ้มฉนวนกันความร้อนด้านข้าง Tabor (1958) ได้แนะนำว่าฉนวนความร้อนสำหรับด้านข้างควรมีความหนาเท่ากับด้านล่าง สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$U_o = \frac{(UA)_{edge}}{A_c}$$

$(UA)_{edge}$ = ผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ด้านข้างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ $\left(\frac{W}{K}\right)$

4. ประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสี

เมื่อรังสีตกกระทบแผ่นดูดกลืนรังสี ความสามารถในการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ได้ออกแบบไว้นั้น พิจารณาได้จากประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสี สามารถประเมินได้จากค่าดูดกลืนรังสี (Absorbance) ที่ความยาวคลื่นนั้นๆ ได้ ตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพดังกล่าวคือ ประสิทธิภาพของครีป (Fin Efficiency, F)



รูปที่ 2.13 แสดงรายละเอียดของแผ่นดูดกลืนรังสีและท่อ และการสมดุลพลังงานจากหลักสมดุลพลังงาน ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

$$S\Delta x - U_L \Delta x(T - T_a) + \left(-k_p \delta' \frac{dT}{dx}\right)_x - \left(-k_p \delta' \frac{dT}{dx}\right)_{x+\Delta x} = 0$$

สมการดังกล่าวมีคำตอบคือ

$$q'_{fm} = (W - D)F(S - U_L(T_b - T_a))$$

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{m'(W - D)}{2} \right]}{\frac{m'(W - D)}{2}} ; \quad m' = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \delta'}}$$

$$q'_{fn} = \text{พลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีต่อความยาวท่อ} \left(\frac{W}{m} \right)$$

$$T_b = \text{อุณหภูมิ ณ จุดรอยต่อแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อ} \text{ (K)}$$

$$D = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อ} \text{ (m)}$$

$$\delta' = \text{ความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสี} \text{ (m)}$$

$$k_p = \text{การนำความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสี} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$W = \text{ระยะระหว่างท่อบนแผ่นดูดกลืนรังสี} \text{ (m)}$$

5. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังของไหล

เมื่อความร้อนเคลื่อนที่ผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อนั้น จะเกิดการต้านความร้อนอยู่ 2 จุด จุดแรกได้แก่รอยต่อระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีและท่อ และจุดต่อมาได้แก่ความต้านทานที่เกิดขึ้นจากผิวท่อและของไหล ดังนั้นแฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency Factor, F') จึงเป็นตัวแปรที่บอกถึงความร้อนที่สามารถถ่ายเทจากแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังของเหลว เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ กล่าวคือ

$$q'_u = WF'(S - U_L(T_f - T_a))$$

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและจุดรอยต่อ

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_f \pi D_i} + \frac{1}{C_b}} ; \quad C_b = \frac{k_{bo} b}{\gamma_b}$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]}$$

$$q'_u = \text{พลังงานที่เคลื่อนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อความยาวท่อ} \left(\frac{W}{m} \right)$$

$$D_i = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ} \text{ (m)}$$

$$C_b = \text{การนำความร้อนระหว่างรอยต่อแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อ} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$k_{bo} = \text{การนำความร้อนโลหะของรอยต่อแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อ} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$\gamma_b = \text{ความหนาเฉลี่ยของรอยต่อแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อ} \text{ (m)}$$

$$b = \text{ความกว้างของรอยต่อแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อ} \text{ (m)}$$

$$h_f = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล} \quad \text{เนื่องจากการไหลภายในท่อที่ขี้ดติดกับแผ่นดูดกลืนรังสี} \text{ (Convection Heat Transfer Coefficient, } \frac{W}{m^2 \cdot K} \text{)}$$

6. ความสามารถในการดึงความร้อนของไหล

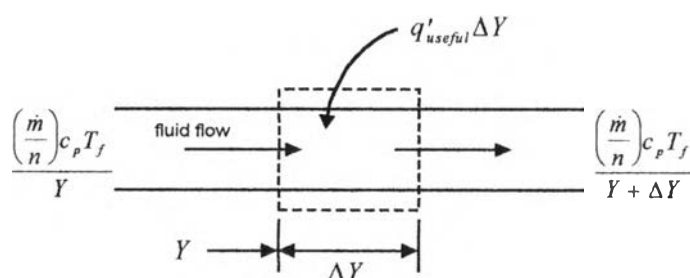
ความสามารถในการดึงความร้อนของของไหล ที่ถ่ายเทมาจากแผ่นดูดกลืนรังสีผ่านจุดรอยต่อต่างๆ มายังของไหล เป็นปัจจัยกับอุณหภูมิและทิศทางของของไหล สามารถพิจารณาได้จากตัวแปรที่เรียกว่า แฟกเตอร์การไหล (Flow Factor, F'') และเมื่อพิจารณารูปที่ 2.20 สามารถเขียนสมมูลพลังงานได้ คือ

$$\left(\frac{\dot{m}}{n_t}\right) c_{pf} T_f|_y - \left(\frac{\dot{m}}{n_t}\right) c_{pf} T_f|_{y+\Delta y} + \Delta y q'_u = 0$$

\dot{m} = อัตราการไหลของของไหลในท่อของแผงรับรังสีแต่ละท่อ ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

c_{pf} or c_p = ความร้อนจำเพาะของของไหล ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$)

n_t = จำนวนท่อของที่วางขนานกันในแผงรับรังสี



รูปที่ 2.14 สมมูลพลังงานของของไหล ; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

ในกรณีนี้ สมมติว่า F' และ U_L ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งใดๆ บนตัวรับรังสี และกำหนดให้ T_f เป็นอุณหภูมิของของไหลในท่อที่ชิดติดกับแผ่นดูดกลืนรังสี โดยที่ $T_f|_y = T_1$ และ $T_f|_{y+\Delta y} = T_2$ เป็นอุณหภูมิทางเข้า/ออกที่ตามแนวความยาวของแผ่นดูดกลืนรังสีตามลำดับ และ L_p เป็นความยาวของแผ่นดูดกลืนรังสี และ T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำไหลออกจากตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถหาคำตอบสำหรับการคำนวณอุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่ง y ใดๆ ได้ คือ

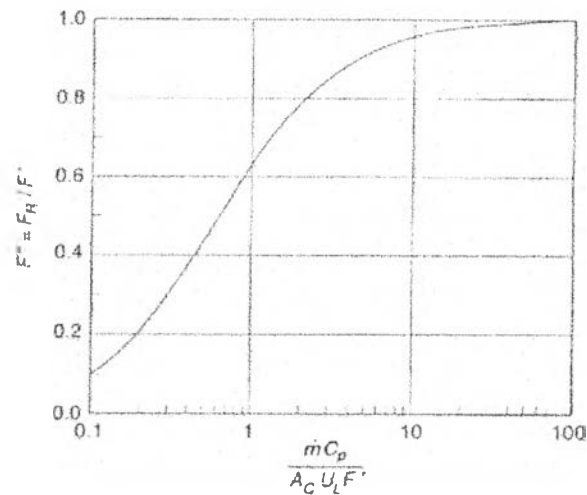
$$\frac{\left(T_2 - T_a - \frac{S}{U_L}\right)}{\left(T_1 - T_a - \frac{S}{U_L}\right)} = e^{-\left(\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p}\right)}$$

และถ้าแผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่ทางเข้า จะได้ว่า

$$F_R = \left(\frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L}\right) e^{-\left(\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p}\right)}$$

ถ้าหาร F_R ด้วย F' จะได้ค่าแฟกเตอร์การไหล กล่าวคือ

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p}\right) \right]$$



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์การไหล (F'') และ $\frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L F'}$; ที่มา Duffie และ Beckman (1991)

7. การแผ่รังสีวิกฤต

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มักจะมีระดับพลังงานไม่สม่ำเสมอ อาจกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ย่อมมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การแผ่รังสีรวมบนพื้นเอียงที่ผิวโลกรายชั่วโมง ที่มีค่าต่ำที่สุดจนทำให้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบไม่สามารถนำพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ ถ่ายเทให้กับของไหลไปใช้งานได้ เรียกว่า การแผ่รังสีรวมวิกฤตสำหรับตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Critical Radiation Level for Flat-plate Collectors, I_{Tc} , $\frac{MJ}{m^2 \cdot hour}$) มีความสัมพันธ์ กล่าวคือ

$$I_{Tc} = \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{F_R (\tau \alpha)}$$

ดังนั้นอัตราพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์โดยถ่ายเทให้กับของเหลวที่มีค่าต่ำที่สุด คือ

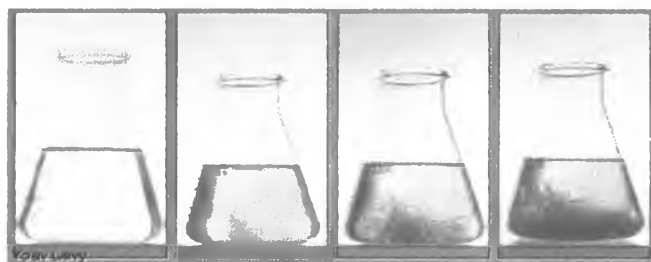
$$Q_u = A_c F_R (I_T - I_{Tc})$$

สารเปลี่ยนวิภาค

การสะสมความร้อนที่มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เป็นกุญแจนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ การสะสมความร้อนที่อุณหภูมิต่ำมีหลายวิธี การสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนวิภาคของสารเคมีเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ (พิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนวิภาคระหว่างของแข็งกับของเหลว) เนื่องจากมีศักยภาพสูง เพราะความหนาแน่นในการสะสมความร้อนสูง และอุณหภูมิในการสะสมความร้อนคงที่ การสะสมความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ปกติจะอยู่ในช่วง 10-120 องศาเซลเซียส ซึ่งครอบคลุมในการใช้งาน เช่น การผลิตน้ำร้อนใน อาคาร บ้านเรือน ระบบฮีตปั๊มทำอากาศร้อน ระบบทำความเย็นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น การใช้ระบบสะสมความร้อนแบบความร้อนแฝง อย่างน้อยที่สุดจะต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนแรกเป็นสารเคมีที่สามารถเปลี่ยนวิภาคระหว่างของแข็งและของเหลวในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน และมีค่าความร้อนแฝงสูงส่วนที่สองเป็นรูปแบบของการบรรจุสารเปลี่ยนวิภาค และส่วนสุดท้ายเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารเปลี่ยนวิภาคกับของไหล โดยอุปกรณ์ในส่วนนี้เป็ปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพในเก็บและจ่ายความร้อน หลักสำคัญในการพัฒนาระบบสะสมความร้อนแบบความร้อนแฝง คือ การศึกษาวิจัยถึงสารเคมีสะสมความร้อนและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานนั้นๆ (Abhat, 1983)

1. กระบวนการเปลี่ยนวิภาคของสารเปลี่ยนวิภาค

ความเข้าใจกระบวนการเกิดผลึก (Crystallization) และหลอมเหลว (Melting) เป็นพื้นฐานสำคัญในการวิจัยและพัฒนาสารเปลี่ยนวิภาค ความร้อนจะถูกสะสมในขณะที่สารเปลี่ยนวิภาคหลอมเหลว และจะถูกนำมาใช้ในขณะแข็งตัว กระบวนการเกิดผลึกแบ่งออกเป็นหลายขั้นตอน ได้แก่ ช่วงการเหนี่ยวนำการเกิดผลึกหรือช่วงการเกิดผลึก และช่วงเติบโตของผลึก อาจกล่าวได้ว่า การแข็งตัวของสารเปลี่ยนวิภาคในขณะคายความร้อนแฝงการหลอมเหลวเป็นจุดสำคัญของเทคโนโลยี ปัญหาสำคัญของกระบวนการเกิดผลึกได้แก่ การเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooling) การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ที่ไม่คิดพอ และค่าการนำความร้อนที่ต่ำโดยผ่านผลึกที่แข็งตัวแล้ว ในขณะที่จ่ายความร้อน ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการทำงานของสารเปลี่ยนวิภาค ในทางตรงกันข้ามในการหลอมเหลวปัญหาดังกล่าว และค่าการนำความร้อนที่ต่ำในขณะหลอมเหลว จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสารเปลี่ยนวิภาคมากนัก การแข็งตัวของสารเปลี่ยนวิภาคจะเริ่มต้นจากการเกิดจุดศูนย์กลาง ที่เรียกว่า นิวเคลียส (Nuclei) และจะเติบโตไปสู่ขนาดที่เหมาะสม ขั้นตอนนี้เรียกว่า การเกิดนิวเคลียส และจะกลายเป็นผลึกเล็กๆ ในเวลาต่อมา ผลึกเล็กๆ ดังกล่าวจะเติบโตอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นของแข็งทั้งหมดจุดศูนย์กลางดังกล่าวอาจเริ่มเกิดขึ้นจากผนังหรือผิวของภาชนะบรรจุ ผุ่น หรืออนุภาคเจือปน ความไม่บริสุทธิ์ตั้ง



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการเกิดผลึกสารเปลี่ยนวิภาคในขณะแข็งตัว ; ที่มา Microsoft (1999)

กล่าวจะเรียกว่า เมล็ดผลึก (Seed Crystals) ซึ่งอาจจะตั้งใจผสมเข้าไปในสารเปลี่ยนวิญภาค เพื่อช่วยให้เริ่มการเกิดผลึกได้ง่าย หรือรักษาสภาพการแข็งตัวของผลึกในการสัมผัสกับของเหลวในขณะที่แข็งตัว ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะที่แข็งตัวของผลึก ได้แก่ การอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) และการเย็นตัวยิ่งยวด ปัญหาดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดความแน่นอนต่อประสิทธิภาพในการจ่ายความร้อนของสารเปลี่ยนวิญภาค อย่างไรก็ตามได้มีการวิจัยพบว่าสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds) ในธรรมชาติจะเกิดปรากฏการณ์การเย็นตัวน้อยมากหรือไม่เกิดเลย ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของสารเจือปนที่มีอยู่ในสารประกอบอินทรีย์ตามธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ความรู้เกี่ยวกับสารเจือปนกระตุ้นให้เกิดงานวิจัยที่จะพัฒนาสารเคมีที่ทำหน้าที่ในการช่วยสร้างนิวเคลียส เพื่อผสมลงไปนสารเปลี่ยนวิญภาคประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายความร้อน (George, 1992)

2. หลักเกณฑ์การพิจารณาสารเปลี่ยนวิญภาค

Abhat (1980) จำแนกกลุ่มของสารเคมีที่มีคุณสมบัติในสภาวะความร้อนแบบเปลี่ยนวิญภาค ในช่วงอุณหภูมิ 0-120 องศาเซลเซียส ได้แก่สารอินทรีย์ (Organics) และสารอนินทรีย์ (Inorganics) อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้สารเคมีเหล่านี้จะต้องพิจารณาคูสมบัติในด้านต่างๆ ซึ่งอาจจำแนกโดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆ กล่าวคือ คุณสมบัติในเชิงอุณหพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์ (kinetics) และเคมี นอกจากนี้การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในเรื่องของราคาและปริมาณที่มีอยู่ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ ก็เป็นเรื่องที่จะต้องพิจารณาคด้วย

2.1 หลักเกณฑ์ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics Criteria)

- จุดหลอมเหลว (Melting Point, K) จะต้องอยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งาน มีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตร ($\frac{kJ}{m^3}$) และมวลสูง ($\frac{kJ}{kg}$) เพื่อว่าจะสามารถสะสมความร้อนได้มาก โดยใช้สารเปลี่ยนวิญภาคจำนวนน้อย

- มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, $\frac{kJ}{kg.K}$) สูง ซึ่งจะช่วยสะสมความร้อนในขณะที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนวิญภาค เพื่อลดขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุ

- มีค่าการนำความร้อนสูง (Thermal Conductivity, $\frac{W}{m.K}$) เพื่อลดความแตกต่างของระดับอุณหภูมิสำหรับการสะสมและจ่ายความร้อน ทำให้การการสะสมและจ่ายความร้อนใช้เวลาสั้น

- มีจุดหลอมเหลวคงที่ (Congruent Melting) เพื่อที่จะแยกวิญภาคของเหลวและของแข็งออกจากกัน เนื่องจากถ้าในขณะที่หลอมเหลวมีทั้งวิญภาคของเหลวและของแข็งรวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยธรรมชาติความหนาแน่นในวิญภาคต่างๆ จะแตกต่างกัน ผลสุดท้ายจะทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) ของเปลี่ยนแปลงสัดส่วนทางเคมีของสารเปลี่ยนวิญภาค

2.2 หลักเกณฑ์ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic Criteria)

