

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่แผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ พลังงานนี้เป็นต้นกำเนิดของวัฏจักรของสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำและธาตุต่างๆ เช่น คาร์บอน พลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง ปราศจากมลพิษ อีกทั้งเกิดใหม่ได้ไม่สิ้นสุด

2.1.1 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์จึงมีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7 % ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ประมาณ 1.495×10^{11} m ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลกที่เวลาแตกต่างกันจึงมีค่าไม่เท่ากัน ค่าคงที่แสงอาทิตย์ (Solar Constant) คือค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ $1,353 \text{ w/m}^2$ บนผิวโลกจะมีความร้อนประมาณ 946.3 w/m^2

2.1.2 องค์ประกอบของพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นโลก [1]

2.1.2.1 รังสีตรง (Direct Radiation หรือ Beam Radiation)

เป็นรังสีของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงสู่พื้นโลก โดยไม่เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุใดๆ ในชั้นบรรยากาศทำให้มีค่าความเข้มของแสงสูงเมื่อมาถึงพื้นโลกรังสีของแสงในลักษณะนี้เหมาะสำหรับการใช้กับอุปกรณ์ประเภทที่ต้องรวมแสง (Concentrator) ชนิดต่างๆ ที่ต้องการค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์สูงๆ

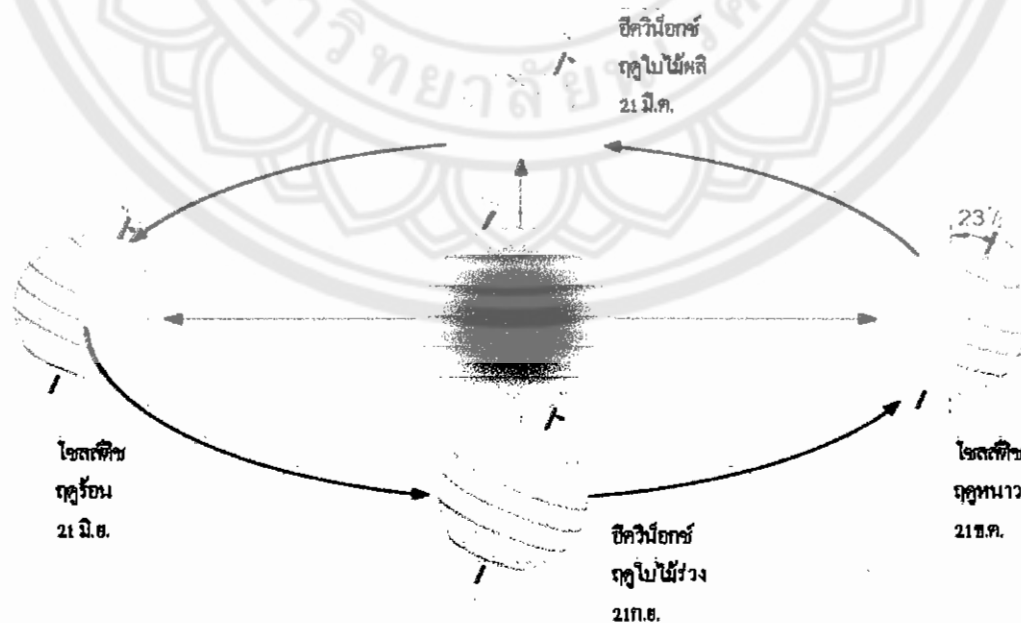
2.1.2.2 รังสีกระจาย (Diffuse Radiation หรือ Scattered Radiation)

เป็นรังสีของพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดการชนกับอะตอมของธาตุต่างๆ ในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดการกระจายของแสงและบางส่วนสะท้อนลงสู่พื้นโลก ค่าความเข้มของแสงจากรังสีประเภทนี้จะน้อยกว่ารังสีตรงมาก รังสีของแสงในลักษณะนี้เหมาะกับการใช้กับอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการความเข้มแสงสูงนัก เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

สัดส่วนของรังสีตรงกับรังสีกระจายในแต่ละวันในแต่ละพื้นที่ จะมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพของภูมิอากาศในแต่ละวันและแต่ละพื้นที่ ผลรวมของรังสีทั้งสองประเภทเรียกว่า รังสีรวม (Total radiation หรือ global radiation) สำหรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากบนพื้นที่ 1 หน่วย นอกชั้นบรรยากาศโลกเรียกว่า ค่าคงที่สุริยะ (solar constant) มีค่าเท่ากับ $1,353 \text{ w/m}^2$ ซึ่งค่าคงที่นี้แท้จริงแล้วอาจมีการผันแปรได้ในช่วงประมาณ $\pm 3.4\%$ ต่อปี แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปก็ยังนิยมใช้เป็นค่าคงที่ดังกล่าวอยู่

2.1.3 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะที่แกนหมุนเอียงทำมุมกับแนวตั้ง 23.5 องศา ตำแหน่งบนพื้นโลกหันเข้าหาดวงอาทิตย์ตามลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1 ทางซ้ายมือเป็นตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 มิถุนายน พื้นที่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด คนที่อยู่บนเส้นละติจูดที่ 23.5 องศาเหนือ จะเห็นดวงอาทิตย์เหนือศีรษะพอดีเวลาเที่ยงวัน ประเทศที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร เช่น ประเทศไทย จะเป็นฤดูร้อน หลังจากวันที่ 21 มิถุนายน โลก โคจร ในลักษณะที่หันพื้นที่ทางซีกโลกเหนือออกจากดวงอาทิตย์ วันที่ 21 กันยายน แนวของแสงอาทิตย์จะอยู่บนระนาบของเส้นศูนย์สูตร คนที่อยู่ทีเส้นศูนย์สูตรจะเห็นดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางศีรษะพอดี โดยที่ซีกโลกด้านเหนือและซีกโลกด้านใต้จะรับแสงอาทิตย์เท่ากัน และช่วงเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากันคือ 12 ชั่วโมง หลังจากวันที่ 21 กันยายน ซีกโลกด้านเหนือจะหันออกจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งจะเป็นฤดูหนาว หลังจากวันที่ 21 ธันวาคม โลกจะ โคจรจนซีกโลกด้านเหนือและซีกโลกด้านใต้จะรับแสงอาทิตย์เท่ากัน อีกครั้งในวันที่ 21 มีนาคม

