

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Product Design and Development)

ในกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ จะต้องใช้ความรู้ทางเทคนิคควบคู่กับการแก้ไขปัญหาโดยใช้ความคิดสร้างสรรค์ เทคนิคการสร้างแนวคิดสร้างสรรค์แบ่งได้เป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางเชิงสัญชาตญาณซึ่งเป็นเทคนิคที่เน้นการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์จากตัวบุคคลหรือกลุ่ม เช่น การระดมสมอง การใช้แผนภาพ การใช้เทคนิค 6-3-5 เป็นต้น และแนวทางเชิงตรรกะเป็นเทคนิคการหาคำตอบอย่างมีขั้นตอนและเป็นระบบ เช่น เทคนิคแก้ปัญหาการประดิษฐ์หรือ TRIZ ได้จากการคิดค้นของอัลท์ชูลเลอร์ ชาวรัสเซีย โดยศึกษาจากสิทธิบัตรเป็นจำนวนหลายพันสิทธิบัตร เพื่อหารูปแบบที่คล้ายกันและหลักการคิดสร้างสรรค์ แล้วนำรูปแบบที่ค้นพบมารวบรวม, จัดทำเป็นรหัสต่างๆ และสร้างระบบขึ้น ดังนั้น TRIZ จึงเป็นการนำปัญหาการประดิษฐ์ต่างๆ มาจัดเป็นระบบ และกำหนดแนวทางแก้ปัญหาสำหรับระบบเหล่านั้น โดยจะพบความขัดแย้งทางเทคนิค (Technical Contradictions) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเราพยายามปรับปรุงพารามิเตอร์หนึ่งให้ดีขึ้นแต่ส่งผลให้อีพารามิเตอร์หนึ่งแย่ลง โดย TRIZ ได้กำหนดระบบการแก้ปัญหาขึ้นโดยนำความขัดแย้งทางเทคนิคมาเป็นโจทย์ สามารถแจกแจงพารามิเตอร์ได้ 39 พารามิเตอร์ ตามตาราง 2.1 และแนวทางการแก้ปัญหา 40 แนวทาง ตามตาราง 2.2 ซึ่งเรียกว่าหลักการประดิษฐ์คิดค้น (Inventive Principles)

สำหรับปัญหาที่เกิดจากพารามิเตอร์ตัวเดียวกันแต่ถ้าปรับให้ดีขึ้นสำหรับสถานการณ์หนึ่ง แต่จะแย่ลงในอีกสถานการณ์หนึ่ง จะเรียกว่า ความขัดแย้งทางกายภาพ (Physical Contradiction) โดยเราจะแก้ปัญหาโดยใช้หลักการแบ่งแยก (Separation Principles) นอกจากนี้ TRIZ มีวิธีแก้ปัญหาโดยการประดิษฐ์โดยใช้ทฤษฎีสสาร-สนาม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสสาร 2 ชนิดที่ทำปฏิกริยากันผ่านสนามพลัง ระบบที่ไม่ใช่สามเหลี่ยมสสาร-พลังงานที่สมบูรณ์จะวิวัฒนาการเป็นสามเหลี่ยมสสาร-พลังงานที่สมบูรณ์

ตารางที่ 2.1

พารามิเตอร์ 39 อย่างของอัลท์ซูลเลอร์

1.น้ำหนักของวัตถุที่เคลื่อนที่	21.กำลังงาน
2.น้ำหนักของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	22.การสิ้นเปลืองพลังงาน
3.ความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่	23.การสิ้นเปลืองสสาร
4.ความยาวของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	24.การสูญเสียข้อมูลข่าวสาร
5.พื้นที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่	25.การสิ้นเปลืองเวลา
6.พื้นที่ของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	26.ปริมาณของสสาร
7.ปริมาตรของวัตถุที่เคลื่อนที่	27.ความน่าเชื่อถือ
8.ปริมาตรของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	28.ความแม่นยำของการวัด
9.ความเร็ว	29.ความแม่นยำของการผลิต
10.แรง	30.ปัจจัยเป็นโทษที่มีต่อวัตถุ
11.ความตึง แรงดัน	31.ผลกระทบที่เป็นโทษ
12.รูปร่าง	32.ความสามารถในการผลิตได้
13.ความเสถียรของวัตถุ	33.ความสะดวกในการใช้งาน
14.ความแข็งแรง	34.ความสามารถในการซ่อมแซม
15.ความทนทานของวัตถุที่เคลื่อนที่	35.ความสามารถในการปรับเปลี่ยน
16.ความทนทานของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	36.ความซับซ้อนของอุปกรณ์
17.อุณหภูมิ	37.ความซับซ้อนของการควบคุม
18.ความสว่าง	38.ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ
19.พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่เคลื่อนที่	39.ผลผลิต
20.พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	