- ไม่เกิด หรือเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดน้อยมากในขณะที่เปลี่ยนวิญภาค เป็นของแข็งที่จุดแข็งตัว (Freezing Point) ซึ่งจะก่อให้เกิดการเกิดนิวเคลียสสูง และเกิดโครงสร้างผลึก (Crystals) อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการลดการเย็นตัวยิ่งยวด อาจทำได้โดยเติมตัวสร้างนิวเคลียส (Nucleating) ลงในสารเปลี่ยนวิญภาค

2.3 หลักเกณฑ์ทางเคมี (Chemical Criteria)

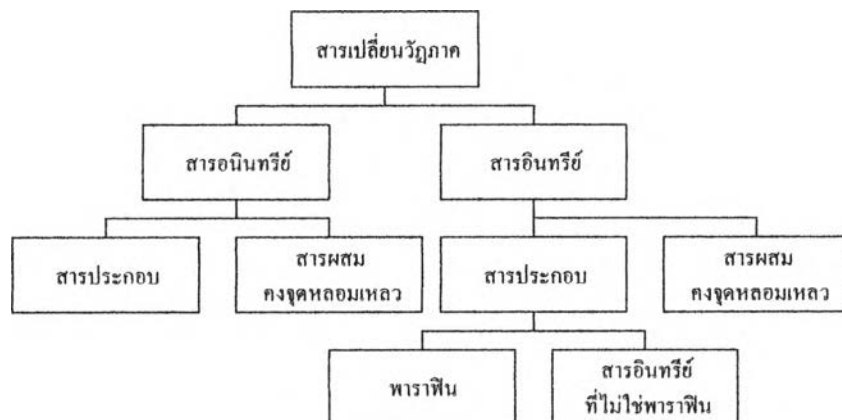
- มีเสถียรภาพในทางเคมี (Chemical Stability)
- ไม่เกิดการสลายตัวทางเคมี เพื่อว่าอายุของระบบจะใช้งานได้นาน
- ไม่เกิดการกัดกร่อนกับวัสดุ
- ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่เกิดการระเบิด

2.4 หลักเกณฑ์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Criteria)

- หาได้ง่ายและมีปริมาณมากพอเพียงกับความต้องการใช้
- ราคาไม่แพง

3. การจำแนกสารเปลี่ยนวิภาค

จากที่กล่าวมาแล้วสารเปลี่ยนวิภาคสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารอินทรีย์ (สังเคราะห์จากสิ่งที่มีชีวิต) และสารอนินทรีย์ (สังเคราะห์จากสิ่งที่ไม่มีชีวิต) นอกจากนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ ได้อีก คือ สารประกอบ (Compounds) และสารผสมคงจุดหลอมเหลว (Eutectics) รายละเอียดพิจารณารูปที่ 2.17

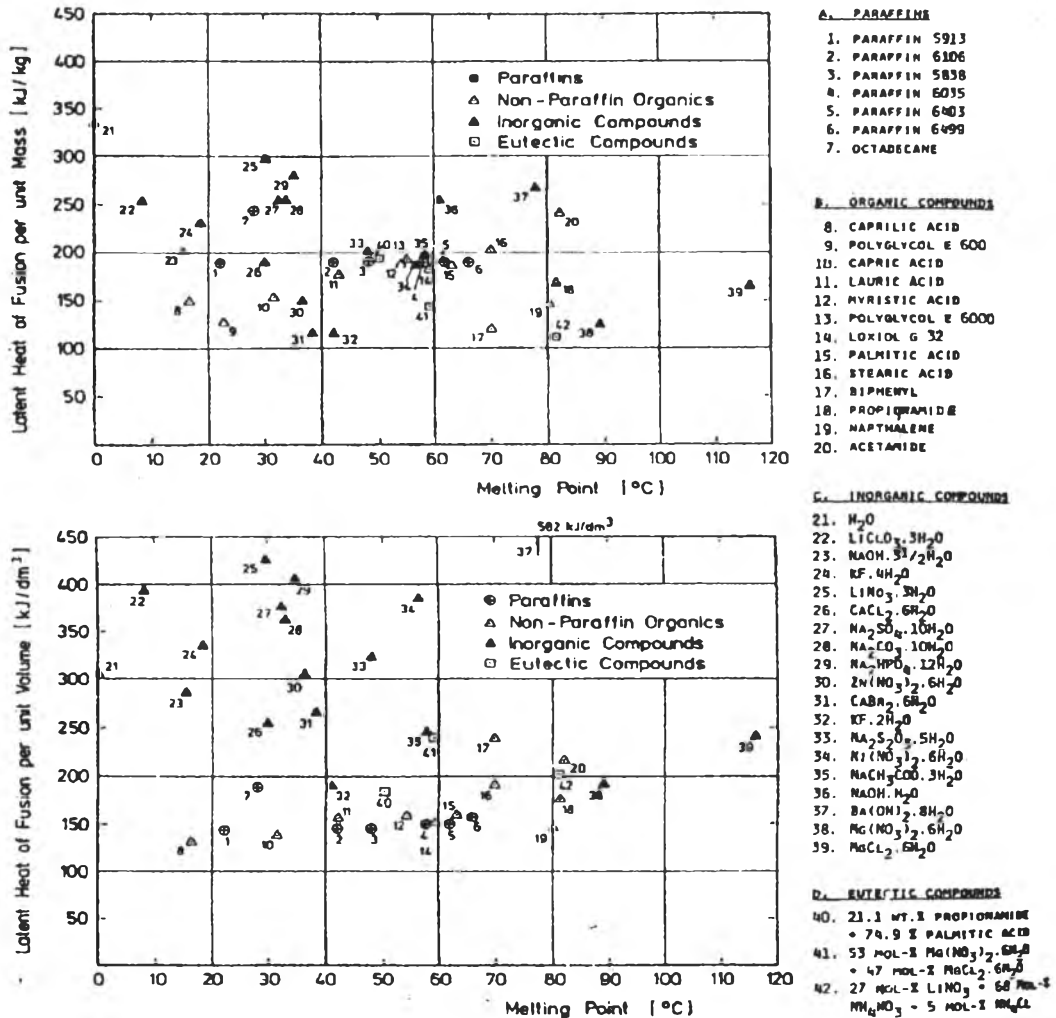


รูปที่ 2.17 แผนผังแสดงการจำแนกสารเปลี่ยนวิภาค ; ที่มา Abhat (1983)

Abhat (1977), Lane และ Glew (1975), Schröder (1980), Yoneda, Schneider และ Schmiegel (1978) ได้จัดกลุ่มของสารเปลี่ยนวิภาคแยกตามค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรและต่อมวล ในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนวิภาค 0-120 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.18 จากข้อมูลในรูปเราสามารถพิจารณาได้ว่า สารประกอบของกลุ่มสารอินทรีย์จะมีค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรอยู่ในช่วง $125-200 \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$ ซึ่งน้อยกว่าสารประกอบที่อยู่ในกลุ่มของเกลือไฮเดรต (Salt Hydrates) หรือสารประกอบที่มีผลึกของน้ำ โดยมีค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรอยู่ในช่วง $250-400 \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$

ตามปกติสารอินทรีย์จะมีค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรและมวลต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารอนินทรีย์ แต่ข้อดีของสารอินทรีย์ ก็คือสามารถเกิดนิวเคลียสได้ด้วยตัวเอง ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งาน

(Abhat, 1978) และสำหรับรายละเอียดของสารเปลี่ยนวัฏภาคในแต่ละกลุ่มต่างๆ มีรายละเอียด กล่าวคือ



รูปที่ 2.18 แสดงการจำแนกค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรและต่อมวลของสารเปลี่ยนวัฏภาคในช่วงอุณหภูมิ 0-120 องศาเซลเซียส ; ที่มา Abhat (1983)

3.1 กลุ่มสารอินทรีย์, พาราฟิน (Paraffins)

ความเข้าใจตามปกติของเราเกี่ยวกับพาราฟิน ก็คือ ขี้ผึ้ง (Waxy) ที่ใช้กันทั่วไปในอุณหภูมิปกติ คำศัพท์ในทางเคมีจะเรียกว่า ขี้ผึ้งพาราฟิน คุณสมบัติทางเคมี พาราฟิน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอนมาต่อกันเป็นโซ่ตรง (Straight-chain Hydrocarbons) เรียกว่า แอลเคน (Alkane) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลโดยทั่วๆ ไป คือ C_nH_{2n+2} สำหรับ n-แอลเคน (n-Alkane) ซึ่งตามปกติจะผสมอยู่ในขี้ผึ้งพาราฟินมากกว่าร้อยละ 75 และอาจถึงร้อยละ 100 พาราฟินบริสุทธิ์จะประกอบเฉพาะอัลเคน ยกตัวอย่างเช่น พาราฟินออกตะเดเคน (Paraffin Octadecane) มีสูตรทางเคมี คือ C₁₈H₃₈ ปกติจุดหลอมเหลวของพาราฟินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคาร์บอน แอลเคนที่มีคาร์บอน-อะตอม (C-atoms) 14-40 จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 6-80 องศาเซลเซียส

และในทางการค้าซึ่งจะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วง 8-15 อะตอม (Abhat, 1983 closed in Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol 14 pp. 768-769. Wiley, New York (1971))

คำว่า พาราฟิน มาจากภาษาละติน แปลว่า “มีสัมพรรคภาพเล็กน้อย” อย่างไรก็ตามสารประกอบเหล่านี้ค่อนข้างเฉื่อย ทำปฏิกิริยาเคมียาก ซึ่งปกติจะเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบ (Crude Oil) ดังนั้น พาราฟิน จึงเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการกลั่นแยกลำดับส่วน (Fractional Distillation) น้ำมันดิบ ในการปรับปรุงคุณสมบัติในวิฤภาคของแข็งของพาราฟินพบว่ามี 2 รูปแบบ คือ ทางกายภาพ และ โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) การปรับปรุงประเภทแรกจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง เช่น จุดหลอมเหลวของสารสูงกว่าเล็กน้อยจะนิ่มและยืดหยุ่นตัว โครงสร้างของผลึกเป็นรูปทรงแท่งเข็ม (Needle-shaped) เป็นต้น ในการปรับปรุงประเภทสองจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ จุดหลอมเหลวของสารต่ำจะแข็งและเปราะ โครงสร้างผลึกเป็นลักษณะรูปทรงแผ่น (Disc-shaped) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นรูปแบบอื่นๆ เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (reversible) (Teubel, Schneider และ Schmiegel, 1965)

พาราฟินมีคุณสมบัติเป็นสารเปลี่ยนวิฤภาคที่ดี เนื่องจากมีช่วงของอุณหภูมิในการประยุกต์กว้างและมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวสูง นอกจากนี้แล้วในขณะที่แข็งตัวพาราฟินจะไม่เกิดการเข็นตัวยิ่งยวด (Abhat, 1983) สำหรับราคาจะต้องมีการพิจารณา อย่างไรก็ตามจะต้องมีวิธีเฉพาะในการจำแนกระดับคุณภาพของพาราฟิน ในตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดบางส่วนในการจำแนกระดับคุณภาพ โดยปกติพาราฟินจะมีการผสมกันบางส่วนซึ่งไม่บริสุทธิ์ และข้อมูลจากโรงงานประกอบไปด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและราคา

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและราคาของพาราฟินบางชนิด (Abhat ; 1983)

PARAFFIN	DISTRIBUTION OF C-ATOMS	OIL CONTENT %	FREEZING POINT/RANG °C	HEAT OF FUSION kJ/kg: kJ/dm ³	DENSITY AT 20 °C / 70 °C kg/dm ³	SPECIFIC HEAT AT 100 °C kJ/kg.K	THERMAL CONDUCTIVITY W/m.K (SOILD PHASE)	COST (1979) DM/kg
¹⁾	C14	-	4.5	165:-	-	-	-	1.20 ²⁾
-	C15 - C16	-	8	153:-	-	-	-	0.50 ²⁾
5913 ³⁾	C13 - C24	20	22 - 24	189:144	0.900/0.760	2.1	0.21	0.50
OCTADECANE	C18	0	28	244:189	0.814/0.774	2.16	0.15	150.0
6106 ³⁾	C16 - C28	5	42 - 44	189:145	0.910/0.765	2.1	0.21	0.70
P116 ⁴⁾	-	-	45 - 48	210:165	0.817/0.786	2.5	-	0.44 ²⁾
5838 ³⁾	C20 - C33	< 0.5	48 - 50	189:145	0.912/0.769	2.1	0.21	1.00
6035 ³⁾	C22 - C45	4	50 - 60	189:150	0.920/0.795	2.1	0.21	0.60
6403	C23 - C45	< 0.5	60 - 64	189:150	0.915/0.790	2.1	0.21	1.00
6499 ³⁾	C21 - C50	3	64 - 68	189:157	0.930/0.830	2.1	0.21	0.80

¹⁾ - IMPLIES DATA NOT AVAILABLE

³⁾ MANUFACTURES OF TECHNICAL GRADE PARAFFINS 5913, 6106, 5838, 6035, 6403 AND 6499: TER HELL PARAFFIN, HAMBURG, FRG

²⁾ COST ESTIMATES ARE FOR 1974

⁴⁾ MANUFACTURES OF PARAFFIN P116: SUN OIL COMPANY, USA

สิทธิพร พึ่งใหญ่ (2538) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการสะสมและจ่ายพลังงานความร้อน ของสารเปลี่ยนวิฤภาคโดยใช้ พาราฟินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลจับตัวเรียงกันเป็นโซ่ตรง มี

สูตรทางเคมี C_nH_{2n+1} ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จัดได้ว่าเป็น สารเปลี่ยนวัฏภาคที่สามารถนำมาใช้ได้ดี ความสามารถในการสะสมพลังงานความร้อนสูงเนื่องจากความร้อนแฝงในการหลอมเหลวสูง ราคาต่ำ และไม่ทำปฏิกิริยากับทองแดง อย่างไรก็ตามข้อเสียของขี้ผึ้งพาราฟิน ได้แก่การนำความร้อนต่ำทั้งในวัฏภาคของไหลและของเหลว สำหรับรายละเอียดของประเภทของ ขี้ผึ้งพาราฟิน แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของขี้ผึ้งพาราฟินบางประเภท (สิทธิพร ; 2538)

ขี้ผึ้งพาราฟิน	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)
$C_{27}H_{56}$	58.8	234.9
$C_{28}H_{58}$	61.2	255.4
$C_{29}H_{60}$	64.4	238.6
$C_{30}H_{62}$	65.4	251.2
$C_{31}H_{64}$	68	242
$C_{32}H_{66}$	69.5	170.4

3.2 กลุ่มสารอินทรีย์, สารที่ไม่ใช่พาราฟิน (Non-paraffin)

จากรูปที่ 2.18 แสดงค่าความร้อนแฝงต่อมวลของสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่พาราฟิน ซึ่งเป็นสารโมเลกุลใหญ่ซึ่งอยู่ในสิ่งมีชีวิต เรียกว่า ลิพิด (Lipid) ลิพิดเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น อีเทอร์ เป็นต้น เราอาจสกัดลิพิดได้จากเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ และกรดไขมัน (Fatty Acids) ก็เป็นลิพิดประเภทหนึ่งด้วย กรดไขมันเป็นสารประกอบที่อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ มีสูตรทางเคมี คือ $CH_3(CH_2)_nCOOH$ มีค่าความร้อนแฝงต่อมวลใกล้เคียงกับพาราฟิน กรดไขมันบางตัวที่น่าสนใจแสดงรายละเอียดอยู่ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและราคาของกรดไขมันบางชนิด (Abhat ; 1983)

MATERIAL	MELTING POINT/RANGE °C	HEAT OF FUSION kJ/kg kJ/dm ³	DENSITY AT kg/dm ³	SPECIFIC HEAT kJ/kg.K	THERMAL CONDUCTIVITY W/m.K	COST (1979) DM/kg
CAPRIC ACID	16.5	149:128	1.003 (10 °C), 0.862 (80 °C)	- ¹⁾	0.148 (20 °C)	-
CAPRIC ACID	31.5	153:136	0.886 (40 °C)	-	0.149 (40 °C)	-
LAURIC ACID	42 - 44	178:155	0.870 (50 °C)	1.6	0.147 (50 °C)	2.50
MYRISTIC ACID	54	187:158	0.844 (80 °C)	1.6(S) ²⁾ , 2.7(L)	-	2.50
PALMITIC ACID	63	187:159	0.847 (80 °C)	-	0.165 (70 °C)	2.30
STEARIC ACID	70	203:191	0.941 (40 °C)	2.35 (125 °C)	0.172 (70 °C)	2.00