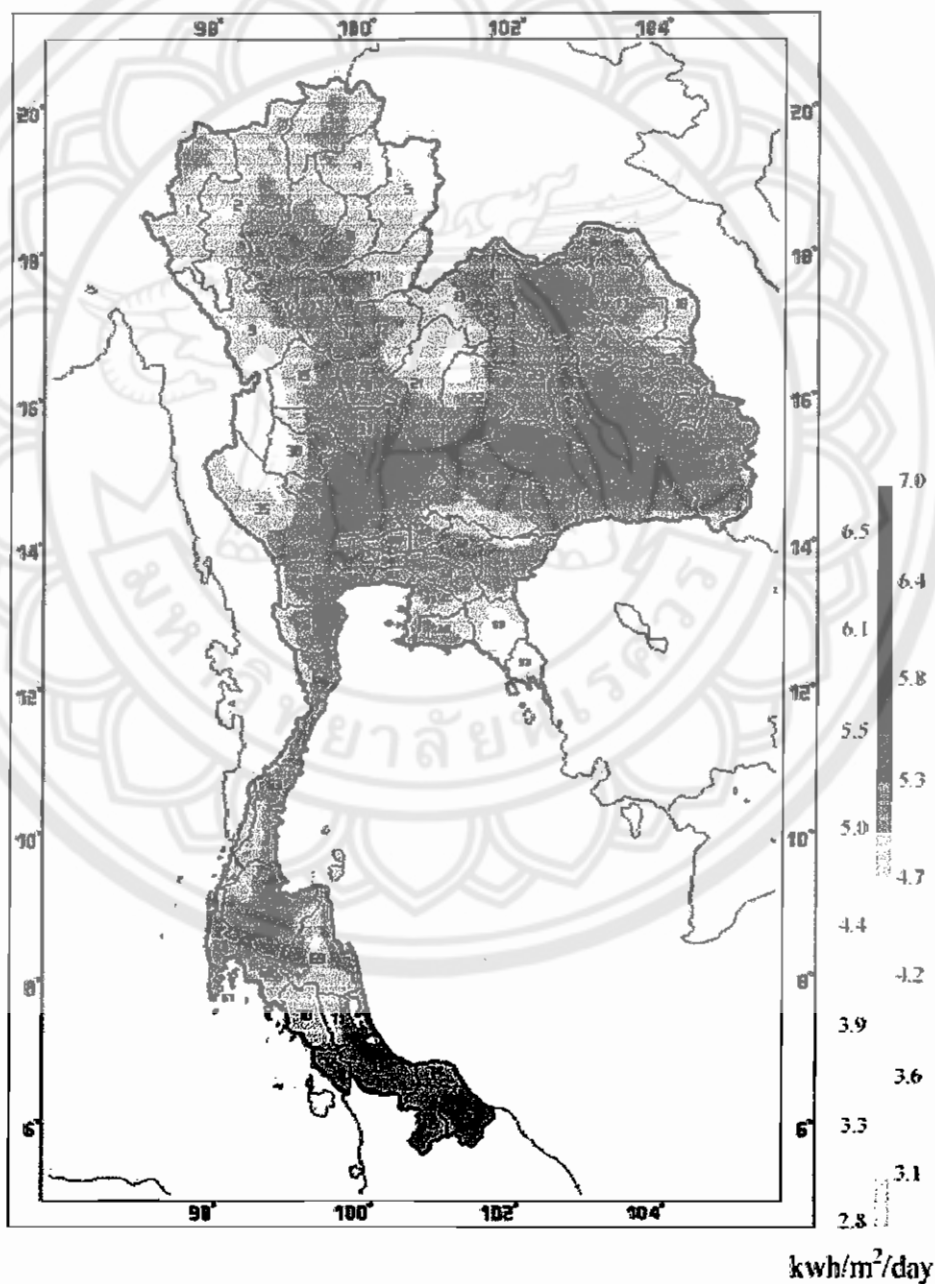


รูปที่ 2.1 การ โคจรของ โลกรอบดวงอาทิตย์ [2]

จากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์จะเห็นว่าเป็นผลดีต่อประเทศไทยที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี

2.1.4 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง



รูปที่ 2.2 แสดงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทย [3]

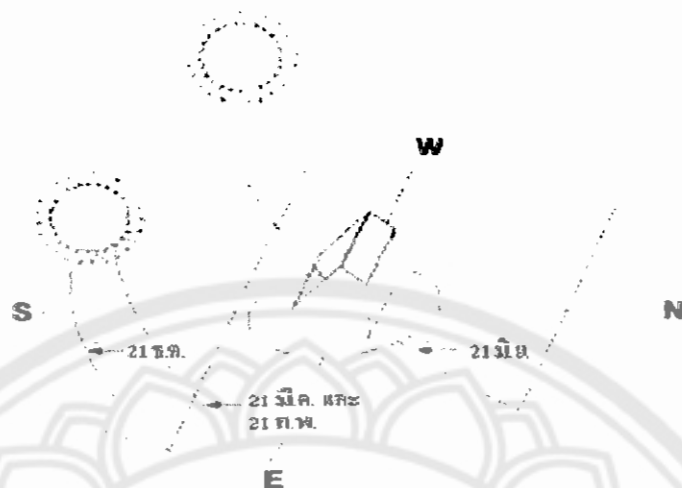
จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนา และส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ดังรูปที่ 2.2 พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศ ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-วัน เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัด นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อยุธยา และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์ เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m²-วัน พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m²-วัน

จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่า มีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²-วัน จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

จากข้อมูลการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศ ไทย จะเห็นว่าเป็นผลดีต่อประเทศไทยที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ดังนั้นสำหรับประเทศไทยแล้วประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนด้วยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะมีแสงเข้มคงที่ตลอดทั้งปี เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงเหมาะสมที่จะใช้ในประเทศไทย

2.1.5 ตำแหน่งการติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

ในการติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์นั้น ตำแหน่งที่ควรจะต้องติดตั้ง คือ ตำแหน่งที่มีโอกาสจะได้รับแสงอาทิตย์มากที่สุด จะต้องอยู่สูงพอที่จะไม่ถูกร่มเงาของอาคารข้างเคียง หรือต้นไม้ และควรทำให้เป็นมุมเอียงเพื่อให้มีการระบายน้ำได้ดี และสามารถใช้น้ำฝนในการชะล้างสิ่งสกปรก ฝุ่นละอองที่อาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลงได้ และหากลักษณะของอาคารเอื้ออำนวยควรติดตั้งที่ทิศใต้ เนื่องจากว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางซีกโลกเหนือ ทำให้แสงแดดจะส่องโดนหลังคาทางด้านทิศใต้ตลอดทั้งวัน ดังรูปที่ 2.3 และจังหวัดพิษณุโลกตั้งอยู่ที่พิกัดละติจูดที่ 16.4 องศา 47 ลิปดาเหนือ ลองจิจูดที่ 100 องศา 16.4 ลิปดาตะวันออก ดังนั้นการวางตัวของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้องทำมุม 16.4 องศา กับแนวระดับจึงจะสามารถรับแสงอาทิตย์ได้ดีที่สุด



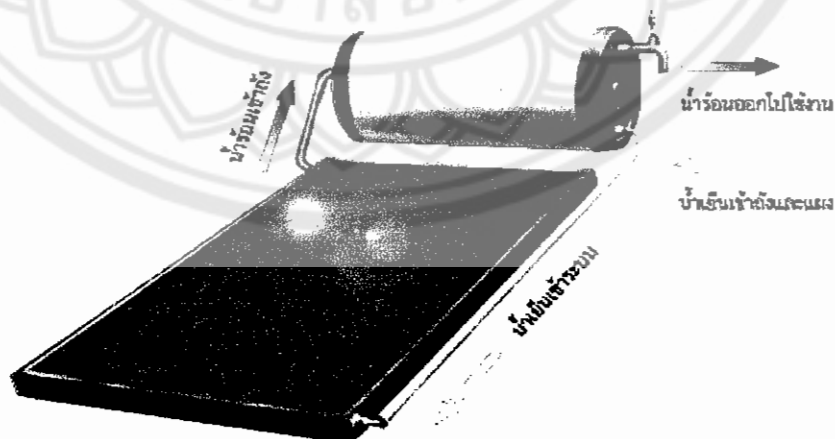
รูปที่ 2.3 แสดงถึงตำแหน่งการติดตั้งของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ [4]

2.2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้โดยตรงหรืออาจจะเป็นการอุ่นก่อนนำไปทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลักษณะการใช้งาน

2.2.1 หลักการทั่วไป

หลักการที่ทำให้ระบบการหมุนเวียนของน้ำที่อุณหภูมิปกติร้อนขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และเกิดการหมุนเวียนได้ อาศัยหลักความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งจะให้เกิดการแทนที่ของมวลของของไหลได้ น้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะดันตัวเองขึ้นสู่ที่สูง ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลลงสู่ส่วนล่างที่ต่ำกว่า ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [5]

2.2.2 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะทั่วไปดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

- แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar flat plate collector)
- ถังเก็บน้ำร้อน (Thermal storage tank)



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [5]

2.2.2.1 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar flat plate collector)

มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมแบน เป็นส่วนที่รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ไหลอยู่ในท่อทองแดงภายในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบสำคัญ คือ

- แผ่นกระจก ใช้สำหรับปิดด้านบนของกล่อง โดยทั่วไปจะใช้กระจกนิรภัย ซึ่งมีความทนทานต่อแรงกระแทกและความร้อนจากแสงอาทิตย์ แผ่นกระจกนี้จะช่วยกักเก็บความร้อนให้อยู่ภายในกล่องซึ่งจะเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศ

- แผ่นดูดรังสี ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และถ่ายเทความร้อนผ่านท่อทองแดงให้กับน้ำที่ไหลอยู่ภายในท่อทองแดง แผ่นดูดรังสีส่วนใหญ่ทำมาจากอะลูมิเนียม และถูกเคลือบด้วยสารที่มีคุณสมบัติในการดูดรังสีสูง

- ท่อลำเลียงน้ำ เป็นท่อสำหรับให้น้ำไหลผ่านภายในของส่วนที่รับแสงอาทิตย์ ท่อนี้จะถูกอัดคิกับแผ่นดูดรังสี ส่วนใหญ่จะใช้ท่อทองแดงเพราะมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนให้น้ำที่อยู่ภายในได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนไม่เป็นสนิม และรับแรงดันได้สูง

- ฉนวนความร้อน ใช้สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อน วัสดุที่ใช้ทำฉนวนส่วนใหญ่จะใช้ไมโครไฟเบอร์และท่อทับไว้ด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง โดยจะวางไว้ด้านล่างของแผ่นดูดรังสีและท่อลำเลียงน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการสูญเสียความร้อนทางด้านล่าง

- กรอบแผงรับแสงอาทิตย์ ส่วนใหญ่ใช้อะลูมิเนียมซึ่งมีความทนทาน และน้ำหนักไม่มากนัก เพื่อเป็น โครงยึดให้แผงรับแสงอาทิตย์มีความมั่นคงแข็งแรงและสะดวกในการขนย้าย