ที่มา : มณฑล 2546, น. 144

ตารางที่ 2.2

หลักการประดิษฐ์คิดค้น (Inventive Principles)

หลักการประดิษฐ์คิดค้น	คำอธิบาย	ตัวอย่าง
1. การแบ่งส่วน	- แบ่งวัตถุออกเป็นส่วนต่างๆ ที่เป็นอิสระต่อกัน ให้สามารถถอดแยกได้ง่าย	สายฉีดน้ำ, ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์
2. การแยกออก	- แยกชิ้นส่วนที่รวมกันออกจากวัตถุ หรือแยกส่วนที่จำเป็นออกจากเพียงส่วนเดียว	ไมโครคราฟต์, Journal bearing
3. ความเฉพาะส่วน	- เปลี่ยนโครงสร้างของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมโดยเจตนาให้แตกต่างกัน - ให้แต่ละส่วนของวัตถุทำหน้าที่ต่างกัน - จัดตำแหน่งของวัตถุในสภาพที่เลือกอันยอดเยี่ยมที่สุด	ที่เย็บกระดาษ ดินสอที่มียางลบติดอยู่
4. ความไม่สมมาตร	- ทำให้วัตถุไม่สมมาตร หรือเพิ่มความไม่สมมาตรไม่เท่ากัน	ยางรถยนต์สองด้านแข็งแรงไม่เท่ากัน
5. การรวมเข้าด้วยกัน	- รวมวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือวัตถุที่กลั่นเข้าด้วยกัน (รวมในด้านเนื้อที่) - รวมวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือวัตถุที่กลั่นเข้าด้วยกัน (รวมในด้านเวลา)	TV/CR, IC chips
6. ความเป็นสากล	- ให้วัตถุหนึ่งทำงานได้หลายหน้าที่ เพื่อให้สามารถกำจัดวัตถุที่จำเป็นออก	โซฟาปรับเป็นเตียงได้
7. การเชื่อมทับ	- วางวัตถุหนึ่งข้างในวัตถุที่สอง และวัตถุที่สองข้างในวัตถุที่สาม ฯลฯ - ให้วัตถุหนึ่งวางลงลงไปในอีกวัตถุหนึ่ง	เสาอากาศ แก้วช้อนแก้วได้ ดินสอกัด
8. การนำพนักวาง	- ติดวัตถุที่มีกำลังยก หรือใช้การปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม เช่น ลิฟต์เอชไดเนมิกส์	บอลลูนร้อน
9. การทำงานตรงกันข้ามก่อน	- ทำงานตรงกันข้ามกับงานที่ต้องการทำก่อน (บางส่วน หรือทั้งหมด)	ฟิล์มขาวดำ ฟันเสริมคอนกรีต
10. การทำงานก่อน	- ทำงานที่ต้องการก่อนจำเป็นต้องทำ - ติดตั้งวัตถุในลักษณะที่สามารถทำงานได้ทันทีที่ต้องการ	การเคลือบสีในส่วน rubber-cement ที่ทาใช้ได้ตลอดเวลา
11. การป้องกันล่วงหน้า	- ศึกษความน่าเชื่อถือของวัตถุที่ต้องการป้องกันอุบัติเหตุก่อนทำหน้าที่	ติดแถบแม่เหล็กที่สินค้า
12. สภาพความตึงเครียดที่เท่ากัน	- เปลี่ยนสภาพเพื่อไม่ให้วัตถุซึ่งเคื่องเครียดลงในส่วนความตึงเครียด	รางเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง ประสิทธิภาพเป็น
13. ทางแก้ปัญหาตรงข้าม	- ทำงานให้ตรงข้ามกับที่ควรเป็น - ทำให้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้อยู่กับที่ และชิ้นส่วนที่อยู่กับที่มีการเคลื่อนไหว - วางวัตถุกลับหัว	เครื่องกัก เครื่องกลึง เครื่องขัดมันดิน
14. การใช้ความโค้ง	- เปลี่ยนจากแนวเส้นตรงเป็นเส้นโค้ง - เปลี่ยนจากผิวเรียบเป็นผิวโค้ง - พิจารณาการใช้ลูกกลิ้ง ดับลูกปืน - เปลี่ยนจากการเคลื่อนที่โดยตรงเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุน หรือใช้แรงเหวี่ยง	เมาส์คอมพิวเตอร์ ฝากระป๋องโซดา