¹⁾ - IMPLIES DATA NOT AVAILABLE

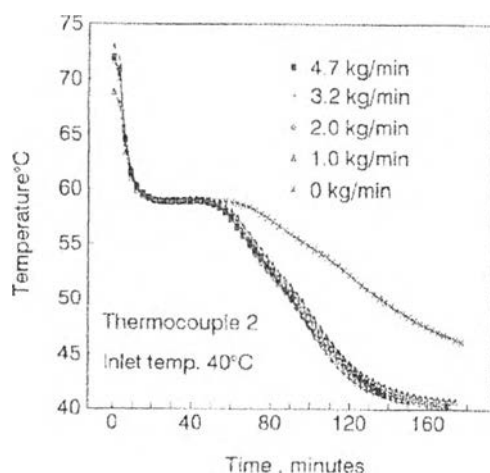
²⁾ S - SOLID, L - LIQUID

กรดไขมันมีคุณสมบัติในการนำกลับมาใช้ได้อีกสำหรับการหลอมเหลวและแข็งตัว และเกิดการแข็งตัวซึ่งขบวนการน้อยมากหรือไม่เกิดเลย (Abhat, 1983 และ Lane & Glew, 1975) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นสารเปลี่ยนวิญภาคที่ดี ปัญหาหลักของการใช้กรดไขมันในการสะสมความร้อนกล่าวคือ มีราคาแพงกว่าพาราฟิน 2-2.5 เท่า

ตาราง 2.5 แสดงคุณสมบัติของกรดพาล์มติก (Hasan ; 1993)

Melting range °C	57.8 – 61.8
Latent heat kJ/kg	201
Density g/cm ³ 30 / 70 °C	0.942 / 0.862
Dilation volume cm ³ /g 30-80 °C	0.113
Specific heat kJ/kg.K 30 / 70 °C	2.00 / 2.37
Thermal conductivity W/m.K	0.16

Hasan (1993) ได้ทำการศึกษาวิจัยโดยสรุปว่ากรดพาล์มติกเป็นสารเปลี่ยนวิญภาคที่สามารถสะสมความร้อนได้ดี เหมาะสำหรับช่วงอุณหภูมิ 57-60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนวิญภาคประมาณ $200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ และไม่เกิดการแข็งตัวซึ่งขบวนการ คุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งไปกว่านั้นจากการวิจัยยังพบว่าช่วงเวลาในการหลอมเหลวของกรดพาล์มติกไม่เป็นปัจจัยกับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านถึงสะสมความร้อน ที่มีกรดพาล์มติกบรรจุอยู่ในท่อภายในถึง ซึ่งแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 อุณหภูมิของกรดพาล์มติกแปรผันตามเวลา ในขณะที่กลายเป็นของแข็ง โดยที่ม่าน้ำไหลผ่านในอัตราการไหลช่วง 0-4.7 kg/min ; ที่มา Hasan (1993)

ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2532) ได้ศึกษาวิจัยพบว่าประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานความร้อนของฉนวนเก็บสะสมพลังงานจะมากขึ้นเมื่อค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านถึงมากขึ้น แต่ผลตรงกันข้ามกับกรณี

ถึงสะสมความร้อนที่มีกรดพาล์มติกเป็นสารตัวกลางในการสะสมความร้อน ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงาน กรณีของถึงสะสมความร้อนที่มีกรดพาล์มติกทำได้โดยเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของถึงสะสมความร้อนต่อพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของกรดพาล์มติก

3.3 กลุ่มสารอนินทรีย์ที่เป็นสารประกอบ

เกลือไฮเดรต เป็นสารเคมีที่มีสูตรทางเคมี คือ $M \cdot nH_2O$ โดยที่ M เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เมื่อพิจารณาจากสูตรเคมีจะพบว่า เกลือไฮเดรต จะมีผลึกของน้ำรวมตัวอยู่ด้วย เมื่อเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคเป็นของเหลวจะมีน้ำละลายแยกตัวออกมาต่างหากเสมอ ดังสมการ



เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงต่อปริมาตรพบว่าจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกรดไขมันและพาราฟิน ซึ่งจะช่วยให้ลดขนาดของอุปกรณ์สะสมความร้อนลงได้มาก (รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.19) ในความเป็นจริงเกลือไฮเดรตนี้ถูกใช้มาตั้งแต่ปี 1947 แล้ว (Telkes, 1947) สำหรับตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของเกลือไฮเดรตบางประเภท ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 0-120 องศาเซลเซียส ปัญหาสำหรับการนำเกลือไฮเดรตมาใช้คือ จุดหลอมเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงในขณะใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากเกลือไฮเดรตเป็นสารประกอบที่มีผลึกของน้ำรวมตัวอยู่ด้วยทั้งในวัฏภาคของเหลวและของแข็ง ซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวลดต่ำลง ปรากฏการณ์นี้คล้ายกับเกลือแกลง เนื่องจากสารประกอบอนินทรีย์ M ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าผลึกของน้ำจะเกิดการแยกตัวและรวมตัวกันบริเวณด้านล่างอุปกรณ์สะสมความร้อนเมื่อใช้งานไปนานๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสลายตัว (Decomposition) จากการวิเคราะห์พบว่าปรากฏการณ์นี้เป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible) และวัฏภาคของแข็งจะไม่หลอมละลายเป็นสารละลายอิมัลชันเหมือนกับเกลือไฮเดรตในตอนต้นนำมาใช้งานครั้งแรก

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและราคาของเกลือไฮเดรตบางชนิด (Abhat ; 1983)

MATERIAL	MELTING POINT/RANGE °C	HEAT OF FUSION kJ/kg; kJ/dm ³	DENSITY AT kg/dm ³	SPECIFIC HEAT kJ/kg.K	THERMAL CONDUCTIVITY W/m.K	COST (1979) DM/kg
H ₂ O ¹⁾	0	333-306	0.917 (0 °C), 0.998 (20 °C)	2.09 (S) ²⁾ , 4.18 (L) ²⁾	2.2 (S) ²⁾ , 0.6 (20 °C)	• ⁴⁾
KF · 4H ₂ O	18.5	231-336	1.455 (18 °C), 1.447 (20 °C)	1.84 (S), 2.39 (L)	- ⁴⁾	-
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29.7	171-256	1.710 (25 °C), 1.496 (L)	1.45 (S)	-	0.36
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32.4	254-377	1.485 (S)	1.93 (S)	0.544	0.10
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	35.0	281-405	1.520 (S), 1.442 (L)	1.70 (S), 1.95 (L)	0.514 (32 °C), 0.476 (49 °C)	0.95
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	36.4	147-304	2.065 (14 °C)	1.34 (S), 2.26 (L)	-	2.40
Na ₂ S ₂ O ₅ · 5H ₂ O	48.0	201-322	1.73 (S), 1.67 (L)	1.46 (S), 2.39 (L)	-	0.30
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	78.0	267-581	2.180 (S)	1.17 (S)	-	1.75
MgCl ₂ · 6H ₂ O	116.0	165-239	1.57 (20 °C), 1.442 (78 °C)	1.72 (S), 2.82 (L)	-	0.20

¹⁾ DATA FOR H₂O IS INCLUDED FOR THE SAKE OF COMPARISONS

²⁾ S - SOLID, L - LIQUID

³⁾ NEGLIGIBLE

⁴⁾ - IMPLIES DATA NOT AVAILABLE

ในการเลือกใช้เกลือไฮเดรต จะต้องพิจารณาและเข้าใจแผนภูมิสองวัฏภาค M-H₂O (Binary Phase Diagram) เป็นอย่างดี (Zief & Wilcox, 1976) กรณีนี้พิจารณาเฉพาะระบบวัฏภาคของแข็ง-ของเหลว (Solid-Liquid System) โดยจะพิจารณา M เป็นสารประกอบประเภทหนึ่ง และน้ำก็จะเป็นสารประกอบอีกประเภทหนึ่งเหมือนกัน ดังนั้นแผนภูมิสองวัฏภาคก็จะแสดงสัดส่วนของสารประกอบ 2 ชนิดคือ สารอนินทรีย์ M และน้ำ

Abhat (1983) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่าสารเปลี่ยนวัฏภาคที่คืนน้ำ จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีราคาถูก อายุการใช้งานนาน ทนทาน และไม่เป็นอันตรายเมื่อสัมผัสด้วยมือ และพบว่าสารประกอบที่ประเภทเกลือไฮเดรต เป็นสารเคมีที่มีความเหมาะสม ซึ่งมีราคาถูก ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะต่อมวลสูง แต่ข้อเสียก็คือ เกลือไฮเดรตมีแนวโน้มที่จะแข็งตัวต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง และเกิดการเสื่อมสภาพ

Kauffman และ Grunfest (1973) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่า สารเปลี่ยนวัฏภาคที่มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคระหว่างของเหลวและของแข็ง เท่ากับ 61 องศาเซลเซียส คือ สารเคมีผสมระหว่าง Mg(NO₃)₂·6H₂O - Al(NO₃)₃·9H₂O โดยมีสัดส่วนร้อยละ 53 - 57 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนวัฏภาคเท่ากับ $148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ สำหรับ NaOH·H₂O จะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 64.3 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนวัฏภาคเท่ากับ $272 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

3.4 กลุ่มสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่เป็นสารผสมคงจุดหลอมเหลว

สารผสมคงจุดหลอมเหลวเป็นของผสมระหว่างสารประกอบของกลุ่มสารอินทรีย์หรือกลุ่มสารอนินทรีย์ ในสัดส่วนโดยมวลต่างๆ เพื่อใช้เป็นสารเก็บสะสมความร้อน ซึ่งสามารถกำหนดจุดหลอมเหลวและจุดแข็งตัวตามที่ต้องการ

4. คุณลักษณะของสารเปลี่ยนวัฏภาค

4.1 คุณลักษณะในการหลอมเหลวและแข็งตัว

คุณลักษณะของการหลอมเหลวและการแข็งตัวของสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค เป็นสิ่งที่เราจะต้องเข้าใจและศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้ เพื่อการนำมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็น ช่วงการหลอมเหลวและการแข็งตัว หรือความสม่ำเสมอของจุดหลอมเหลว หรือลักษณะของการเกิดการเย็นตัวยิ่งยวด หรือเสถียรภาพของวัฏจักรเชิงความร้อน (Thermal Cycling) วิธีการที่จะทดสอบคุณลักษณะของการหลอมเหลวและการแข็งตัวดังกล่าว สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ (1) การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความร้อนในการเปลี่ยนวัฏภาค (Differential Scanning Calorimetry, DSC) โดยใช้การวิเคราะห์แผนภูมิพลังงานและเวลา (Energy-Time diagrams) เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของสารเปลี่ยนวัฏภาคในขณะหลอมเหลวและแข็งตัว รวมทั้งการถ่ายเทความร้อนในการเปลี่ยนวัฏภาคและความร้อนจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ นอกจากนั้นการวิเคราะห์การเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดก็สามารถตรวจสอบได้ (2) การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis, TA) เป็นการวิเคราะห์กราฟของการเย็นตัวและการหลอมเหลว (Heating and Cooling Curves) ของสาร

เปลี่ยนวัฏภาค เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค โดยผลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเพื่อศึกษาถึงการเก็บและจ่ายพลังงานความร้อนต่อไปได้

4.2 วัฏจักรเชิงความร้อน (thermal cycle)

วัฏจักรเชิงความร้อน จะเกี่ยวข้องกับ การหลอมเหลวและการแข็งตัวที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ของสารเปลี่ยนวัฏภาค ยกตัวอย่างเช่น สารเปลี่ยนวัฏภาคมีอายุการใช้งานนาน 20 ปี หากหนึ่งวันของการสะสมความร้อนเป็นกระบวนการที่สารเปลี่ยนวัฏภาคหลอมเหลวและแข็งตัวอย่างน้อยเพียงหนึ่งครั้ง ก็อาจกล่าวได้ว่า จะเกิดกระบวนการถึง 7365 วัฏจักร ตลอดอายุการใช้งานของสารเปลี่ยนวัฏภาค

จำนวนวัฏจักรเชิงความร้อนของสารเปลี่ยนวัฏภาคจะ ได้จากการวัดในการทดลอง ในทางปฏิบัติ สารอนินทรีย์ที่เป็นเกลือไฮดรตจะเป็นสารเปลี่ยนวัฏภาคที่มีเสถียรภาพเชิงความร้อน (Thermal Stability) การทดลองจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และอัตราการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการสะสมและการจ่ายความร้อนของสารเปลี่ยนวัฏภาคในแต่ละวัฏจักร จากการทดสอบวัฏจักรเชิงความร้อนพบว่าจำนวนวัฏจักรเชิงความร้อนของพาราฟินและกรดลอริก (Lauric Acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันมีค่าประมาณ 120 วัฏจักร โดยจะไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) (Abhat, 1983) สำหรับการเกิดวัฏจักรเชิงความร้อนที่สั้น คือ ไม่เกิน 90 วัฏจักรนั้น พบว่า $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารเปลี่ยนวัฏภาคที่เหมาะสมเมื่อไม่มีเฮกตะไฮเดรต (heptahydrate) ผสมอยู่ด้วย ซึ่งเฮกตะไฮเดรตจะต่อต้านการเกิดนิวเคลียสที่เหมาะสม ขณะที่โซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Sodium thiosulfate Pentahydrate, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) จะมีวัฏจักรเชิงความร้อนมากกว่า 1000 วัฏจักร (Telkes, 1975)

4.3 การกัดกร่อนกับวัสดุ

ภาชนะบรรจุสารเปลี่ยนวัฏภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการสะสมความร้อน เนื่องจากอายุที่ยาวนานของการใช้งานแปรผันกับความรุนแรงในการกัดกร่อน (Corrosion) ของสารเปลี่ยนวัฏภาคกับวัสดุที่นำมาใช้เป็นภาชนะ การวิเคราะห์การกัดกร่อนทำได้โดยการทดสอบ โดยวิธีที่เรียกว่า Gravimetric Analysis และการวิเคราะห์เชิงเคมี (Chemical Analysis) ซึ่งจะเป็นวิธีการวิเคราะห์ การกัดกร่อนและวิเคราะห์ทางเคมีตามลำดับ รายละเอียดบางส่วนของการทดสอบแสดงในตารางที่ 2.7

Hoffman, Hodgins และ Telkes (1955) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการสะสมความร้อนโดยใช้สารเปลี่ยนวัฏภาค พบว่าการใช้สารประกอบที่ประเภทเกลือไฮดรตเป็นสารเปลี่ยนวัฏภาค จะพบปัญหาในการสูญเสียค่าความร้อนแฝง อันเนื่องมาจากมีการแยกตัวของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลายชนิดในเกลือไฮดรต ยิ่งไปกว่านั้นในธรรมชาติเกลือไฮดรตมีแนวโน้มกัดกร่อนโลหะอีกด้วย

4.4 การเก็บสะสมพลังงานความร้อน

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในเบื้องต้น สำหรับหลักการเกี่ยวกับเหตุผลและความจำเป็นในการเก็บหรือสะสมพลังงานความร้อนในช่วงเหลือใช้และนำออกมาใช้เมื่อต้องการใช้นั้น ในการศึกษาวิจัยนี้จะพิจารณาการเก็บพลังงานความร้อนไว้ในรูปของความร้อนแฝง โดยใช้สารเปลี่ยนวัฏภาคเท่านั้น สารเปลี่ยนวัฏภาคที่ใช้สะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงมีอยู่หลายประเภท เช่น สารประกอบประเภทเกลือไฮดรต (Salt Hydrates) สารประกอบประเภทกรด สารประกอบประเภทซึ้ผึ้ง เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 แสดงความกักร้อนกับ โลหะของสารเปลี่ยนวัฏภาคชนิดต่างๆ (Abhat ; 1983)

Families of PCM	Heat Storage Material	Phase Transition Temperature of PCM (°C)	Phase Level of Melt During Tests (Approx. °C)	Material of Construction						
				Stainless Steel 1.4301	Mild Steel 1.033	Tin Plated Mild Steel	Copper	Al 99.5	Al MG3	
Organics	1. Lauric Acid	44.00	65.00	+	+	0	+	+	+	
	2. Wax Ester, Loxiol G 32	58.00	80.00	+	0	0	+	0	+	
Inorganic Salt Hydrates	3. LiClO ₃ ·3H ₂ O	8.10	20.00	0	0	+	0	0	0	
	4. CaCl ₂ ·6H ₂ O	29.70	50.00	+	+	0	+	-	-	
	5. Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.40	50.00	+	0	0	+	0	+	
	6. Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	35.00	55.00	+	+	0	+	-	-	
	7. Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36.40	55.00	+	-	0	+	-	-	
	8. Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48.00	70.00	+	+	0	-	+	+	
	9. CH ₃ COONa·3H ₂ O	58.00	60.00	0	0	+	0	0	0	
	10. Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	116.00	140.00	0	0	+	0	0	0	
	Inorganic Eutectic Compounds	11. Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O(67wt. %) - Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O(33wt%)		60.00	0	0	+	0	0	0
		12. Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O(53mol%) - MgCl ₂ ·6H ₂ O(47mol%)	59.10	70.00	+ A)	- B)	0	-	0	0