2.2.2.2 ถังเก็บน้ำร้อน (Thermal storage tank)

จะเป็นถังสองชั้น ชั้นในสำหรับเก็บน้ำร้อนที่ไหลมาจากแผงรับแสงอาทิตย์ ทำด้วยโลหะที่ไม่เป็นสนิมและสามารถทนความดันได้สูง เช่น สแตนเลส เป็นต้น ส่วนถังชั้นนอกมักทำด้วยแผ่นอะลูมิเนียม โดยภายในหุ้มด้วยฉนวนไมโครไฟเบอร์แบบดองอะลูมิเนียมฟอยล์ชนิดทนความร้อนซึ่งจะช่วยให้สามารถกักเก็บความร้อนได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ถังเก็บน้ำร้อน [5]

2.3.ประเภทของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

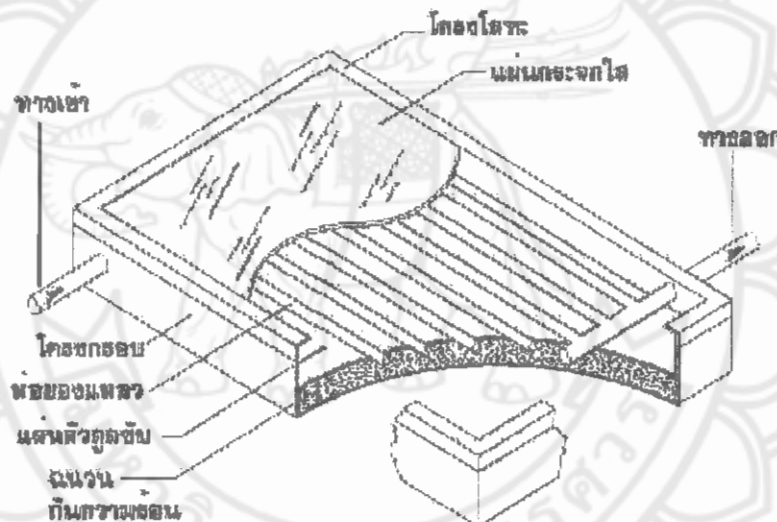
2.3.1 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube Collector)

แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ประกอบด้วยท่อแก้วใสเรียงเป็นแถวหลายๆ แถว ภายในท่อแก้วใสจะมีท่ออีกท่อหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีน้อย สำหรับช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอกจะมีลักษณะเป็นสุญญากาศ โดยในกระบวนการผลิตจะทำการกำจัดอากาศออกไป ทั้งนี้เพราะจะเป็นการเพิ่ม

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ เนื่องจากท่อชั้นนอกจะทำหน้าที่เป็นผนัง โปรงใสที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ส่วนสูญญากาศจะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ไปยังส่วนอื่นๆ ของระบบการทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2.3.2 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Collector)

แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับรังสีดวงอาทิตย์ เพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับของไหล เพื่อนำไปใช้งาน ของไหลที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำ แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบนี้จะประกอบด้วยตัวดูดรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งทำด้วยสีดำ เพื่อให้มีการดูดกลืนสูง และใช้กระจกใสปิดด้านบน เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Collector) [4]

การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ในระบบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบช่วงขณะใดขณะหนึ่งได้จากแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ว่าเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ตลอดช่วงเวลาที่กำหนดต่อพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาเดียวกัน จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th,c} \equiv \frac{mC_p(T_o - T_i)}{A_c I} \equiv \frac{Q_u}{A_c I} \quad (2.1)$$

โดยที่	A_c	=	พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ (Collector area), m^2
	C_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหล, (J/kg.K)
	I	=	รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับแสงอาทิตย์, W/m^2
	m	=	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (น้ำ), kg/s
	T_o	=	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากแผงรับแสงอาทิตย์, K
	T_i	=	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์, K
	Q_U	=	พลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา, W
	$\eta_{th,C}$	=	ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ในการทำน้ำร้อน

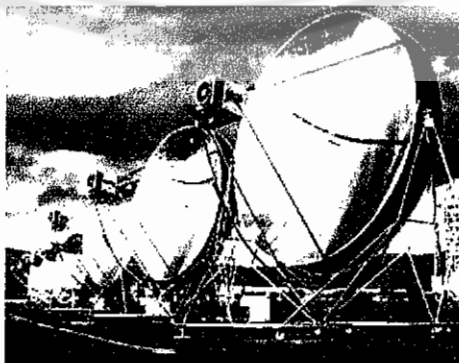
ซึ่งค่า Q_U สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_U = A_C I \tau_{C1} \tau_{C2} \alpha_a - Q_{rad,plate} - Q_{conv,plate} - Q_{cond,plate} \quad (2.2)$$

โดยที่	τ_{C1}	=	ค่าความสามารถในการผ่านทะลุของแสงของกระจกบานที่ 1
	τ_{C2}	=	ค่าความสามารถในการผ่านทะลุของแสงของกระจกบานที่ 2
	α_a	=	ค่าความสามารถในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของแผงรับ
	$Q_{rad,plate}$	=	ความร้อนที่สูญเสียออกจากแผงรับ โดยวิธีแผ่รังสี, W/m^2
	$Q_{conv,plate}$	=	ความร้อนที่สูญเสียออกจากแผงรับ โดยวิธีพาความร้อน, W/m^2
	$Q_{cond,plate}$	=	ความร้อนที่สูญเสียออกจากแผงรับ โดยวิธีนำความร้อน, W/m^2

2.3.3 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมรังสี (Concentration Collector)

จะมีลักษณะเป็นกระจกที่มีรูปทรงโค้งแบบพาราโบลา ดังรูปที่ 2.8 เพื่อทำหน้าที่สะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ให้มารวมที่ท่อ ซึ่งท่อจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและเป็นท่อที่บรรจุสารสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อถ่ายเทไปยังอุปกรณ์อื่นต่อไป แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมรังสีนี้ต้องมีการปรับองศาในการรับแสงในช่วงนั้นของแต่ละวัน