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)
หลักการประดิษฐ์คิดค้น (Inventive Principles)

หลักการประดิษฐ์คิดค้น	คำอธิบาย	ตัวอย่าง
15. การใช้หลักการผสมผสาน	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้วัตถุหรือสิ่งของเดิมเปลี่ยนแปลงตนเองให้มีสภาพเหมาะสมกับแต่ละขั้นตอนของการทำงานมากที่สุด - แบ่งวัตถุออกเป็นชิ้นส่วนที่สามารถเคลื่อนที่สัมพันธ์กันได้ - ถ้าวัตถุนั้นตรึงอยู่กับที่ ทำให้เคลื่อนที่ได้ - ถ้าไม่สามารถทำได้ 100 % ลองให้ทำได้น้อยลงหรือมากขึ้นเล็กน้อย - เพิ่มองค์ประกอบให้กับวัตถุ (เช่น เคลือบได้ 1 มิติ หรือจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ) - ใช้ชุดประกอบที่มีหลายชิ้นแทนชิ้นเดียว - ทำให้วัตถุแข็งหรือหมุนไปด้านข้าง - ใช้อีกด้านหนึ่งของพื้น 	<ul style="list-style-type: none"> - เคนส์กล้องถ่ายรูป ที่ปรับแสง - กระดาษลอกบนหิมะ เสื้อคลุมมีหมวก - เมกาคอมพิวเตอร์ (จำลองหน้าจอเป็นแผ่นรองเมาส์)
16. การทำงานบางส่วนหรือมากเกินไป	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้วัตถุชิ้นใด หรือเพิ่มความถี่ของการสั่นสะเทือน - ใช้การสั่นสะเทือนด้วย resonance, piezovibration, ultrasonic หรือ electromagnetic 	นาฬิกาควอตซ์
17. การเคลื่อนที่ไปสู่มิติใหม่	<ul style="list-style-type: none"> - แทนที่การทำงานแบบต่อเนื่อง ด้วยการทำงานเป็นช่วง ๆ หรือเป็นจังหวะ - เปลี่ยนความถี่ของการทำงานเป็นช่วง - ใช้การหยุดระหว่างช่วง เพื่อทำงานอย่างอื่น 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องดนตรีประเภททุย ปี่ - เมเตอร์ที่ขยับไม่ได้ - โทรศัพท์มือถือ - Hammer drill
18. การสั่นสะเทือนทางกล	<ul style="list-style-type: none"> - ให้ทุกส่วนของวัตถุทำงานต่อเนื่องกันด้วยกำลังเต็มที่ - ยกเลิกการทำลดองเค็มเครื่อง การเค็มเครื่องเปล่า 	กิ้งก่งไอน้ำ นาฬิกาโซลานา
19. การทำงานเป็นช่วง	<ul style="list-style-type: none"> - ทำงานที่อื่นตายด้วยความเร็วสูง 	ฟิล์ม X-ray ที่มีความเร็วสูง หมึก ink jet
20. ทำงานต่อเนื่อง	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งสร้างในทางบวก - กำจัดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยกรรมเข้ากับปัจจัยลบด้านอื่น ๆ - เพิ่มความแข็งแรงให้กับปัจจัยลบจนถึงขีดที่ยืดส่งผลลัพธ์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ความร้อนจากโคมไฟ - การใช้กระดาษให้เพื่อความถี่สูงขุ่นแข็งผิว
21. การปรับทำให้เสร็จ	<ul style="list-style-type: none"> - ประยุกต์หลักการป้อนกลับ หรือถ้ามีการป้อนกลับแล้วให้ย้อนกลับอีกที 	เครื่องปรับอากาศ เทอร์โมสแตท
22. การเปลี่ยนร้ายให้กลายเป็นดี	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้วัตถุตัวกลางเพื่อถ่ายโอนหรือส่งผ่านการกระทำ - นำวัตถุไปต่อกับอีกวัตถุหนึ่งที่สามารถเอาออกได้ง่ายชั่วคราว 	เครื่องหมอบแรง เช่น เฝือก อุปกรณ์หนี
23. การป้อนกลับ	<ul style="list-style-type: none"> - วัตถุควรจะซ่อมแซมตนเองได้ - ใช้ของเสียจากตัวเอง (เช่น วัสดุหรือพลังงาน) เพื่อสร้างงานที่ต้องการ 	ที่เก็บเม็ดแบบขอยัดไม้ค้อนตัว
24. การใช้ตัวกลาง	<ul style="list-style-type: none"> - แทนที่จะใช้วัตถุที่ขยับหรือรอบบางหรือหยาก ใช้ของแข็งแบบง่าย ๆ ราคาถูก - ใช้ภาพเหมือนทางอ้อมที่กว้างวัตถุแทน เพราะสามารถขยายหรือลดขนาดได้ 	หุ่นทดสอบการทรงตัวของรถยนต์
25. การช่วยตัวเอง	<ul style="list-style-type: none"> - ถ้าใช้ภาพเหมือนอยู่แล้ว ให้แทนด้วยของแข็งแบบที่เป็นอินฟราเรดหรืออุลตราไวโอเล็ต 	Rapid prototyping การหล่อแบบทราย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)
หลักการประดิษฐ์คิดค้น (Inventive Principles)