Notation :
 + Corrosion Resistant
 - Unsuitable
 0 Metal - PCM Pair Not Investigated

A) Tests with Stainless Steel AISI-403
 B) Tests with 1% Carbon Steel

ความสามารถในการสะสมความร้อนของสารเปลี่ยนวัฏภาค พิจารณาได้จากการที่สารเปลี่ยนวัฏภาคได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_1 ไปยัง T_m และจาก T_m จนถึง T_2 โดยที่ T_m เป็นอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนวัฏภาค ผลรวมของความร้อนสัมผัสของของแข็งจากอุณหภูมิ T_1 ไปยัง T_m ความร้อนแฝงที่ T_m ความร้อนสัมผัสของของเหลวจากอุณหภูมิ T_m ไปยัง T_2 คือ

$$Q_s = m_{\text{pcm}} \left[c_{\text{so}} (T_m - T_1) + H_{\text{fpcm}} + c_{\text{li}} (T_2 - T_m) \right]$$

Q_s = ความร้อนสะสมสำหรับสารเปลี่ยนวัฏภาค (kJ)

m_{pcm} = มวลของสารเปลี่ยนวัฏภาค (kg)

H_{fpcm} = ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนวัฏภาคของสารเปลี่ยนวัฏภาค (ของแข็ง ↔ ของเหลว) ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

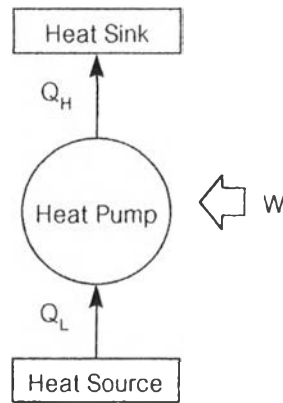
c_{so} = ความร้อนจำเพาะของสารเปลี่ยนวัฏภาคในวัฏภาคของแข็ง ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$)

c_{li} = ความร้อนจำเพาะของสารเปลี่ยนวัฏภาคในวัฏภาคของเหลว ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$)

ฮีตปั๊มแบบอัดไอ (Vapour Compression Heat Pump)

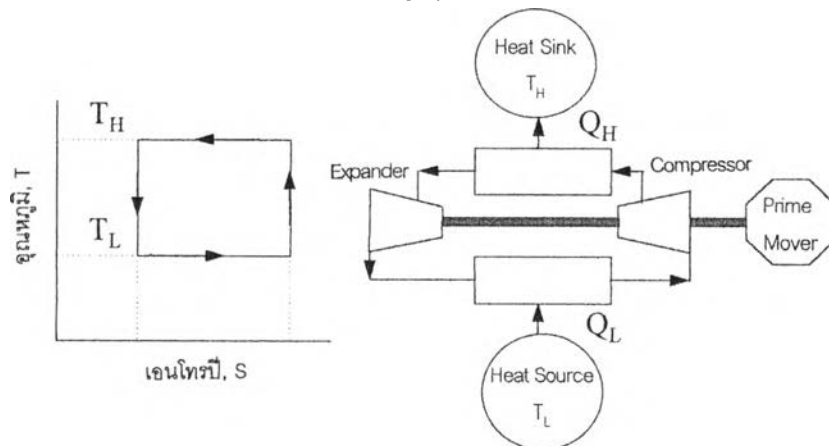
1. วัฏจักรคาร์โนสำหรับฮีตปั๊ม (Carnot heat pump Cycle)

ในปี ค.ศ. 1852 Lord Kelvin เป็นบุคคลแรกที่ได้ประดิษฐ์ฮีตปั๊ม ซึ่งประกอบไปด้วยคอมเพรสเซอร์ ซึ่งทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อน 2 แหล่ง ได้แก่ ถังน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำตามลำดับ โดยมีระบบการทำงานเช่นเดียวกับระบบทำความเย็น (Refrigerator) ต่างกันตรงการใช้งาน ฮีตปั๊มจะใช้งานด้านเครื่องควบแน่น



รูปที่ 2.20 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของฮีตปั๊ม ; ที่มา Heap (1983)

ปี ค.ศ. 1824 Carnot ได้อธิบายถึงแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ของระบบที่ทำงานระหว่างความร้อน 2 แหล่ง โดยเรียกว่า วัฏจักรคาร์โน (Carnot Cycle) ซึ่งมีความหมายว่าระบบใดๆ ก็ตามที่ทำงานระหว่างแหล่งพลังงาน 2 แหล่ง จะมีประสิทธิภาพของระบบมากกว่าวัฏจักรคาร์โนไม่ได้ สำหรับดัชนีที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบจริง คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบ ดังนั้นเพื่อสร้างหลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว จึงกำหนดให้ วัฏจักรฮีตปั๊มทำงานคล้ายกับวัฏจักรคาร์โน โดยยึดหลักเป็นวัฏจักรในอุดมคติ (Ideal Cycle) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุด

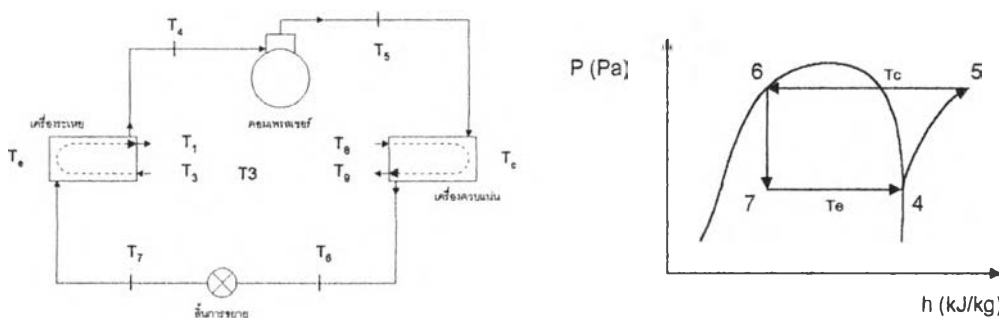


รูปที่ 2.21 วัฏจักรคาร์โนสำหรับฮีตปั๊มแบบอัดไอ ; ที่มา Reay และ Macmichael (1987)

รูปที่ 2.22 แสดงกระบวนการของวัฏจักรคาร์โนสำหรับฮีตปั๊มแบบอัดไอ ในรูปแผนภูมิอุณหภูมิมอโตโรปี วัฏจักรจะขยายตัวและอัดอย่างสมบูรณ์แบบกระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic Process) โดยที่มอเตอร์กำลัง (Prime Mover) จ่ายงานให้กับคอมเพรสเซอร์เพื่อดึงเอาพลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนต่ำ (Q_L) ที่อุณหภูมิลำดับพลังงานความร้อนต่ำ (T_L) ไปจ่ายให้แก่แหล่งพลังงานความร้อนสูง (Q_H) ที่อุณหภูมิลำดับพลังงานความร้อนสูง (T_H) ดังนั้นสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรคาร์โนสำหรับฮีตปั๊ม ($COP_{h,carnot}$) คือ

$$COP_{h,carnot} = \frac{T_L}{(T_H - T_L)} + 1 = \frac{T_H}{(T_H - T_L)}$$

2. วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอ (Vapour Compression Heat Pump Cycle)



รูปที่ 2.22 วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอ ; ที่มา Reay และ Macmichael (1987)

จากรูปที่ 2.22 หลักการทำงานของฮีตปั๊มที่ระเหยและจ่ายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งมีอุปกรณ์หลักได้แก่ คอมเพรสเซอร์, เครื่องระเหย, เครื่องควบแน่น และลิ้นการขยาย การทำงานเริ่มแรกคอมเพรสเซอร์จะดูดและอัดไอสารทำความเย็นที่ไหลออกจากเครื่องระเหยให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นเพื่อส่งไปยังเครื่องควบแน่น ไอสารทำความเย็นจะกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวที่ความดันสูงพร้อมทั้งระบายความร้อนออก จากนั้นสารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่ลิ้นการขยายเพื่อทำให้ความดันลดลงและไหลเข้าเครื่องระเหยต่อไป สารทำความเย็นจะเริ่มเดือดระเหยและดูดความร้อน จนกระทั่งกลายเป็นไอจนหมด เมื่อออกจากเครื่องระเหย และจะไหลเข้าคอมเพรสเซอร์อีกครั้ง

ทงกเกียรดิ เกียรตสิริโรจนั (2532) เนะว้าข้อพิจารณาในการนำฮีตปั๊มมาใช้งาน ควรพิจารณาช่วงอุณหภูมิในการทำงานที่เครื่องควบแน่น ปกติไม่ควรเกิน 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากขีดจำกัดของสารทำความเย็นซึ่งมักจะมีค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Point) ซึ่งไม่สูงมากนัก นอกจากนั้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยไม่ควรจะแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มโดยตรง ซึ่งจะมีค่าลดลงร้อยละ 10 ทุกๆ 5 องศาเซลเซียส ของความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าว และโดยปกติความแตกต่างของอุณหภูมิจะไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส จากหลักการของฮีตปั๊มอาจกล่าวได้ว่าความร้อนที่ทำให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอนั้น จะได้มาจากการดึงความร้อนจากบรรยากาศหรือแหล่งพลังงานเหลือทิ้งคุณภาพต่ำต่างๆ เช่น จากเครื่องควบแน่นของระบบทำความเย็น,

ท่อไอเสียต่างๆ เป็นต้น หรือแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น พลังงานดังกล่าวจะถูกนำมารวมกับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายผ่านมอเตอร์ให้กับคอมเพรสเซอร์ แล้วนำไประบายออกที่เครื่องควบแน่นเพื่อนำไปใช้งานต่อไป เช่น ใช้ทำอากาศร้อนเพื่ออบแห้งพืชผลการเกษตร, ใช้ทำน้ำร้อน และใช้ทำอากาศร้อนในบ้านเรือน เป็นต้น

หลักการพิจารณาฮีตปั๊ม เพื่อใช้ทดแทนอุปกรณ์อื่นๆ ต้องพิจารณาว่าการใช้เชื้อเพลิงหลักของฮีตปั๊มจะสิ้นเปลืองน้อยกว่าเดิมหรือไม่ เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ให้พลังงานความร้อนอื่นๆ ค่าพลังงานเชื้อเพลิงหลักที่สามารถประหยัดได้ (ΔE , %) จะบอกถึงการประหยัดพลังงาน

$$\Delta E = \left(1 - \frac{\text{PER}_{\text{hp}}}{\text{PER}_{\text{th}}}\right) \cdot 100$$

$$\text{PER}_{\text{hp}} = \frac{Q_{\text{use}}}{Q_{\text{inp, hp}}} \quad ; \quad \text{PER}_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{use}}}{Q_{\text{inp, th}}}$$

$Q_{\text{inp, hp}}$ = พลังงานเชื้อเพลิงที่ให้กับฮีตปั๊ม

$Q_{\text{inp, th}}$ = พลังงานเชื้อเพลิงที่ให้แก่อุปกรณ์ที่ให้พลังงานความร้อนอื่นๆ

Q_{use} = พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์แก่กระบวนการ

PER_{th} = อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานจากเชื้อเพลิงหลักที่ให้กับอุปกรณ์ที่ให้พลังงานความร้อนอื่นๆ

PER_{hp} = อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานจากเชื้อเพลิงหลักที่ให้กับฮีตปั๊ม

ปกติ หม้อไอน้ำ $\text{PER}_{\text{th}} = 0.75 - 0.85$ และสำหรับ PER_{hp} ของฮีตปั๊ม สามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์

$$\text{PER}_{\text{hp}} = \eta_{\text{th}} \cdot \text{COP}_h$$

η_{th} = ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนความร้อนไปเป็นพลังงานกลหรือไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า PER_{hp} จะต้องมากกว่า 1 จึงจะคุ้มค่าในการใช้ฮีตปั๊ม

การตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์วัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอ กล่าวคือ

- พิจารณาเงื่อนไขของระบบในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state)
- ไม่พิจารณาความดันตกคร่อมอุปกรณ์ต่างๆ
- พิจารณาสถานะของสารทำความเย็นเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์เป็นไออิ่มตัว
- อุณหภูมิเครื่องควบแน่น (T_c) และเครื่องระเหยที่ (T_e)
- ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์
- พิจารณาสถานะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัว
- พิจารณาไอสารทำความเย็นในสภาวะก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas)

ก๊าซอุดมคติ คือ ก๊าซประพฤติตัวไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ (The Ideal Gas Law) ในความเป็นจริงก๊าซจริง (Real Gas) ที่อุณหภูมิและความดันปกติจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซอุดมคติ แต่เมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงไปใกล้กับสภาวะวิกฤต (Critical Conditions) เป็นสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งจะส่งผลให้ก๊าซและของเหลวมีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ และฟิสิกส์เหมือนกัน และอยู่ในสมดุลเดียวกัน) ก๊าซจริงจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร อุณหภูมิ และความดันเบี่ยงเบนออกจากกฎของก๊าซอุดมคติ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำกฎของก๊าซอุดมคติและกฎของสภาวะตามกัน (Law of Corresponding States) นำมาเขียนรวมกันใหม่ คือ

$$Pv = ZRT$$

v = ปริมาตรจำเพาะของก๊าซ

P = ความดันสัมบูรณ์ของก๊าซ

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas Constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ

แฟกเตอร์สภาพการอัด (Compressibility Factor, Z) จะเป็นฟังก์ชันกับความดันและอุณหภูมิ หรืออาจกล่าวได้ว่าแฟกเตอร์สภาพการอัด เป็นแฟกเตอร์แก้สำหรับกฎของก๊าซอุดมคติให้เป็นสมการของก๊าซจริง และยังเป็นฟังก์ชันของความดัน (Reduced Pressure) และอุณหภูมิส่วนลด (Reduced Temperature) ด้วย

จากรูปที่ 2.22 พิจารณากระบวนการ 7-4 สารทำความเย็นรับความร้อนและระเหยกลายเป็นไออัมคั่ว ที่เครื่องระเหยตามกระบวนการความดันคงที่ (Isobaric Process)

$${}_7Q_4 = R.E. = h_4 - h_6$$

${}_7Q_4$ = การถ่ายเทความร้อนต่อมวลจากกระบวนการ 7 ไปยัง 4 ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

R.E. = ความสามารถในการรับความร้อน (refrigerating effect, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

h_4 = เอนทัลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

h_6 = เอนทัลปีของสารทำความเย็นออกจากเครื่องควบแน่น ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

พิจารณากระบวนการ 4-5 กระบวนการอัดไอแบบเอไดออบาติก (Adiabatic Process) หรือไอเซนโทรปิก ของไอสารทำความเย็นโดยคอมเพรสเซอร์

$${}_4w'_5 = h_5 - h_4$$

${}_4w'_5$ = งานจำเพาะของคอมเพรสเซอร์จากกระบวนการ 4 ไปยัง 5 ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

พิจารณากระบวนการ 5-6 สารทำความเย็นระเหยความร้อนและควบแน่นกลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่เครื่องควบแน่นตามกระบวนการความดันคงที่

$${}_5Q_6 = h_5 - h_6$$

$${}_5Q_6 = \text{การถ่ายเทความร้อนต่อมวลจากกระบวนการ 5 ไปยัง 6} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$h_5 = \text{เอนทัลปีของสารทำความเย็นออกจากคอมเพรสเซอร์} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

พิจารณา กระบวนการ 6-7 เป็นกระบวนการขยายตัวของสารทำความเย็นตามกระบวนการเอนทัลปีคงที่ (Constant Enthalpy) ที่ลิ้นการขยาย

$$h_6 = h_7$$

$$h_7 = \text{เอนทัลปีของสารทำความเย็นออกจากลิ้นการขยาย} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

สมดุลพลังงานของระบบตามกฎข้อที่ 1 ของหลักอุณหพลศาสตร์

$${}_7Q_4 + {}_4W'_5 = {}_5Q_6$$

สมรรถนะของวัฏจักรฮีตปั๊มบีแบบอัดไอ

$$\text{COP}_b = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_4}$$

$\text{COP}_b =$ สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรฮีตปั๊มบีแบบอัดไอ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรฮีตปั๊มบีแบบอัดไอจะพบว่ามีความสูงมาก จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการเพิ่มคุณภาพพลังงาน ต่อมาได้มีการศึกษาและนำเอาฮีตปั๊มบีไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อเพิ่มคุณภาพพลังงานที่มีอุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างเช่น การทำอากาศร้อน การทำน้ำร้อน การนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้ฆ่าเชื้อโรค ทำความสะอาดภาชนะ การอบแห้งพืชผลทางการเกษตร เป็นต้น สำหรับประเภทของฮีตปั๊มบีมักจะเป็นแบบอัดไอ ซึ่งใช้กันโดยส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามเราสามารถนำฮีตปั๊มบีแบบดูดซึม (Absorption Heat pump) มาใช้งานได้เหมือนกัน ซึ่งในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึง

3. เครื่องระเหย

สมรรถนะการทำงานของเครื่องระเหย ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่ไหลผ่านเครื่องระเหยไปยังสารทำความเย็น ความสัมพันธ์ในเทอมของหลักสมดุลพลังงานกล่าวคือ

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_r \cdot R.E. = \dot{m}_{wf} \cdot c_{pw} \cdot (T_3 - T_1)$$

$$q_e = (UA)_e (T_3 - T_4)$$

$$\dot{m}_{wf} = \text{อัตราการไหลโดยมวลของน้ำผ่านเครื่องระเหย} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$c_{pw} = \text{ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของน้ำ} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right)$$

$$q_e = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของเครื่องระเหย} \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)$$

$$\dot{Q}_e = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย} (\text{kW})$$

$$\dot{m}_r = \text{อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในระบบอัดพัมป์} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$U_{oe} = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องระเหย} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}} \right)$$

$$A_{oe} = \text{พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหย} (\text{m}^2)$$

$$T_1 = \text{อุณหภูมิของน้ำไหลออกจากเครื่องระเหย} (^\circ\text{C})$$

$$T_3 = \text{อุณหภูมิของน้ำไหลเข้าเครื่องระเหย} (^\circ\text{C})$$

4. คอมเพรสเซอร์

ความสามารถในการรับความร้อน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการอัดไอของคอมเพรสเซอร์โดยตรง ยิ่งไปกว่านั้นความสามารถในการอัดไอของคอมเพรสเซอร์แปรผันตามปริมาตรที่ถูกสูบแทนที่ (Piston Displacement, P.D., $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$) ด้วย อาจกล่าวได้ว่าปริมาตรที่ถูกสูบแทนที่ เป็นปริมาตรโดยทฤษฎี ซึ่งพิจารณาประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency, η_{VC}) ที่ร้อยละ 100 ของไอสารทำความเย็นที่คอมเพรสเซอร์ดูดได้ต่อหน่วยเวลา กล่าวคือ

$$\text{P.D.} = \pi \frac{\text{bore}^2}{4} (\text{stroke}) (\text{No. of cylinder}) (N)$$

bore = ขนาดกระบอกสูบ (m) ; stroke = ระยะชัก (m)

No. of cylinders = จำนวนกระบอกสูบ

N = ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ (รอบต่อวินาที, RPS)

$$P_4 v_4^i = P_5 v_5^i$$

$$v_4 = \text{ปริมาตรจำเพาะของไอสารทำความเย็นก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$v_5 = \text{ปริมาตรจำเพาะของไอสารทำความเย็นออกจากคอมเพรสเซอร์} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$P_4 = \text{ความดันสมบูรณ์ของสารทำความเย็นไหลเข้าคอมเพรสเซอร์} (\text{Pa})$$

$$P_5 = \text{ความดันสมบูรณ์ของสารทำความเย็นไหลออกจากคอมเพรสเซอร์} (\text{Pa})$$

$$c_p = \text{ความร้อนจำเพาะของไอสารทำความเย็นที่ความดันคงที่} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right)$$

$$c_v = \text{ความร้อนจำเพาะของไอสารทำความเย็นที่ปริมาตรคงที่} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right)$$

i = ครรชนิการอัดไอ

p = ครรชนิโพลีโทรปิก (Polytropic Index)

k = ครรชนิเอดิอาแบติกหรือไอเซนโทรปิก (Adiabatic or Isentropic Index)

เมื่อพิจารณากระบวนการอัดไอสารทำความเย็นในของคอมเพรสเซอร์ จะสามารถพิจารณารูปแบบของกระบวนการอัดไอได้ 3 รูปแบบ กล่าวคือ

$i = 1$ กระบวนการอัดไอแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Process) อุณหภูมิของไอสารทำความเย็นที่ออกจากคอมเพรสเซอร์จะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการอัดไอออกไปจนหมดสมบูรณ์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ แต่เป็นไปได้ในเชิงทฤษฎี

$1 < i = p < k$ กระบวนการอัดไอแบบโพลีโทรปิก (Polytropic Process) อุณหภูมิหลังการอัดไอสูงกว่าก่อนอัด โดยมีการถ่ายความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมบางส่วน และเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสารทำความเย็นในวัฏภาคไอ โดยคำนวณได้จากการทดลอง

$k = \frac{c_p}{c_v}$ กระบวนการอัดแบบเอดิอาแบติกหรือไอเซนโทรปิก เป็นการอัดไอแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการอัดไปไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยจะทำให้อุณหภูมิลักษณะการอัดไอเพิ่มขึ้นสูงที่สุด ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ แต่เป็นไปได้ในเชิงทฤษฎี

ในทางปฏิบัติกระบวนการอัดไอของคอมเพรสเซอร์ จะเป็นแบบโพลีโทรปิกเสมอ เนื่องจากการอัดไอแบบอุณหภูมิคงที่และแบบเอดิอาแบติก ไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ และครรชนิดังกล่าวคำนวณได้จากการทดลอง จากที่กล่าวไปแล้วในเบื้องต้นว่าความสามารถในการอัดไอสารทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์ ขึ้นอยู่กับปริมาตรที่ลูกสูบแทนที่ซึ่งเป็นค่าในเชิงอุดมคติ ในความเป็นจริงปริมาตรไอสารทำความเย็นที่ถูกดูดเข้าไปในคอมเพรสเซอร์จะน้อยกว่าปริมาตรที่ลูกสูบแทนที่เสมอด้วยปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น ช่องว่างหัวสูบ (Clearance Volume), การขยายตัวของไอสารทำความเย็น (เกิดขึ้นจากผลของการสูญเสียความดันเมื่อไอสารทำความเย็นไหลผ่านลิ้นด้านดูด และรับความร้อนจากผนังกระบอกสูบ โดยส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น), อัตราส่วนการอัดและความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ เป็นต้น ตัวแปรบอกถึงปริมาตรไอสารทำความเย็นที่ถูกดูดเข้าไปได้จริงต่อปริมาตรที่ลูกสูบแทนที่เรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร โดยมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ คือ

$$C = \frac{V_d}{V_b - V_d} ; \quad \eta_v = \left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \frac{v_4}{v_b}$$

$$\dot{m}_r = \left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \frac{P.D.}{v_b} ; \quad w' = h_5 - h_4 = \frac{p \cdot P_b \cdot v_b \cdot \left[\left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{p-1}{p}} - 1 \right]}{p-1}$$

$$WC = \dot{m}_r w'$$

C = ร้อยละช่องว่างหัวสูบของคอมเพรสเซอร์ (Percent Clearance, %)

$P_c = P_5 + \Delta P_{ex}$ = ความดันของสารทำความเย็นที่ทางเข้าของคอมเพรสเซอร์ (Pa)

$P_b = P_4 - \Delta P_{in}$ = ความดันของสารทำความเย็นที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ (Pa)

ΔP_{ex} = ความดันของสารทำความเย็นสูญเสียที่ลิ้นด้านดูด (Pa)

ΔP_{in} = ความดันของสารทำความเย็นสูญเสียที่ลิ้นด้านจ่าย (Pa)

v_b = ปริมาตรจำเพาะการขยายตัวของไอสารทำความเย็นหลังไหลผ่านลิ้นด้านดูด ($\frac{m^3}{kg}$)

V_b = ปริมาตรกระบอกสูบ (m^3)

V_d = ปริมาตรช่วงชักลูกสูบ (swept volume, m^3)

WC = กำลังของคอมเพรสเซอร์ (kW)

5. เครื่องควบแน่น

สมรรถนะการทำงานของเครื่องควบแน่น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของไอสารทำความเย็นให้กับของไหลที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่น จากหลักสมดุลพลังงานกล่าวได้ว่า

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{wc} \cdot c_{pw} \cdot (T_9 - T_8) \quad ; \quad \dot{Q}_c = \dot{Q}_e + WC$$

$$q_c = (UA)_c (LMTD)_c \quad ; \quad (LMTD)_c = \frac{(T_5 - T_9) - (T_5 - T_8)}{\ln\left(\frac{T_5 - T_9}{T_5 - T_8}\right)}$$

\dot{m}_{wc} = อัตราการไหลโดยมวลของน้ำที่เครื่องควบแน่น ($\frac{kg}{s}$)

q_c = อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของเครื่องควบแน่น ($\frac{kW}{m^2}$)

\dot{Q}_c = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kW)

U_{oc} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องควบแน่น ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

A_{oc} = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องควบแน่น (m^2)

$(LMTD)_c$ = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิทึมที่เครื่องควบแน่น ($^{\circ}C$)

T_9 = อุณหภูมิของน้ำไหลออกจากอุปกรณ์ควบแน่น ($^{\circ}C$)

T_8 = อุณหภูมิของน้ำไหลเข้าอุปกรณ์ควบแน่น ($^{\circ}C$)

6. ลิ้นการขยาย

สารทำความเย็นในวิญภาคของเหลวความดันสูงที่ออกจากเครื่องควบแน่นจะถูกควบคุมความดันและปริมาณการไหลให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของเครื่องระเหยโดยลิ้นการขยายซึ่งมีอยู่หลายประเภท

เช่น ลิ้นการขยายอัตโนมัติเทอร์โมสแตต (Thermostatic Automatic Expansion Valve), ลิ้นการขยายปรับด้วยมือ (Hand Expansion Valve), ลิ้นการขยายความดันคงที่ (Constant Pressure Expansion Valve), ท่อแคปิลารี (Capillary Tube)

7. สารทำความเย็น

สารทำความเย็นมีบทบาทต่อสัมประสิทธิ์การทำงานของฮีตปั๊มเป็นอย่างมาก คุณสมบัติของสารทำความเย็นจะเป็นปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาการนำฮีตปั๊มมาใช้งาน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่เหมาะสมควรมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- จุดเดือดของสารทำความเย็นที่ความดันบรรยากาศ จะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิที่เครื่องระเหย โดยจะทำให้ความดันไอของสารทำงานสูงกว่าบรรยากาศเป็นการป้องกันมิให้เกิดการรั่วเข้าไปในระบบ
- อุณหภูมิวิกฤต ของสารทำความเย็นควรสูงกว่า อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น และอุณหภูมิที่จุดสามเชิง (Triple Point) ควรต่ำกว่าอุณหภูมิที่เครื่องระเหย

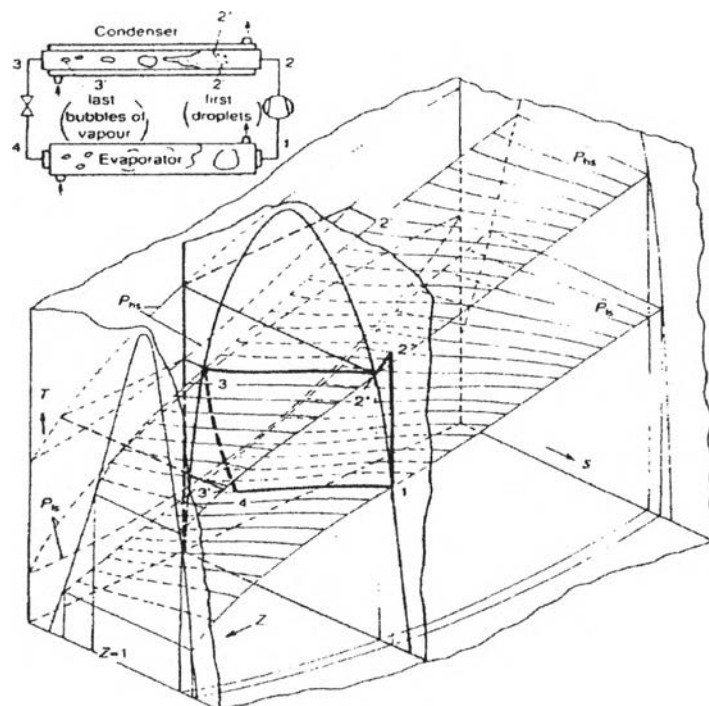
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของสารทำความเย็นบางประเภท (Brodowicz และ Dyakowski ; 1993)

ชนิดของสารทำความเย็น	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล	จุดเดือด, องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติ	อุณหภูมิวิกฤต, องศาเซลเซียส	ความร้อนแฝงในการระเหย, kJ/kg
R11	CCl ₃ F	137.4	23.8	198.0	182.0
R12	CCl ₂ F ₂	120.9	- 29.8	112.0	165.1
R22	CHClF ₂	86.5	- 40.8	96.0	234.0
R113	CCl ₂ FCClF ₂	187.4	47.6	214.0	146.7
R114	CClF ₂ CClF ₃	170.9	3.6	145.7	137.2
R500	(R12+R152a)	99.3	- 33.5	105.0	205.8
R502	(R22+R115)	111.6	- 45.4	82.2	172.5
R718	H ₂ O	18	100	374.2	2257

- ค่าความร้อนแฝงในการระเหยของสารทำความเย็นควรมีค่าสูง และค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ควรมีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้ค่าสมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถดึงพลังงานความร้อนได้มากขึ้นและสารทำความเย็นไม่เป็นตัวสะสมความร้อน
- ปริมาตรจำเพาะ ของไอสารทำความเย็นก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ควรมีค่าน้อย เพื่อลดขนาดของคอมเพรสเซอร์
- สารทำความเย็นจะต้องมีความคงสภาพ ไม่กัดกร่อน ไม่ทำลายมลภาวะ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และควรหาง่ายราคาถูก

ปัจจุบันปัญหาเรื่องการทำลายชั้นบรรยากาศของโลกโดยสารทำความเย็นที่ใช้ในวัฏจักรฮีตปั๊มแบบอัดไอ เป็นปัญหาที่สำคัญต่อสถานะแวดล้อมของโลก ซึ่งส่งผลต่อมนุษยชาติโดยตรง จึงได้มีการพยายามคิด

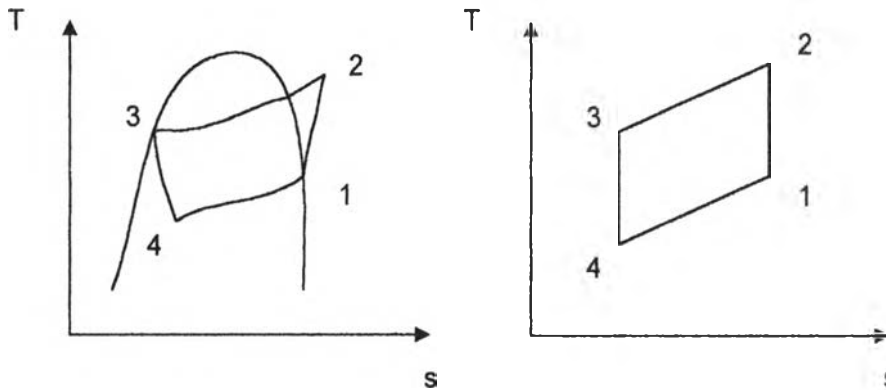
ค้นสารทำงานชนิดใหม่ เพื่อใช้ทดแทนสารทำความเย็นเดี่ยวที่เป็นสาร CFC เช่น ฟรีออน-12 (R12, CCl_2F_2) เป็นต้น ซึ่งมีค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) และค่าศักยภาพในการทำให้ อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น (Global Warming Potential, GWP) สูง วิธีการแก้ไขสามารถทำได้โดยนำสารทำความ เย็นเดี่ยวหลายชนิดมาผสมกันเพื่อใช้ทดแทน เรียกว่า สารทำความเย็นอาซีโอโทรปิก (Azeotrope Refrigerant Mixture, ARM) และสารทำความเย็นใกล้เคียงอาซีโอโทรปิก (Near-Azeotrope Refrigerant Mixture, Near ARM) ความแตกต่างระหว่างสารทำความเย็น ARM และ Near ARM กล่าวคือ สารทำความเย็น ARM จะมีพฤติกรรม เช่นเดียวกับสารทำความเย็นเดี่ยว ซึ่งจะมีสัดส่วนผสมแน่นอนในขณะระเหยและควบแน่นที่อุณหภูมิคงที่ ยก ตัวอย่างเช่น R500 เป็นของผสมระหว่าง R12 73.8 %, R152a ($\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$) 26.2 % ตามลำดับ แต่สำหรับสารทำความ เย็น Near ARM จะมีพฤติกรรมแตกต่างกันตรงที่สัดส่วนผสมไม่คงที่ในขณะระเหยและควบแน่น โดยจะส่งผลให้ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนผสมไปด้วย ซึ่งเรียกว่า การเลื่อนของอุณหภูมิ (Temperature Glide) จึงทำให้ อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยแตกต่างกันน้อยลง สมรรถนะการทำงานของระบบจึงสูงขึ้น Troxel (1989) ได้พัฒนาวัฏจักรลอเรนซ์ (Lorenz cycle) เพื่อนำมาใช้กับสารทำความเย็น Near ARM ซึ่งแสดงให้เห็นถึง การเลื่อนของอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็น ARM ซึ่งมีค่าการเลื่อนของอุณหภูมิเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.23 วัฏจักรแบบอัดไอที่ใช้สารทำความเย็น ARM ในแนวแกน T-s ($z=1$); ที่มา Brodowicz และ Dyakowski (1993)