รูปที่ 2.8 ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมรังสี (Concentration Collector) [6]

2.4 เทอร์โมไซฟอน

2.4.1 ลักษณะของเทอร์โมไซฟอน

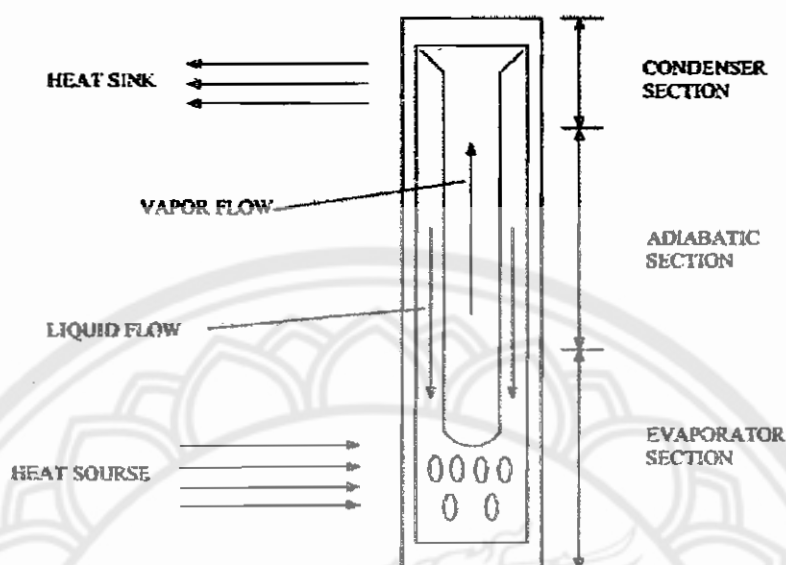
เทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนสูงมากประมาณ 200 เท่าเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของท่อทองแดงที่มีมิติเท่ากัน (Dunn,P.D. และ Reay,D.A.,1981) ท่อที่ใช้ทำจากท่อปลายปิดทั้งสองด้านภายในเป็นสุญญากาศ บรรจุสารทำงาน (Working fluid) ไว้จำนวนหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเทอร์โมไซฟอน

2.4.2 โครงสร้างของเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของเทอร์โมไซฟอนอาศัยการเปลี่ยนสถานะ และความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนเป็นตัวส่งถ่ายความร้อน ซึ่งชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเทอร์โมไซฟอนไปใช้งาน เช่น การใช้งานที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-200 °C ควรใช้ท่อเป็นท่อทองแดง สารทำงานภายในเป็นน้ำ เนื่องจากน้ำมีราคาต่ำและสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เป็นอย่างดีที่อุณหภูมิการทำงานดังกล่าว นอกจากนั้นการเลือกสารทำงานควรพิจารณาให้เข้ากับวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อนด้วย เนื่องจากถ้าสารทำงานไม่สามารถเข้ากับวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ท่อมีอายุการใช้งานที่สั้นลง โดยทั่วไปเทอร์โมไซฟอนมีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ระเหย (Evaporator) ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic) และส่วนควบแน่น (Condenser) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน [8]

2.4.3 หลักการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน

ท่อเทอร์โมไซฟอนอาศัยความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อเป็นตัวถ่ายเทความร้อน เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ด้านล่าง โดยมีก๊าซหรือน้ำร้อนอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในจะเดือดและระเหยกลายเป็น ไอลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อนเกิดขึ้น ขณะที่ไอลอยไปยังส่วนควบแน่นก็จะผ่านส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน เมื่อไอลอยไปถึงส่วนควบแน่นก็จะควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลย้อนกลับลงมาตามผิวท่อเทอร์โมไซฟอนด้านใน โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นของเหลวที่ไหลลงมาส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ด้านล่างของท่อเทอร์โมไซฟอนก็จะระเหยกลายเป็นไอต่อไป ทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อน และทำงานเป็นวัฏจักรต่อไป

ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน

- ง่ายต่อการสร้าง
- สามารถนำความร้อนสูง
- สามารถถ่ายเทความร้อนได้เมื่อแหล่งรับและระบายความร้อนอยู่ห่างกันได้
- สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ความร้อนบริเวณที่มีพื้นที่เล็กและแคบได้
- ไม่ต้องการพลังงานภายนอกสำหรับใช้ในการทำงาน

2.4.4 อัตราการเติมสารทำงาน

ควรหลีกเลี่ยงการเติมสารทำงานมากเกินไป เพราะสารทำงานจะไปลดพื้นที่ในสวนควบแน่น และทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง แต่ถ้าเติมสารทำงานไม่พอเพียง จะเกิดการแห้ง (Dry out) ขึ้นที่ผิวท่อส่วนทำระเหย อัตราการเติมสารทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ F เป็นสัดส่วนกับปริมาตรของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ขณะยังไม่ได้ทำงาน (V_l) กับปริมาตรในส่วนทำระเหยคือ

$$F = \frac{V_l}{Al_e} \quad (2.3)$$

โดยที่ V_l = ปริมาตรของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน, m^3
 A = พื้นที่หน้าตัดภายนอกของเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi D_o^2}{4}$, m^2
 l_e = ความยาวในส่วนทำระเหย, m
 D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง โดยปกติจะมีเติมของเหลวมากกว่าครึ่งหนึ่งของส่วนทำระเหยเพื่อให้ความหนาฟิล์มมากกว่า 0.3 mm ตลอดความยาวท่อ ซึ่งอยู่ในช่วง 40 % ถึง 60% ของส่วนทำระเหยและ