หลักการประดิษฐ์คิดค้น	คำอธิบาย	ตัวอย่าง
27. การเลือกอายุการใช้งานตำแหน่ง	- ใช้วัสดุราคาถูก / อายุสั้นหลาย ๆ ชิ้น แทนวัสดุราคาแพง / อายุยืน	กระดาษ ปากกาถูกสิ้น ฝาซ่อมสำเร็จรูป
28. การจัดระบบทางกล	- ใช้ระบบของเพติก ระบบพอดูสติค หรือระบบกลิ้ง แทนระบบทางกล - ใช้สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก หรืออิเล็กทรอนิกส์ในการปฏิสัมพันธ์กับวัตถุ - เปลี่ยนจากสนามหยุดนิ่ง (stationary fields) เป็นสนามเคลื่อนที่ และจากไม่เป็นระบบไปสู่เป็นระบบ	CD ไม่โคจรเทพ
29. การใช้ระบบนิวแมติกส์หรือไฮดรอลิก	- ใช้ส่วนของวัตถุที่เป็นแก๊สหรือของเหลว แทนส่วนที่เป็นของแข็ง - เพราะสามารถใช้อากาศหรือน้ำเพื่อดันให้ขยายตัวได้	พวงมาลัยเพาเวอร์ พลาสติกห่อของแบบมีฟองอากาศ
30. การใช้เยื่อหุ้มหรือเยื่อบางละเอียด	- ลองใช้เยื่อหุ้ม (flexible membrane) หรือฟิล์มบางแทนโครงสร้างเดิม - แยกวัตถุจากสิ่งแวดล้อมด้วยฟิล์มหรือเยื่อบาง	บอลลูนสำหรับความสูงหลายๆ เดินที่โดม
31. การใช้วัสดุพูน	- ทำให้วัตถุพูนหรือใช้ชิ้นส่วนที่มีรูพูน เช่น ฝา ตัวสอด (insert) - ถ้าวัตถุมีความพูนอยู่แล้ว ให้เติมรูด้วยสสารอย่างใดอย่างหนึ่งล่วงหน้า	พื้นรองเท้าวิ่ง โลหะผสม
32. การใช้สี	- เปลี่ยนสีหรือระดับความโปร่งแสงของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อม - เดิมสารให้สีเพื่อสังเกตวัตถุหรือกระบวนการ - ถ้าใช้สารให้สีอยู่แล้ว ลองใช้สารเรืองแสง	พลาสติกอโรไบปิดแผล สัญญาณจราจร
33. ความเป็นเนื้อเดียว	- วัตถุที่ต่อปฏิสัมพันธ์กันควรทำด้วยวัสดุชนิดเดียว หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน	เพลลา แมริง
34. การทิ้งและสร้างใหม่	- ถ้าชิ้นส่วนหนึ่งทำงานสำเร็จและไม่จำเป็นแล้ว ควรทำให้หายไปหรือกำจัดโดยอัตโนมัติ เช่น ระเบิดหรือเปลี่ยนรูปร่าง - ให้มีการสร้างคืนในส่วนที่จำเป็นต้องใช้	จรวด ปลอกกระสุนดีดออกหลังการยิงเป็น
35. การเปลี่ยนสภาพทางกายภาพ หรือเคมี	- เปลี่ยนสภาพของวัตถุ ความหนาแน่น ความยืดหยุ่น อุณหภูมิ เช่น ของแข็งเป็นของเหลว	ถุงความร้อน (Heat pack) แฟงจุดไฟ
36. การเปลี่ยนเฟส	- ใช้ปรากฏการณ์ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ เช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น	เครื่องดับเพลิง พิวส์ที่มีไส้
37. การขยายตัวโดยใช้ความร้อน	- ใช้ประโยชน์จากการขยายตัวหรือหดตัวของวัสดุด้วยความร้อน - ใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยความร้อนต่างกัน	เทอร์มิสเตอร์
38. การใส่สารออกซิเจนหรือเพิ่มชั้น	- แทนที่อากาศด้วยออกซิเจนเพิ่มชั้น หรือ แทนอากาศชั้นต้นด้วยออกซิเจน - นำอากาศหรือออกซิเจนไปผ่านกระบวนการ ionizing radiation - ใช้ ionizing oxygen หรือ โอโซน	การเติมออกซิเจนให้คูปเบิลิ่ง แทนอากาศปกติ เดทขึ้นรูปโลหะ
39. การใช้สภาพบรรยากาศลอย	- แทนที่บรรยากาศปกติด้วยก๊าซเฉื่อยหรือสูญญากาศ	กระป๋องน้ำอัดลม หลอดไฟ
40. การใช้วัสดุผสม	- เปลี่ยนจากวัสดุเนื้อเดียวเป็นวัสดุผสม (composite materials)	ปีกเครื่องบินรบ