Copeland (1989) พบว่าปัญหาการนำสารทำความเย็น Near ARM มาใช้งาน ก็คือการรั่วของระบบขณะ ควบแน่นหรือระเหย ซึ่งมีทั้งวัฏภาคไอและของเหลว โดยจะทำให้เกิดการแยกลำดับส่วนชั้น (Fractionation) ผลที่ ตามมาก็คือสัดส่วนผสมจะเปลี่ยนไป จึงส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ ยกตัวอย่างเช่น ไอสารทำความ เย็นที่รั่วจากเครื่องควบแน่นจะมีสัดส่วนของสารเคมีที่มีความดันไอสูงออกมาก่อน ผลกระทบก็คือ จะทำให้สัดส่วน

ส่วนของสารทำความเย็นผสมที่เหลืออยู่ในระบบเปลี่ยนแปลงไป แม้ว่าเดิมสารทำความเย็นผสมเข้าไปใหม่ก็ตาม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ เป็นต้น แต่การรั่วในกรณีสารทำความเย็น Near ARM ที่มีสถานะเป็นไอหรือของเหลวเพียงอย่างเดียว สัดส่วนผสมจะเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เช่นเดียวกับการรั่วจากทุกระบบของสารทำความเย็นเดี่ยวและสารทำความเย็น ARM ก็จะไม่เกิดเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติใดๆ



รูปที่ 2.24 วัฏจักรลอเรนซ์ ที่ใช้สารทำความเย็น Near ARM ; ที่มา Brodowicz และ Dyakowski (1993)

สาร Near ARM เป็นสารทำความเย็นที่ถูกพัฒนาขึ้นมาแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะมีค่าศักยภาพในการทำลายโอโซนและค่าศักยภาพในการทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นต่ำ เมื่อเทียบกับสาร CFC บริษัท ดูปองเคมิกคอล จำกัด (1989) ได้ศึกษาและแนะนำให้สารทำความเย็นผสม 3 ชนิด ประกอบไปด้วย R22, R152a และ R114 ในสัดส่วนร้อยละโดยมวล 30, 23, 47 ตามลำดับ เพื่อใช้ทดแทน R12 แต่การนำ R114 มาผสมทำให้ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซนยังสูงอยู่บ้าง โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า KCD9430 ซึ่งมีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ใกล้เคียงกับ R12 มาก โดยมีคุณสมบัติในด้านต่างๆ ดังนี้

- สามารถใช้กับน้ำมันหล่อลื่น วัสดุ และอุปกรณ์ ของระบบทำความเย็นที่ใช้กับ R12 ได้
- ความสามารถในการทำงานใกล้เคียงกับระบบทำความเย็นที่ใช้ R12
- ค่าความเป็นพิษ (Toxicity, TEV) และค่าศักยภาพในการทำลายโอโซนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ R12
- ค่าศักยภาพในการทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ R12
- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบมีแนวโน้มสูงกว่าในกรณีที่ใช้ R12

ปี ค.ศ. 1994 บริษัท ดูปองเคมิกคอล จำกัด จึงได้ผลิตสารทำความเย็นชนิดใหม่ ซึ่งใช้แทนฟรอน-12 โดยใช้ชื่อการค้าว่า Suva MP 39 มีสัดส่วนผสม R22/R152a/R124 ในสัดส่วนร้อยละโดยมวล 53/13/34 ตามลำดับ และ Suva MP 52 มีสัดส่วนผสม R22/R152a/R124 ในสัดส่วนร้อยละโดยมวล 33/15/52 ตามลำดับ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้สารทำความเย็นทดแทน R12 เพื่อรักษาภาวะแวดล้อมของโลก รวมทั้งยังส่งผลให้สมรรถนะของระบบสูงขึ้นอีกด้วย

ปี ค.ศ. 1995 บริษัท ดูปองเคมิกคอล จำกัด ได้ผลิตสารทำความเย็นชนิดใหม่ ซึ่งใช้แทนสารทำความเย็น R12 และ R500 โดยใช้ชื่อการค้าว่า Suva MP39 และ Suva MP66 ซึ่งมีสัดส่วนผสม ของสารทำความเย็น R22, R152a และ R124 โดยที่ Suva MP39 สามารถใช้ทดแทน R12 ในระบบทำความเย็นอุณหภูมิปานกลาง ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิเครื่องระเหยมีค่าประมาณ -23 องศาเซลเซียส สำหรับ Suva MP66 ใช้ทดแทน R12 ใน

ระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิเครื่องระเหยมีค่าต่ำกว่า -23 องศาเซลเซียสได้ นอกจากนี้ Suva MP66 สามารถใช้ทดแทน R500 ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2.9 สมบัติเปรียบเทียบของสารทำความเย็นทดแทนบางประเภท (เทียบ ; 2539)

	CFC12	HFC 134a	KCD 9430*	KCD 9433**
Boiling Point (°F)	-21.6	-15.7	-20	-20
Flammability	None	None	None	None
Toxicity (TLV), ppm	1,000	1,000 ¹	1,000 ¹	800 ¹
Coefficient of performance ²	2.27	2.22	2.28	2.30
Ozone Depletion Potential ³ (ODP)	1.0	0.0	0.42	0.03
Global Warming Potential ⁴	3.0	0.3	1.61	0.16
Estimated Commercial Cost ⁵	N/A	3-5 x	2-4 x	2-4 x

¹ Acceptable Exposure Limit Assigned by DUPONT (TLV not yet established)

² -10 °F evaporator/ 130 °F Condenser/ 100 °F superheat

³ calculated; compared to CFC12 = 1.0

⁴ calculated; compared to CFC11 = 1.0

⁵ Compared to historical cost. Of CFC-12

* 30/23/47 Weight percent blend

** 50/20/30 Weight percent blend

ตารางที่ 2.10 สมบัติเปรียบเทียบของสารทำความเย็น Suva MP39 และ Suva MP66 (Dupont ; 1995)

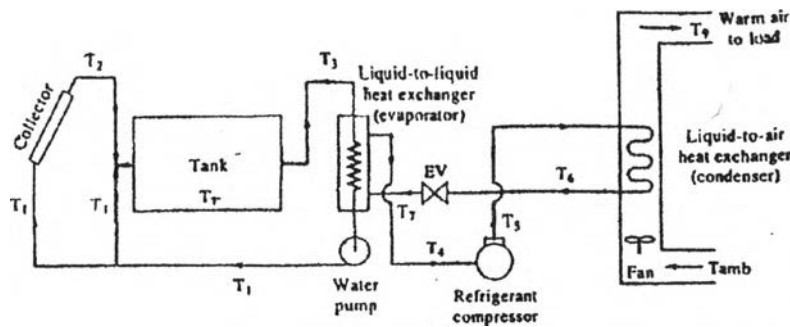
	R-12	MP39	MP66	R-500
Boiling Point 1 atm, °F (°C)	-22 (-30)	-27 (-33)	-30 (-35)	-28 (-34)
Density Sat. Liquid at 25 °C, kg/m ³	1311	1194	1193	1156
Density Sat. Vapor at 25 °C, kg/m ³	37.2	29.0	30.7	36.8
Ozone Depletion Potential versus R-12	1.0	0.03	0.035	0.70
Halocarbon Global Warming Potential versus R-11 (R-11 = 1)	3.0	0.22	0.24	2.0
Capacity versus R-12* (R-12 = 100)	100	108	116	-
MP66 versus R-500** (R-500 = 100)	-	-	100	100
Efficiency versus R-12* (R-12 = 100)	100	101	101	-
MP66 versus R-500** (R-500 = 100)	-	-	100	100

* conditions : -23.3 °C Evaporator/ 54.4 °C Condenser/ Superheat to 32.2 °C /Subcool to 32.2 °C

** conditions : 1.7 °C Evaporator/ 54.4 °C Condenser/ Superheat to 26.7 °C /Subcool to 51.6

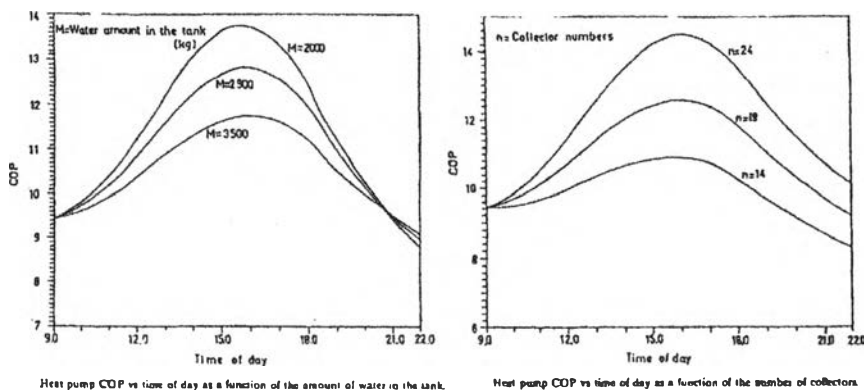
การทำความร้อนด้วยฮีตปั๊ม โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวิถุภาค

จากการศึกษาของ Çomakli, Bayramoglu และ Kaygusuz (1996) พบว่าร้อยละ 42 ของการบริโภคพลังงานในประเทศตุรกีเป็นการใช้ไปในช่วงอุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ในการทำน้ำร้อนและอากาศร้อน ในการวิจัยจะใช้ระบบการทำอากาศร้อนด้วยฮีตปั๊ม โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวิถุภาค ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐาน เช่น ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ถึงสะสมความร้อน คอมเพรสเซอร์ เครื่องควบแน่น ถังการขยาย เครื่องระเหย เป็นต้น โดยศึกษาจากการทดลอง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองการทำงาน (Simulation) แสดงรายละเอียดของชุดทดลองตามรูปที่ 2.25 สำหรับถึงสะสมความร้อนเป็นการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวิถุภาค โดยใช้สารเปลี่ยนวิถุภาคเป็นเกลือไฮเดรต มีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Calcium Chloride Hexahydrate) มีสูตรทางเคมีคือ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ มีจุดหลอมเหลวที่ 29 องศาเซลเซียส ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนวิถุภาคมีค่าเท่ากับ $170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ และฮีตปั๊มที่ใช้ฟรอน-22 เป็นสารทำความเย็น



Schematic representation of the system.

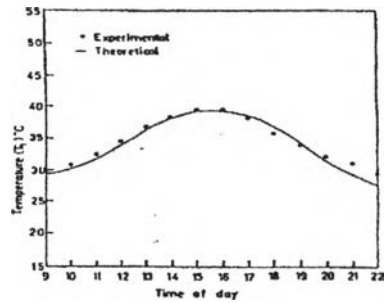
รูปที่ 2.25 ชุดอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัย ; ที่มา Çomakli, Bayramoglu และ Kaygusuz (1996)



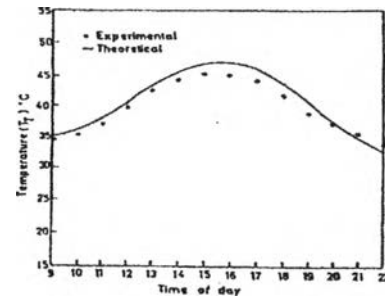
รูปที่ 2.26 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มแปรผันตามเวลา และเป็นฟังก์ชันกับจำนวนจำนวนตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ และเป็นฟังก์ชันกับปริมาณน้ำในถังสะสมความร้อน ; ที่มา Çomakli, Bayramoglu และ Kaygusuz (1996)

การทดลองจะทดลองในช่วงเวลา 9.00 – 22.00 นาฬิกา ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนกรกฎาคม ปี 1990 สรุปผลดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

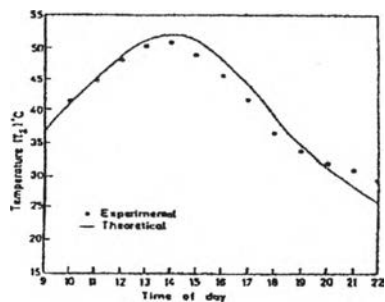
ก. เมื่อเพิ่มจำนวนตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบจาก 19 ไปเป็น 24 แผง สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม (COP_h) จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 ในขณะที่ต้นทุนของการลงทุนเพิ่มขึ้นร้อยละ 71



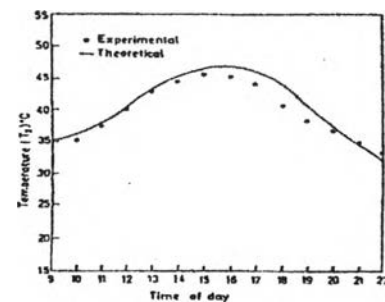
Experimental and simulated temperature (T_1) vs time of day.



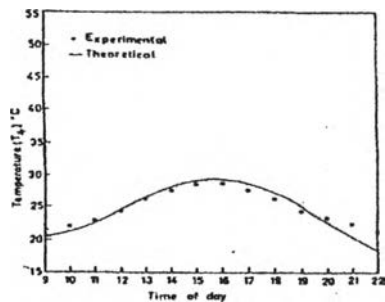
Experimental and simulated temperature (T_2) vs time of day.



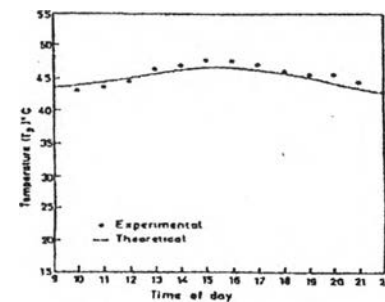
Experimental and simulated temperature (T_3) vs time of day.



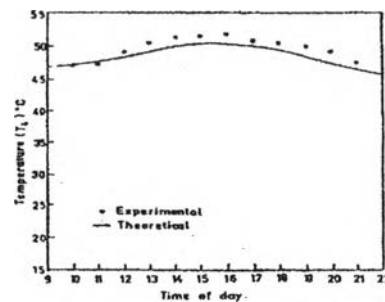
Experimental and simulated temperature (T_4) vs time of day.



Experimental and simulated temperature (T_5) vs time of day.



Experimental and simulated temperature (T_6) vs time of day.

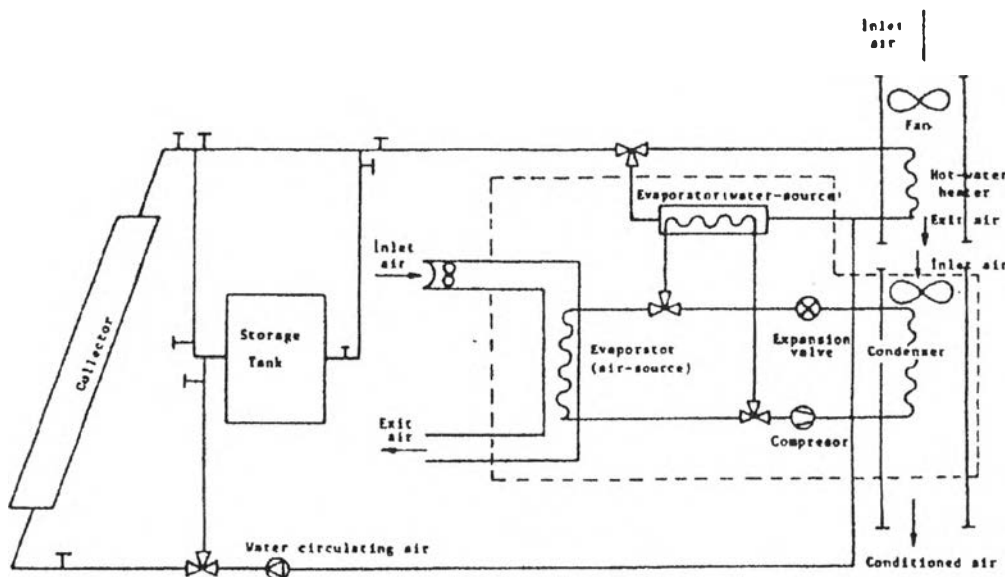


Experimental and simulated temperature (T_7) vs time of day.