$$V_l \geq 0.001 D_o (l_e + l_a + l_c) \quad (2.4)$$

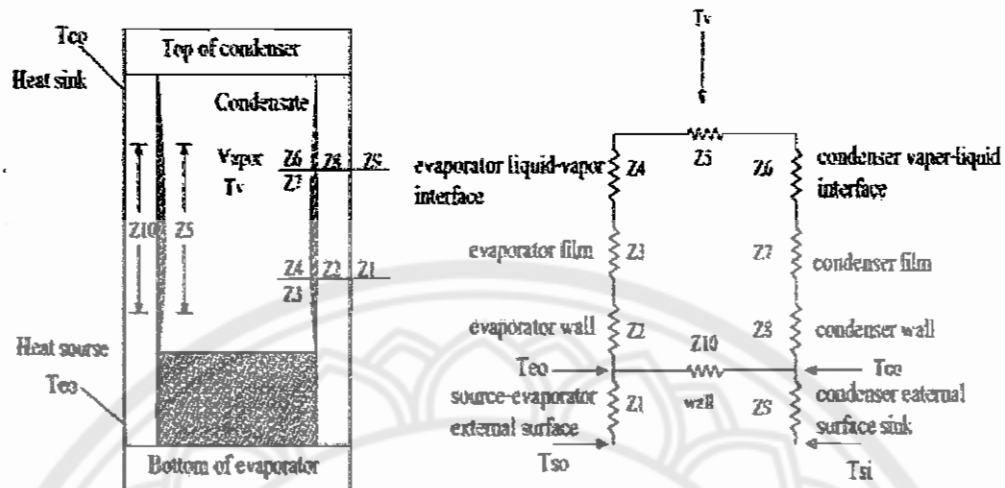
เมื่อ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเทอร์โมไซฟอน, m
 l_e = ความยาวในส่วนทำระเหย, m
 l_a = ความยาวในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, m
 l_c = ความยาวในส่วนควบแน่น, m

2.4.5 การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงของเทอร์โมไซฟอน (Q_{TS}) ค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z_{tot}) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน ($\Delta T = T_{so} - T_{si}$) คือ

$$Q_{TS} = \frac{\Delta T}{Z_{tot}} \quad (2.5)$$

โดยที่ T_{so} = อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน, $^{\circ}C$
 T_{si} = อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน, $^{\circ}C$



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรด้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน [8]

ค่าความต้านทานความร้อนรวมประกอบด้วยค่าความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

- Z_1 = ค่าความต้านทานความร้อน โดยการพาห้วงแหล่งกำเนิดความร้อน และผิวด้านนอกของส่วนทำระเหย, K/W
- Z_9 = ค่าความต้านทานความร้อน โดยการพาห้วงผิวของส่วนควบแน่นกับ แหล่งระบายความร้อน, K/W

ค่า Z_1 และ Z_9 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} S_{eo}} \quad \text{และ} \quad Z_9 = \frac{1}{h_{co} S_{co}} \quad (2.6)$$

โดยที่ h_{eo} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนทำระเหย, W/m².K

S_{eo} = พื้นที่ผิวของส่วนทำระเหย, m²

h_{co} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น, W/m².K

S_{co} = พื้นที่ผิวของส่วนควบแน่น, m²

Z_2 = ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย, K/W

Z_8 = ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น, K/W

ค่า Z_2 และ Z_8 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_2 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi l_c \lambda_x} \quad \text{และ} \quad Z_8 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi l_c \lambda_x} \quad (2.7)$$

- โดยที่ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน, m
 D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน, m
 λ_x = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m.K
 Z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังเดือดในท่อเทอร์โมไซฟอน, K/W
 Z_7 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังควบแน่นในท่อเทอร์โมไซฟอน, K/W

ค่า Z_3 และ Z_7 จะขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ขนาดของท่อเทอร์โมไซฟอน และอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{3f} = \frac{(cQ)^{1/3}}{(D^{4/3} g^{1/3} l_c \phi^{4/3})} \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่} \quad \phi_2 = \left(\frac{h_{fg} \lambda_1^3 \rho_l}{\mu_l} \right)^{4/3} \quad (2.9)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{(\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D l_c)^{0.6})} \quad (2.10)$$

$$\text{โดยที่} \quad \phi_3 = \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_1^{0.3} c_p^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{Pa} \right]^{0.23} \times 0.32 \quad (2.11)$$

- โดยที่ ρ_l = ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว, kg/m³
 ρ_v = ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ, kg/m³
 λ_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, W/m.K
 h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน, J/kg
 c_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน, J/kg.K
 μ_l = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน, m²/s
 P_v = ความดันไอของสารทำงาน, Pa
 P_a = ความดันของบรรยากาศ, Pa

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ คำนวณ Z_3 จากสมการ

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3f}(1-F) \quad (2.12)$$

และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

$$Re_f = \frac{(4Q)}{(h_{fg}\mu_1\pi D_1)} \quad (2.13)$$

ถ้า $50 < Re_f < 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = \frac{(cQ^{1/3})}{(D_1^{4/3}g^{1/3}l_e\phi_2^{4/3})} \quad (2.14)$$

ถ้า $Re_f > 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = \left(\frac{(cQ^{1/3})}{(D_1^{4/3}g^{1/3}l_e\phi_2^{4/3})} \right) \times 191 Re_f^{-0.773} \quad (2.15)$$

โดยที่ $c = 0.235$

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_5 เป็นความต้านทานความร้อนของ Pressure drop ระหว่างทางจากส่วนทำระเหยไปส่วนควบแน่น แต่มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_{10} เป็นความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อหาได้จาก

$$Z_{10} = \frac{(0.5l_e + l_a + 0.5l_c)}{(A_x\lambda_x)} \quad (2.16)$$

โดยที่ A_x เป็นพื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ, m^2

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อจะมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน

เงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกน คือ

$$\frac{Z_{10}}{(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)} > 20 \quad (2.17)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ (2.17) ค่าความต้านทานความร้อนรวมคือ