ที่มา : มณฑล 2546, น. 145-148

ตารางที่ 2.3
ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	น้ำหนักของวัตถุที่เคลื่อนที่	น้ำหนักของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่	ความยาวของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	พื้นที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่	พื้นที่ของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ปริมาตรของวัตถุที่เคลื่อนที่	ปริมาตรของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ความเร็ว	แรง	ความตึง แรงดัน	รูปร่าง	ความเสถียรของวัตถุ
1	น้ำหนักของวัตถุที่เคลื่อนที่		15,8, 19,34		29,17, 38,34		29, 2, 40,28		2, 8, 15,38	8,10, 18,37	10,36, 37,40	10,14, 35,40	1,35, 19,39
2	น้ำหนักของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่			10, 1, 29,35		35,30, 13,2		5,35, 14,2		8,10, 19,35	13,29, 10,18	13,10, 29,14	26,39, 1,40
3	ความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่	8,15, 29,34			15,17, 4		7,17, 4,35		13,4,8	17,10, 4	1,8,35	1,8, 10,29	1,8, 15,34
4	ความยาวของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่		35,28, 40,29			17,7, 10,40		35,8, 2,14		28,10	1,14, 35	13,14, 15,7	39,37, 35
5	พื้นที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่	2,17, 29,4		14,15, 18,4			7,14, 17,4		29,30, 4,34	19,30, 35,2	10,15, 36,28	5,34, 29,4	11,2, 13,39
6	พื้นที่ของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่		30,2, 14,18		26,7, 9,39					1,18, 10,15, 35,36	10,15, 36,37		2,38
7	ปริมาตรของวัตถุที่เคลื่อนที่	2,26, 29,40		1,7, 4,35		1,7, 4,17			29,4, 38,34	15,35, 36,37	6,35, 36,37	1,15, 29,4	28,10, 1,39
8	ปริมาตรของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่		35,10, 19,14	19,14	35,8,2, 14					2,18, 37	24,35	7,2,35	34,28, 35,40
9	ความเร็ว	2,28, 13,38		13,14, 8		29,30, 34		7,29, 34		13,28, 15,12	6,18, 38,40	35,15, 18,34	28,33, 1,18
10	แรง	8,1,37, 18	18,13, 1,28	17,19, 9,36	28,10	19,10, 15	1,18, 36,37	15,9, 12,37	2,36, 18,37	13,28, 15,12		18,21, 40,34	10,35, 21
11	ความตึง แรงดัน	10,36, 37,40	13,29, 10,18	35,10, 36	35,1, 14,16	10,15, 36,25	10,15, 35,37	6,35, 10	35,24	6,35, 36	6,35, 21		35,4, 15,10
12	รูปร่าง	8,10, 29,40	15,10, 26,3	29,34, 5,4	13,14, 10,7	5,34,4, 10		14,4,1, 5,22	7,2,35	35,15, 34,18	35,10, 37,40	34,15, 10,14	33,1, 18,4
13	ความเสถียรของวัตถุ	21,35, 2,39	26,39, 1,40	13,15, 1,28	37	2,11, 13	39	28,10, 19,39	34,28, 35,40	33,15, 28,18	10,35, 21,16	2,35, 40	22,1, 18,4
14	ความแข็งแรง	1,8,40, 15	40,26, 27,1	1,15, 8,35	15,14, 28,26	3,34, 40,29	9,40, 28	10,15, 14,7	9,14, 17,15	8,13, 26,14	10,18, 3,14	10,3, 18,40	10,30, 35,40
15	ความทนทานของวัตถุที่เคลื่อนที่	19,5, 34,31		2,19,9		3,17, 19		10,2, 19,30		3,35,5	19,2, 16	19,3, 27	14,26, 28,25
16	ความทนทานของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่		6,27, 19,16		1,10, 35				35,34, 38				39,3, 35,23
17	อุณหภูมิ	36,22, 6,38	22,35, 32	15,19, 9	15,19, 9	3,35, 39,18	35,38	34,39, 40,18	35,6,4	2,28, 36,30	35,10, 3,21	35,39, 19,2	14,22, 19,32
18	ความสว่าง	19,1, 32	2,35, 32	19,32, 16		19,32, 26		2,13, 10		10,13, 19	16,19, 6		32,30
19	พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่เคลื่อนที่	12,18, 28,31		12,28		15,19, 25		35,13, 18		8,15, 35	16,26, 21,2	23,14, 25	12,2, 29
20	พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่		19,9, 6,27							36,37			27,4, 29,18