รูปที่ 2.27 ผลการทดลองและการจำลองการทำงานของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ แปรผันตามเวลา ; ทิมา Çomakli, Bayramoglu และ Kaygusuz (1996)

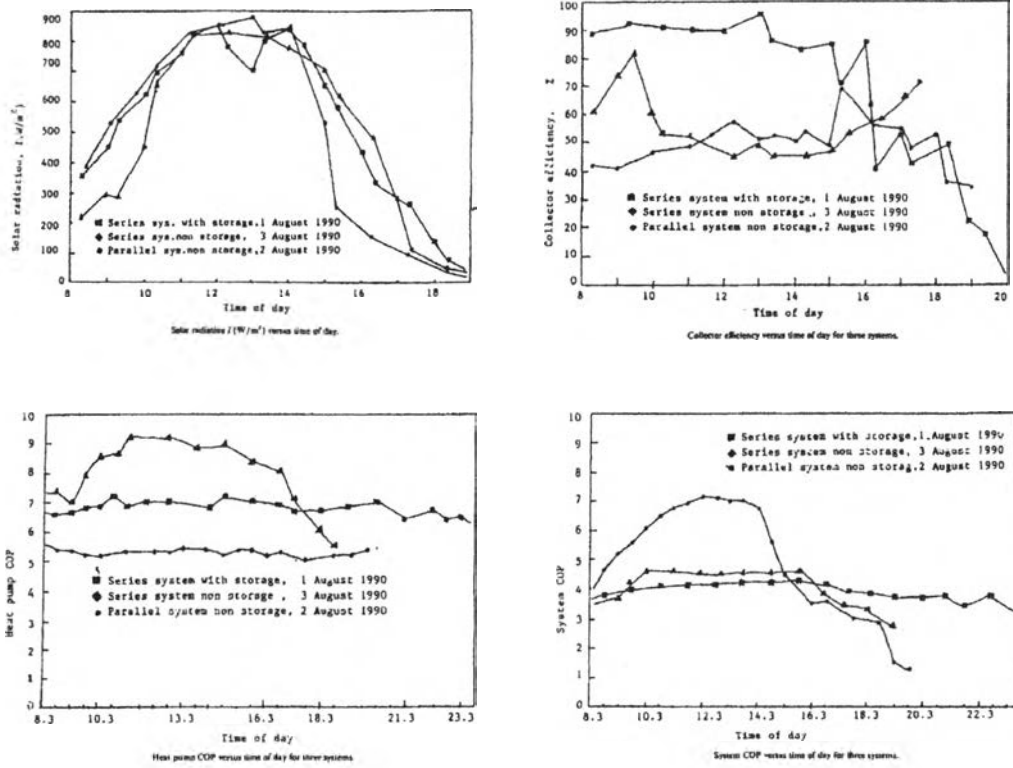
ข. ปริมาณน้ำในถังสะสมความร้อน (M) ถ้ามีค่าลดลง สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและสารเปลี่ยนวัฏภาคลดลงทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังเครื่องระเหยได้มากขึ้น

Kaygusuz, Çomakli และ Ayhan (1991) ได้ทำการศึกษาการทำอากาศร้อนด้วยฮีตปั๊ม โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค สำหรับสารเปลี่ยนวัฏภาคมีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จึงมีการสร้างชุดทดลองขึ้น 5 ระบบ ระบบที่ 1 เป็นการต่อตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบกับฮีตปั๊มเป็นแบบอนุกรมแบบมีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค ระบบที่ 2 เป็นการต่อแบบขนานแบบไม่มีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค ระบบที่ 3 เป็นการต่อแบบอนุกรมแบบไม่มีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค ระบบที่ 4 เป็นระบบคู่ (dual system) ต่อแบบอนุกรมแบบไม่มีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค และระบบที่ 5 เป็นระบบคู่ต่อแบบอนุกรมแบบมีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค ระบบคู่จะหมายถึงที่เครื่องระเหยจะมีการรับความร้อนจากตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบโดยตรง และความร้อนจากอากาศโดยพัดลม โดยทดลองในช่วงเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม ค.ศ.1990 ผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปประเมินหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (η_c), สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม (COP) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบ (COP_{sys}) ต่อไป ในการทดลองในครั้งนี้จะไม่พิจารณาแบบคู่ จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ เป็นฟังก์ชันของเวลาในแต่ละวันและมีค่าสูงสุด ณ เวลาเที่ยงสุริยะ ทั้ง 3 ระบบ มีค่าอยู่ในช่วง ร้อยละ 50-90 และประสิทธิภาพในการสะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 สำหรับสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม มีค่าอยู่ในช่วง 5-7 และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 3.5-5

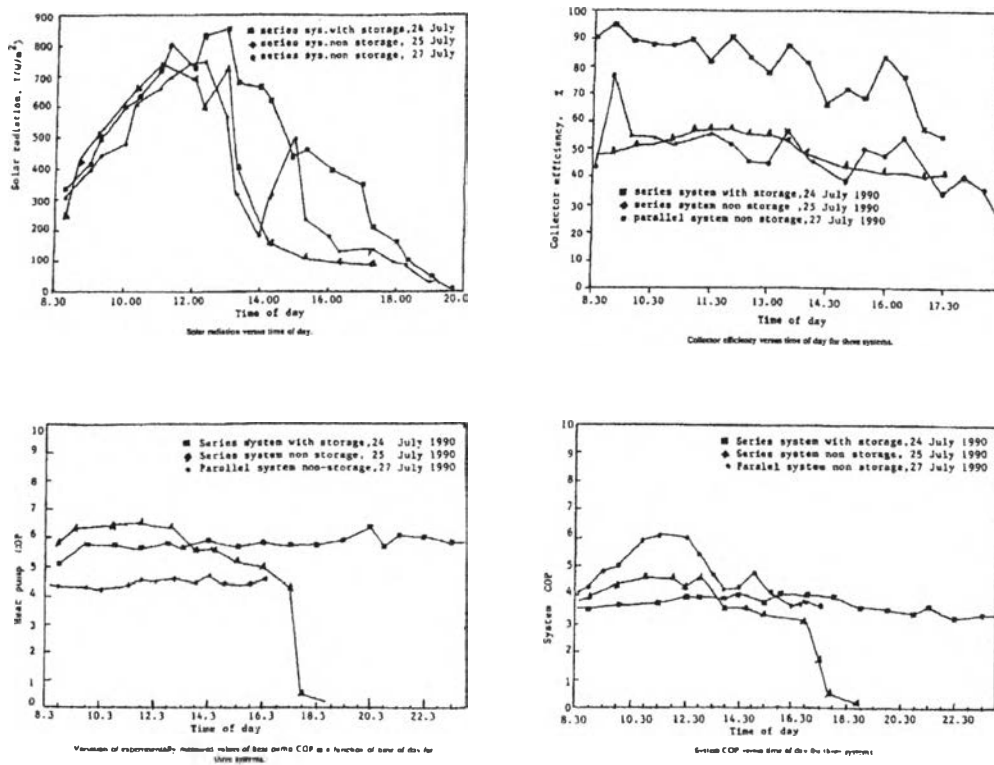


Schematic diagram of the dual source (parallel series) solar heat pump system.

รูปที่ 2.28 ชุดอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัย ; ที่มา Kaygusuz, Çomakli และ Ayhan (1991)



รูปที่ 2.29 แสดงค่าการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง (I), η_c , COP, COP_{sys} ที่แปรตามเวลาในเดือนสิงหาคม ค.ศ.1990 ; ที่มา Kaygusuz, Çomakli และ Ayhan (1991)



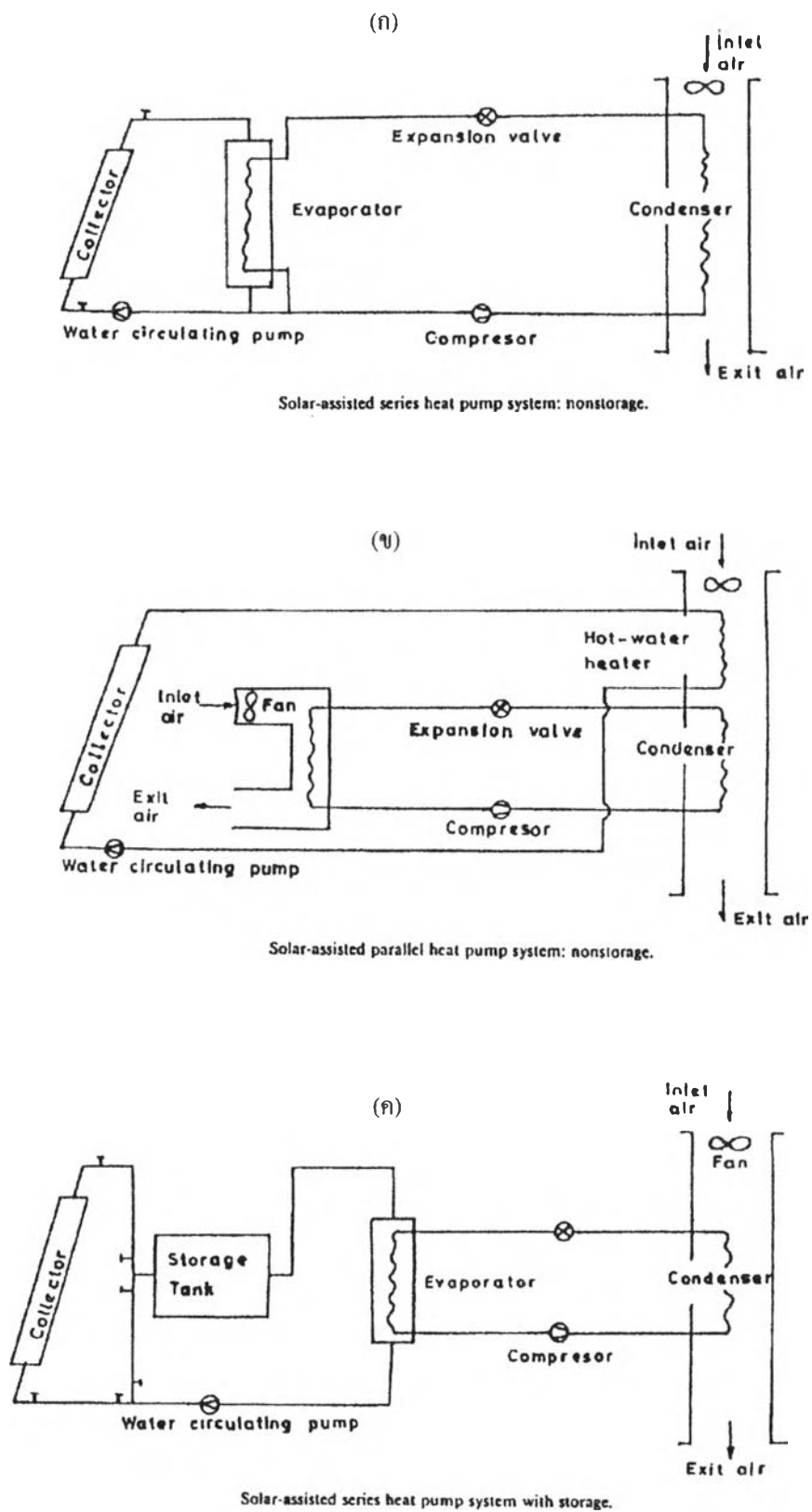
รูปที่ 2.30 แสดงค่าการแผ่รังสีรวมบนพื้นราบที่ผิวโลกรายชั่วโมง (I), η_c , COP, COP_{svb} ที่แปรตามเวลาในเดือนกันยายน ค.ศ.1990 ; ที่มา Kaygusuz, Çomakli และ Ayhan (1991)

Çomakli, Kaygusuz, Ayhan และ Arslan (1993) ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงการทำอากาศร้อนด้วยฮีตปั๊ม โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวิภาค ทั้งการทดลองและการจำลองการทำงาน สำหรับสารเปลี่ยนวิภาคมีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จึงมีการสร้างชุดทดลองขึ้น 3 ระบบ ระบบที่ 1 เป็นการต่อตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบกับฮีตปั๊มเป็นแบบอนุกรม แบบมีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวิภาค ระบบที่ 2 เป็นการต่อแบบขนานแบบไม่มีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวิภาค ระบบที่ 3 เป็นการต่อแบบอนุกรมแบบไม่มีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวิภาค โดยทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบกัน ในช่วงเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน ตุลาคม พฤศจิกายน ธันวาคม ปี 1990 ผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ, สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบต่อไป จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า

ก. ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ เป็นฟังก์ชันของเวลาในแต่ละวันและมีค่าสูงสุด ณ เวลาเที่ยงสุริยะ ทั้ง 3 ระบบ ระบบที่ 1 จะมีประสิทธิภาพประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบสูงสุด และมีค่าอยู่ราวร้อยละ 80 และอีก 2 ระบบ มีค่าอยู่ราวร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบมีค่าน้อยกว่าระบบอื่น ๆ

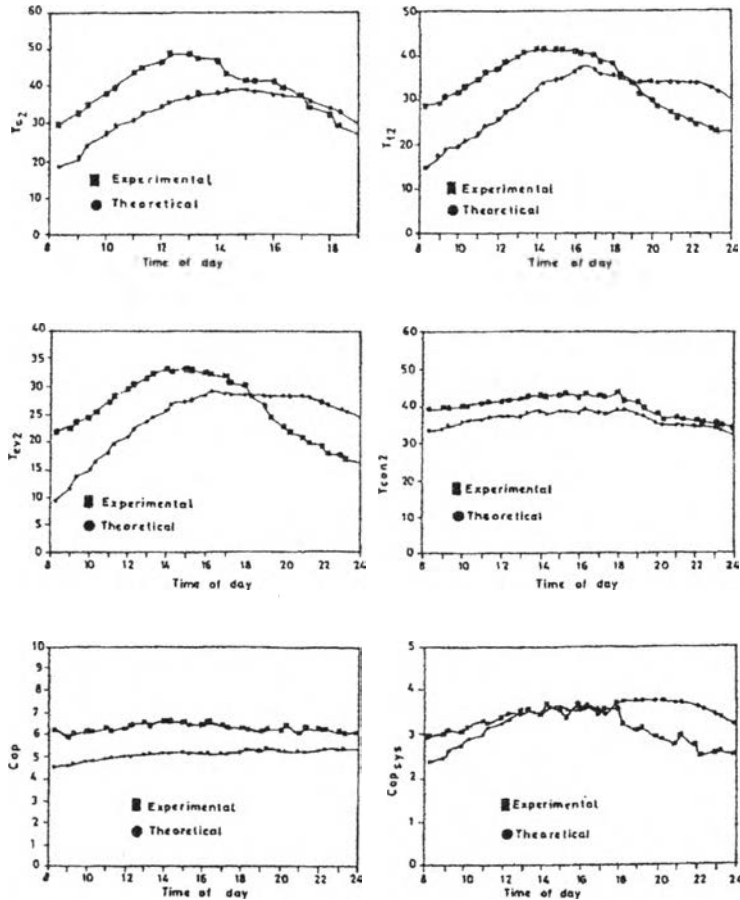
ข. สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม เป็นฟังก์ชันของเวลาในแต่ละวันและมีค่าสูงสุด ณ เวลาเที่ยงสุริยะ ทั้ง 3 ระบบ ระบบที่ 3 จะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามจะพบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มของระบบที่ 1 จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าระบบอื่น ๆ

ค. สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบ เป็นฟังก์ชันของเวลาในแต่ละวันทั้ง 3 ระบบ ระบบที่ 2 จะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามจะพบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบที่ 1 จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าระบบอื่น ๆ