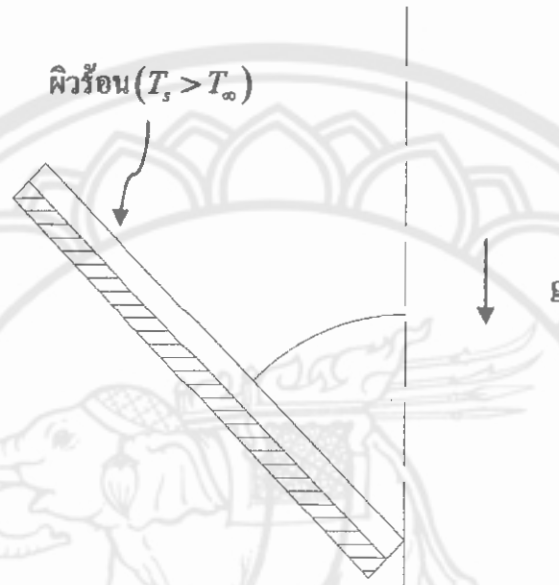
$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.18)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.17) ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน คือ

$$Z_{tot} = Z_1 + \left[(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (1/Z_{10}) \right]^{-1} + Z_9 \quad (2.19)$$

2.4.6 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนแผ่นระนาบเอียง [9]

พิจารณาการพาความร้อนตามธรรมชาติบนแผ่นระนาบเอียงใช้สำหรับหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่แผ่รับรังสี ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.12 โดยใช้สหสัมพันธ์ของฟูจิอิและอิมูระ ผิวนอนหงายหน้าขึ้น



รูปที่ 2.12 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนแผ่นระนาบเอียง [9]

$$Nu_m = 0.14 \left[(Gr_L Pr)^{1/3} - (Gr_c Pr)^{1/3} \right] + 0.56 (Gr_c Pr \cos \theta)^{1/4} \quad (2.20)$$

โดยที่ $Gr_c Pr = \exp(14.223 + 8.394 \cos \theta), 15^\circ < \theta < 60^\circ \quad (2.21)$

$$Gr_c Pr = \exp(3.848 + 29.146 \cos \theta), 60^\circ < \theta < 70^\circ \quad (2.22)$$

$$Gr_L = \frac{g \beta L^3 (T_s - T_\infty)}{\nu^2} \quad (2.23)$$

หมายเหตุ $Gr_L Pr < 10^{11}$ ($Gr_L > Gr_c$) และ $15^\circ < \theta < 70^\circ$ โดยฟูจิอิและอิมูระ
สมบัติทุกตัวพิจารณา @ $T_f = T_s - 0.25(T_s - T_\infty)$
ยกเว้น β พิจารณา @ $T_\infty + 0.25(T_s - T_\infty)$

โดยที่ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2

β = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงปริมาตร

Nu_m = Nusselt number

Pr = Prandtl number

Gr = Grashof number

ν = ความหนืด, m^2/s

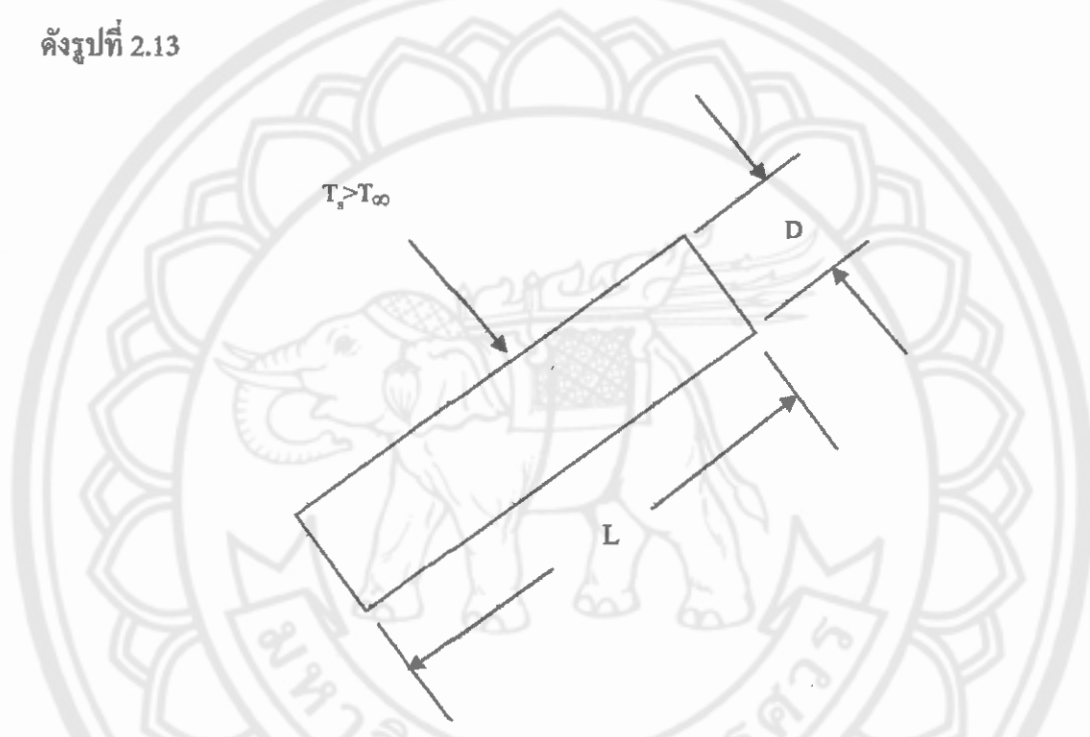
L_{plate} = ความยาวทั้งหมดของแผ่นระนาบเอียง, m

$$T_s = \text{อุณหภูมิผิวของวัสดุ, } ^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = \text{อุณหภูมิของของไหลรอบนอก, } ^\circ\text{C}$$

2.4.7 การหาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอก

การหาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกยาวพิจารณาที่ทรงกระบอกแนวระดับใช้สำหรับหาค่าการถ่ายเทความร้อนในส่วนของถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งเทอร์โมไซฟอนมีลักษณะการวางตัวดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การหาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับ [9]