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)
ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	ความแข็งแรง	ความทนทานของวัตถุเคลื่อนที่	ความทนทานของวัตถุไม่เคลื่อนที่	อุณหภูมิ	ความสว่าง	พลังงานที่ใช้กับวัตถุเคลื่อนที่	พลังงานที่ใช้กับวัตถุไม่เคลื่อนที่	กำลัง	การสิ้นเปลืองพลังงาน	การสิ้นเปลืองสาร	การสูญเสียข้อมูลทางสาร	การสิ้นเปลืองเวลา	ปริมาณของสาร		
1	น้ำหนักของวัตถุเคลื่อนที่	28,27, 18,40	5,34, 31,35		6,20, 4,38	19,1, 32	35,12, 34,31		12,36, 18,31	6,2,34, 19	5,35,3, 31	10,24, 35	10,35, 20,28	3,26, 18,31	
2	น้ำหนักของวัตถุไม่เคลื่อนที่	28,2, 10,27		2,27, 19,6	28,19, 32,22	19,32, 35		18,19, 28,1	15,19, 18,22	18,19, 28,15	5,8,13, 30	10,15, 35	10,20, 35,26	19,6, 18,26	
3	ความยาวของวัตถุเคลื่อนที่	8,35, 29,34	19		10,15, 19	32	8,35, 24		1,35	7,2,35, 39	4,29, 23,10	1,24	15,2, 29	19,35	
4	ความยาวของวัตถุไม่เคลื่อนที่	15,14, 28,26		1,40, 35	3,35, 38,13	3,25			12,8	6,28	10,28, 24,35	24,26	30,29, 14		
5	พื้นที่ของวัตถุเคลื่อนที่	3,15, 40,14	6,3		2,15, 16	15,32, 19,13	19,32		19,10, 32,18	15,17, 30,26	10,35, 2,39	30,26	26,4	29,30, 6,13	
6	พื้นที่ของวัตถุไม่เคลื่อนที่	40		2,10, 19,30	35,39, 38				17,32	17,7, 30	10,14, 18,39	30,16	10,35, 4,18	2,18, 40,4	
7	ปริมาตรของวัตถุเคลื่อนที่	9,14, 15,7	6,35,4		34,39, 10,18	2,13, 10	35		35,6, 13,18	7,15, 13,16	36,39, 34,10	2,22	2,6,34, 10	29,30, 7	
8	ปริมาตรของวัตถุไม่เคลื่อนที่	9,14, 17,8		35,34, 38	35,6,4				30,6		10,39, 35,34		35,16, 32,18	35,3	
9	ความเร็ว	8,3,26, 14	3,19, 35,5		28,30, 36,2	10,13, 19	8,15, 35,38		19,35, 38,2	14,20, 19,35	10,13, 28,38	13,26		18,19, 29,38	
10	แรง	35,10, 14,27	19,2		35,10, 21		19,17, 10	1,16, 36,37	19,35, 18,37	14,15	8,35, 40,5		10,37, 36	14,29, 18,36	
11	ความตึง แรงดัน	9,18, 3,40	19,3, 27		35,39, 19,2		14,24, 10,37		10,35, 14	2,36, 25	10,36, 3,37		37,36, 4	10,14, 36	
12	รูปร่าง	30,14, 10,40	14,26, 9,25		22,14, 19,32	13,15, 32	2,6,34, 14		4,6,2	14	35,29, 3,5		14,10, 34,17	36,22	
13	ความเสถียรของวัตถุ	17,9, 15	13,27, 10,35	39,3, 35,23	35,1, 32	32,3, 27,15	13,19	27,4, 29,18	32,35, 27,31	14,2, 39,6	2,14, 30,40		35,27	15,32, 35	