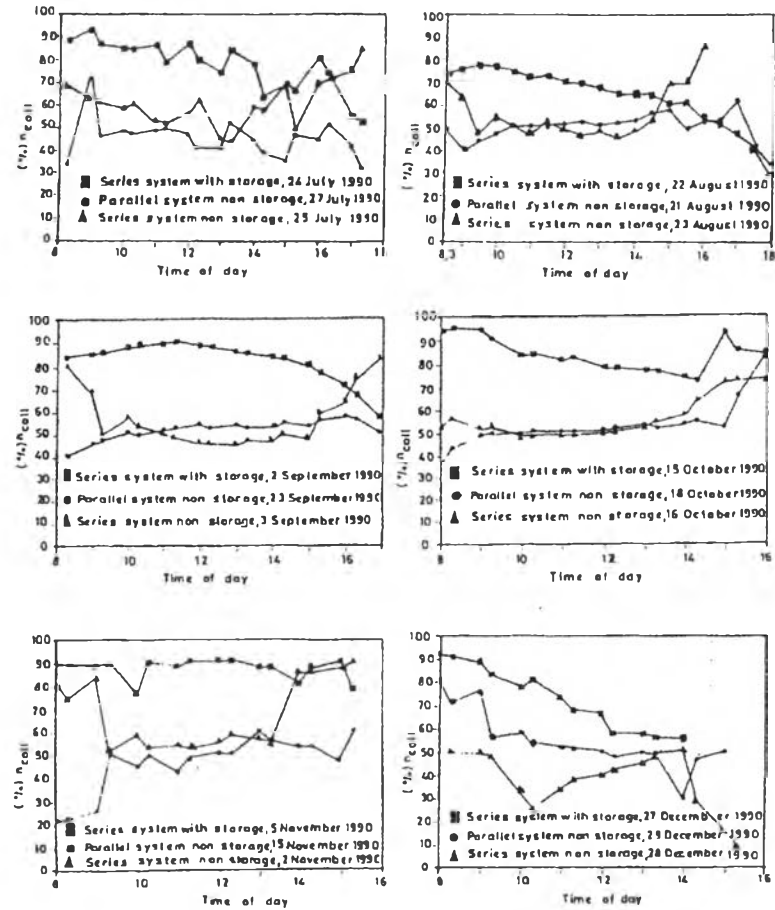
รูปที่ 2.31 ชุดอุปกรณ์ของระบบทั้ง 3 ระบบ (ก) แสดงระบบที่ 3, (ข) แสดงระบบที่ 2 และ (ค) แสดงระบบที่ 1 ; ที่มา Çomakli, Kaygusuz, Ayhan และ Arslan (1993)

(ก)



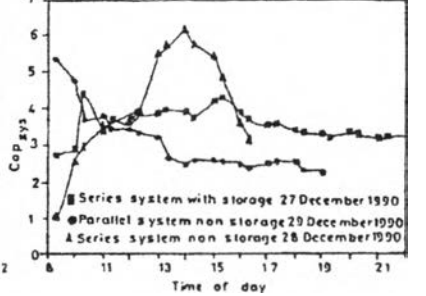
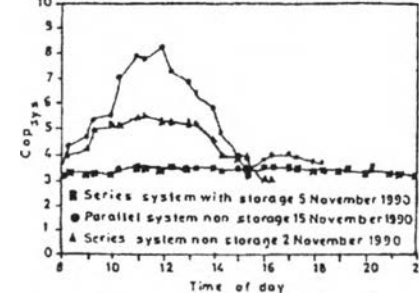
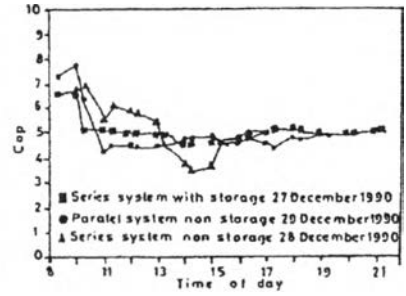
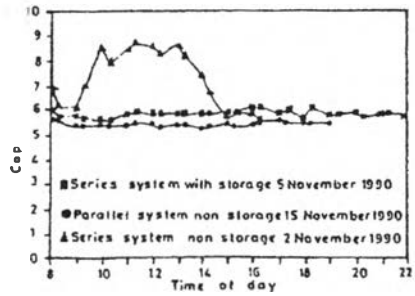
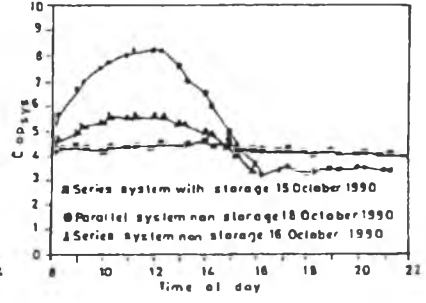
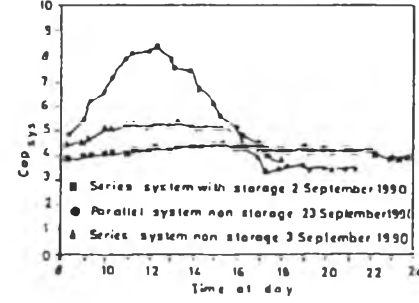
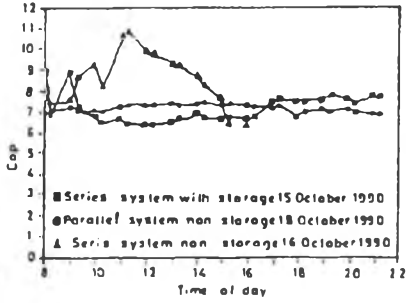
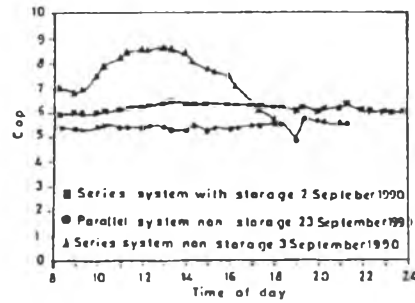
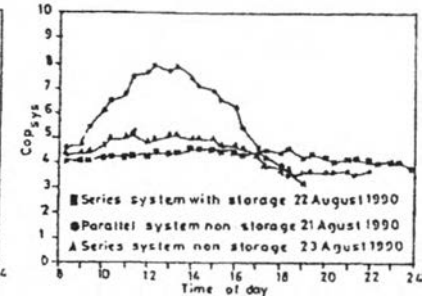
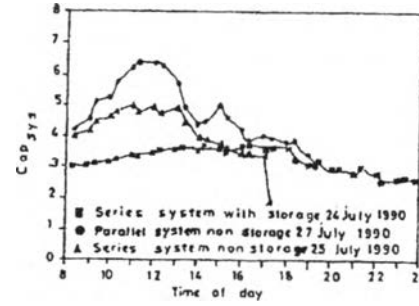
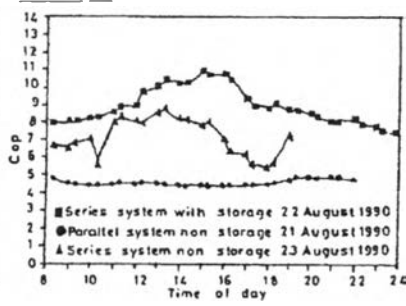
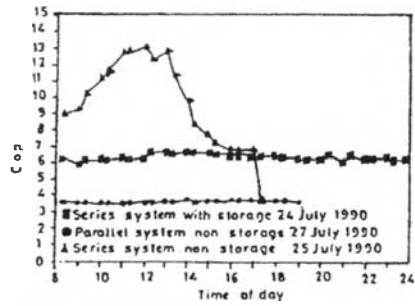
Comparison of the experimental and dynamic simulation results

(ข)



Instantaneous collector efficiency vs. time of day for three systems

รูปที่ 2.32 (ก) แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองการทำงานที่แปรผันตามเวลา (ข) แสดงถึง η_c ของระบบทั้ง 3 ระบบที่แปรผันตามเวลา ; ที่มา Çomakli, Kaygusuz, Ayhan และ Arslan (1993)

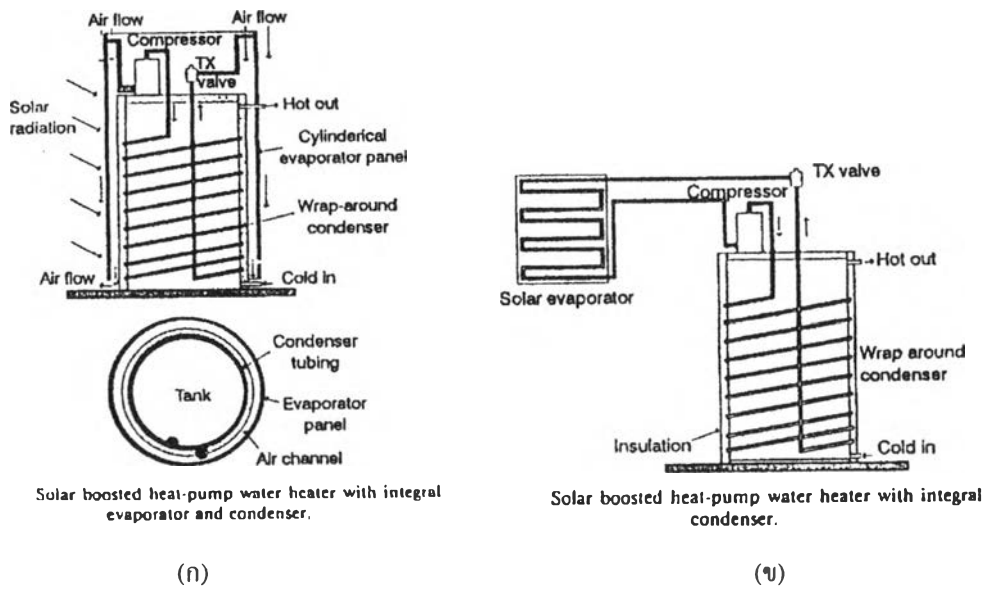


Heat pump COP vs. time of day for three systems.

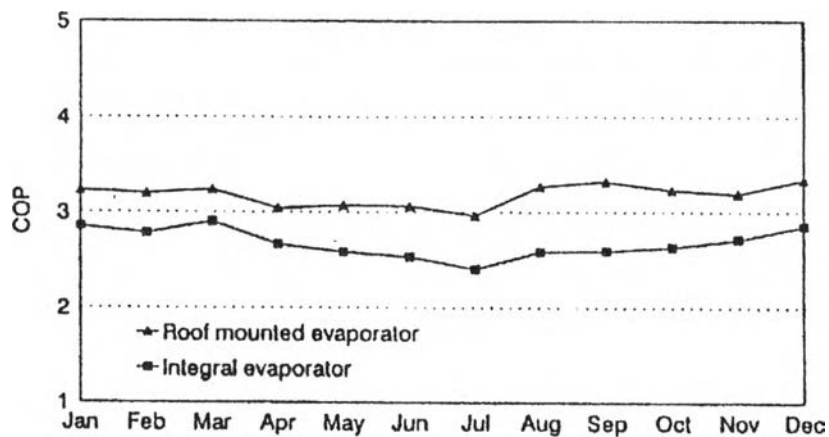
System COP_{sys} vs. time of day for three systems.

รูปที่ 2.33 COP_{sys} และ COP ที่แปรผันตามเวลาของระบบทั้ง 3 ระบบ ; ที่มา Çomakli, Kaygusuz, Ayhan และ Arslan (1993)

Morrison (1994) ศึกษาการทำน้ำร้อนด้วยฮีตปั๊ม โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในการศึกษาได้ทำการทดลองและจำลองการทำงาน สำหรับการจำลองการทำงานใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า TRNSYS สำหรับระบบถูกออกแบบโดยนำถังน้ำ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นรวมเป็นชุดเดียวกันดังแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 2.34 ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบ ในการศึกษาจะใช้เวลาประมาณ 1 ปี โดยกำหนดช่วงเวลาในการทำงาน และสถานที่ติดตั้ง

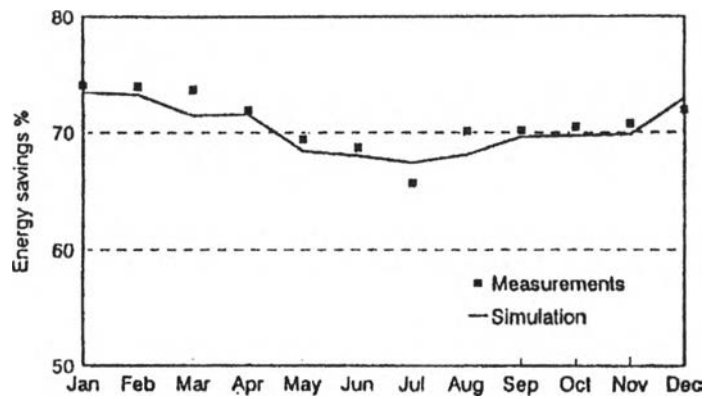


รูปที่ 2.34 (ก) แสดงระบบที่รวมเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย และ (ข) แสดงระบบที่รวมเฉพาะเครื่องควบแน่น ; ที่มา Morrison (1994)



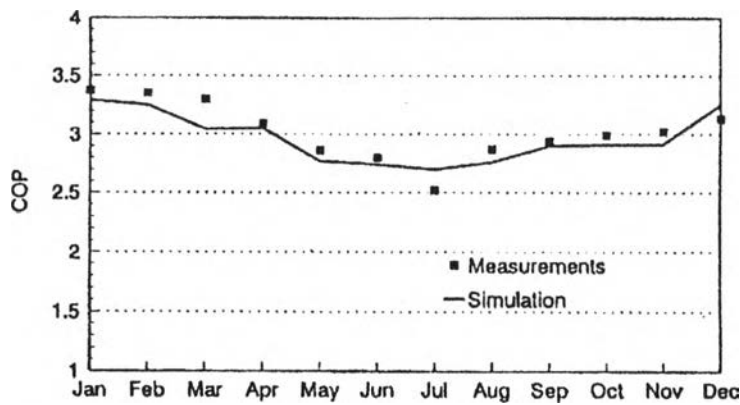
Heat pump water heater performance with roof mounted and ground level wrap-around evaporator.

รูปที่ 2.35 แสดงผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊ม ระหว่างระบบรวมเครื่องควบแน่น กับระบบที่รวมเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย ; ที่มา Morrison (1994)



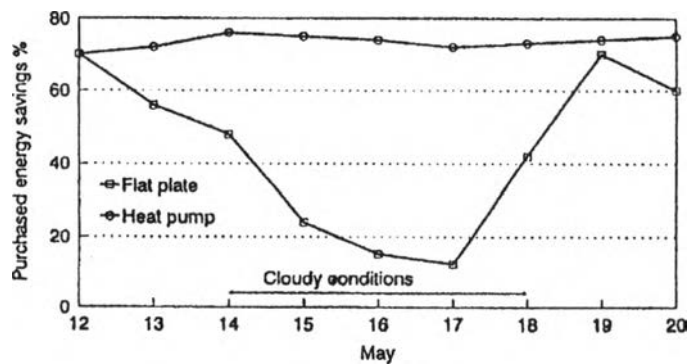
Measured and simulated energy savings of a heat-pump water heater with roof mounted evaporator.

รูปที่ 2.36 แสดงผลการทดลองและการจำลองการทำงานของเครื่องประหยัดพลังงานของระบบรวมเครื่องควบแน่น กับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ไฟฟ้า ; ที่มา Morrison (1994)



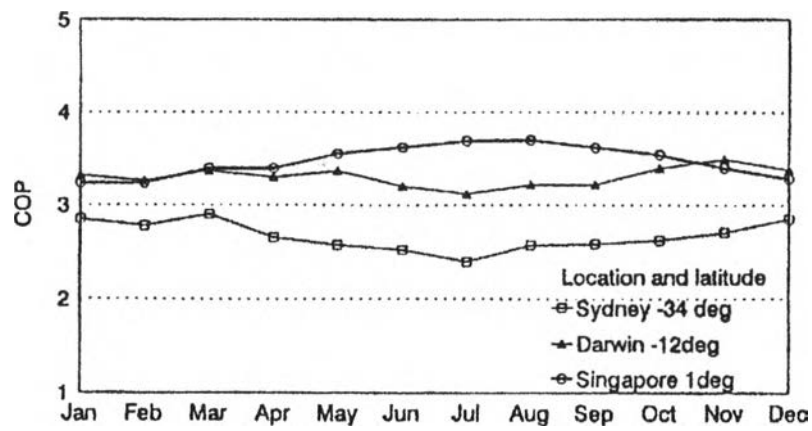
Measured and simulated coefficient of performance of a heat-pump water heater with roof mounted evaporator.

รูปที่ 2.37 แสดงผลการทดลองและการจำลองการทำงานของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มของระบบรวมเครื่องควบแน่นกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ไฟฟ้า ; ที่มา Morrison (1994)



Heat-pump water heater and flat-plate thermosyphon solar water heater performance during extended cloudy conditions.

รูปที่ 2.38 แสดงผลเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานระหว่าง ฮีตปั๊มที่รวมชุดเครื่องควบแน่นกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ชนิดเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ; ที่มา Morrison (1994)



Performance of packaged heat pump water heater for different climatic conditions. Compressor operation time limited to 6 A.M. to 6 P.M.

รูปที่ 2.39 แสดงผลเปรียบเทียบการสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตปั๊มปีของระบบแบบรวมเครื่องควบแน่น ในสถานที่ Sydney (Australia), Darwin (Australia) และ Singapore ระหว่างเวลา 6 A.M. - P.M. ; ที่มา Morrison (1994)