เซอร์ซิลและชูแนะนำให้ใช้สัมพันธ์สำหรับ $10^5 < Ra_D < 10^{12}$ ดังสมการ

$$Nu_m = h_m \frac{D}{k} = \left\{ 0.6 + \left[\frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{1} + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{8/27} \right]^2 \right\} \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ } Ra_D = Gr_D Pr = g\beta(T_s - T_\infty)\nu\alpha \quad (2.25)$$

โดยที่ Nu_m = Nusselt number

Pr = Prandtl number

Ra_D = Rayleigh number

ν = ความหนืด, m^2/s

α = สภาพแพร่ผ่านความร้อน, m^2/s

- D = เส้นผ่านศูนย์กลาง, m
- k = ค่าการนำความร้อน, W/m.K
- h_m = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $m^2.K/W$
- $\beta = \frac{1}{(T_s + T_\infty)/2}$

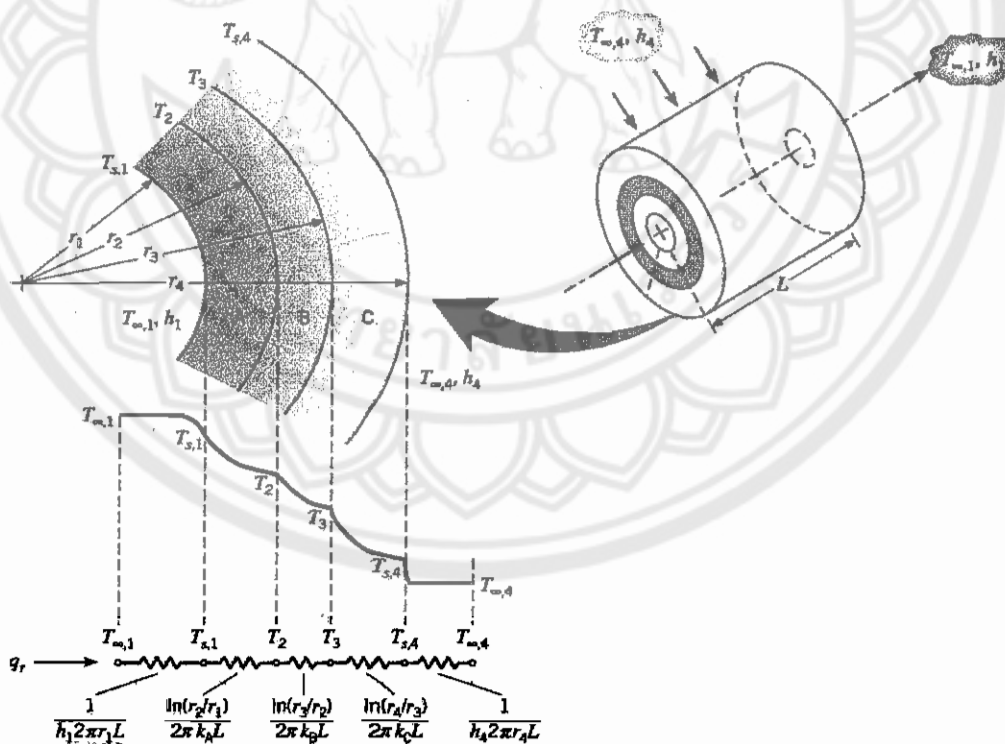
ดังนั้น
$$h_m = \left(\frac{k}{D}\right) = \left\{ 0.6 + \left[0.387 Ra_D^{1/6} + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{8/27} \right]^2 \right\} \quad (2.26)$$

สมบัติทุกตัวของของไหลพิจารณาที่

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} \quad (2.27)$$

2.4.8 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก

การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก ใช้ในการพิจารณาการนำความร้อนในส่วนจนถึงเก็บน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวน มีลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก [12]

จากรูปที่ 2.14 จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านชั้นผนังตัวกลาง โดยไม่คำนึงถึงความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัส

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นตัวกลางสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{cylinder} = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (2.28)$$

พิจารณาในนิพจน์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

$$Q_{cylinder} = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})}{Z_{cylinder}} \quad (2.29)$$

โดยที่

$Q_{cylinder}$	=	การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก, W
r	=	รัศมีของชั้นผนังตัวกลาง, m
L	=	ความยาวของทรงกระบอก, m
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนผ่านชั้นผนังตัวกลาง, W/m.K
h_1	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในทรงกระบอก, W/m ² .K
h_4	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกทรงกระบอก, W/m ² .K
$T_{\infty,1}$	=	อุณหภูมิของของไหลภายในทรงกระบอก, K
$T_{\infty,4}$	=	อุณหภูมิของของไหลภายนอกทรงกระบอก, K
$Z_{cylinder}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, K/W

2.5 ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) [13]

ในการวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกการลงทุนนอกจากจะพิจารณาจุดคุ้มทุนแล้ว บางครั้งยังต้องการทราบว่า จะคืนทุนด้วยระยะเวลาเท่าไร การคำนวณหาจะต้องแปลงมูลค่าของเงินเป็นมูลค่าปัจจุบันรายปีก็ได้ ปีที่ทำให้รายจ่ายเท่ากับรายรับนั้นคือระยะเวลาการจ่ายคืนทุน

$$P = A(P/A, i\%, n) + F(P/F, i\%, n) \quad (2.30)$$

$$\text{โดยที่ } (P/A, i\%, n) = \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad \text{โดยที่ } i > 0 \quad (2.31)$$

$$(P/F, i\%, n) = \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (2.32)$$

P	=	ราคาทุน, บาท
A	=	รายได้ต่อปี, บาท
F	=	ต้นทุนคงที่, บาท

n = จำนวนปี, ปี
 i = อัตราดอกเบี้ย, %