14	ความแข็งแรง		27,3, 26		30,10, 40	35,19	19,35, 10	35	10,26, 35,28	35	35,28, 31,40		29,3, 28,10	29,10, 27	
15	ความทนทานของวัตถุเคลื่อนที่	27,3, 10			19,35, 39	2,19, 4,35	28,6, 35,18		19,10, 35,38		28,27, 3,18	10	20,10, 28,18	3,35, 10,40	
16	ความทนทานของวัตถุไม่เคลื่อนที่				19,18, 36,40				16		27,16, 18,38	10	28,20, 10,16	3,35, 31	
17	อุณหภูมิ	10,30, 22,40	19,13, 39	19,18, 36,40		32,30, 21,16	19,15, 3,17		2,14, 17,25	21,17, 35,38	21,36, 29,31		35,28, 21,18	3,17, 30,39	
18	ความสว่าง	35,19	2,19,6		32,35, 19		32,1, 19	32,35, 1,15	32	19,16, 1,6	13,1	1,6	19,1, 26,17	1,19	
19	พลังงานที่ใช้กับวัตถุเคลื่อนที่	5,19, 9,35	28,35, 6,18		19,24, 3,14	2,15, 19			6,19, 37,18	12,22, 15,24	35,24, 18,5		35,38, 19,18	34,23, 16,18	
20	พลังงานที่ใช้กับวัตถุไม่เคลื่อนที่	35				19,2, 35,32					28,27, 18,31			3,35, 31	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	ความน่าเชื่อถือ	ความแม่นยำของกรวัด	ความแม่นยำของการผลิต	ปัจจัยที่เป็นโทษที่มีต่อวัตถุ	ผลกระทบที่เป็นโทษ	ความสามารถในการผลิตได้	ความสะดวกในการใช้งาน	ความเหมาะสมในการซ่อมแซม	ความเหมาะสมในการปรับเปลี่ยน	ความซับซ้อนของอุปกรณ์	ความซับซ้อนของการควบคุม	ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ	ผลผลิต		
1	น้ำหนักของวัตถุที่เคลื่อนที่	3,11, 1,27	28,27, 35,26	28,35, 26,18	22,21, 18,27	22,35, 31,39	27,28, 1,36	35,3, 2,24	2,27, 28,11	29,5, 15,8	26,30, 36,34	28,29, 26,32	26,35, 18,19	35,3, 24,37	
2	น้ำหนักของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	10,28, 8,3	18,26, 28	10,1, 35,17	2,19, 22,37	35,22, 1,39	28,1,9	6,13,1, 32	2,27, 28,11	19,15, 29	1,10, 26,39	25,28, 17,15	2,26, 35	1,28, 15,35	
3	ความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่	10,14, 29,40	28,32, 4	10,28, 29,37	1,15, 17,24	17,15	1,29, 17	15,29, 35,4	1,28, 10	14,15, 1,16	1,19, 26,24	35,1, 26,24	17,24, 26,16	14,4, 28,29	
4	ความยาวของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	15,29, 28	32,38, 3	2,32, 10	1,18		15,17, 27	2,25	3	1,35	1,26	26		30,14, 7,26	
5	พื้นที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่	29,9	26,28, 32,3	2,32	22,33, 28,1	17,2, 18,39	13,1, 26,24	15,17, 13,19	15,13, 10,1	15,30	14,1, 13	2,36, 26,18	14,30, 28,23	10,26, 34,2	
6	พื้นที่ของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	32,35, 40,4	26,28, 32,3	2,29, 18,36	27,2, 39,35	22,1, 40	40,16	16,4	16	15,16	1,18, 36	2,35, 30,18	23	10,15, 17,7	
7	ปริมาตรของวัตถุที่เคลื่อนที่	14,1, 40,11	25,26, 28	25,28, 2,16	22,21, 27,35	17,2, 40,1	29,1, 40	15,13, 30,12	10	15,29	26,1	29,26, 4	35,34, 16,24	10,6, 2,34	
8	ปริมาตรของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	2,35, 16		35,10, 25	34,39, 19,27	30,18, 35,4	35		1		1,31	2,17, 26		35,37, 10,2	
9	ความเร็ว	11,35, 27,28	28,32, 1,24	10,28, 32,35	1,28,3 5,23	2,24, 35,21	35,13, 8,1	32,28, 13,12	34,2, 28,27	15,10, 26	10,28, 4,34	3,34, 27,16	10,18		
10	แรง	3,35, 13,21	35,10, 23,24	28,29, 37,36	1,35, 40,18	13,3, 36,24	15,37, 18,1	1,28, 3,25	15,1, 11	15,17, 18,20	26,35, 10,18	36,37, 10,19	2,35	2,28,3 5,37	
11	ความตึง แรงดัน	10,13, 19,35	6,28, 25	3,35	22,2, 37	2,33, 27,18	1,35, 16	11	2	35	19,1, 35	2,36, 37	35,24	10,14, 35,37	
12	รูปร่าง	10,40, 16	28,32, 1	32,30, 40	22,1, 2,35	35,1	1,32, 17,28	32,15, 26	2,13,1	1,15, 29	16,29, 1,28	15,13, 39	15,1, 32	17,26, 34,10	
13	ความเสถียรของวัตถุ		13	18	35,24, 30,18	35,40, 27,39	35,19	32,35, 30	2,35, 10,16	35,30, 34,2	2,35, 22,26	35,22, 39,23	1,8,35	23,25, 40,3	
14	ความแข็งแรง	11,3	3,27, 16	3,27	18,35, 37,1	15,35, 22,2	11,3, 10,32	32,40, 28,2	27,11, 3	15,3, 32	2,13, 28	27,3, 15,40	15	29,35, 10,14	
15	ความทนทานของวัตถุที่เคลื่อนที่	11,2, 13	3	3,27, 16,40	22,15, 33,28	21,39, 16,22	27,1,4	12,27	29,10, 27	1,35, 13	10,4, 29,15	19,29, 39,35	6,10	35,17, 14,19	
16	ความทนทานของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	34,27, 6,40	10,26, 24		17,1, 40,33	22	35,10	1	1	2		25,34, 6,35	1	10,20, 16,38	
17	อุณหภูมิ	19,35, 3,10	32,19, 24	24	22,33, 35,2	22,35, 2,24	26,27	26,27	4,10, 16	2,18, 27	2,17, 16	3,27, 35,31	26,2, 19,16	15,28, 35	
18	ความสว่าง		11,15, 32	3,32	15,19	35,19, 32,39	19,35, 28,26	28,26, 19	15,17, 13,16	15,1, 19	6,32, 13	32,15	2,26, 10	2,25,1 6	
19	พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่เคลื่อนที่	19,21, 11,27	3,1,32		1,35, 6,27	2,35,6	28,26, 30	19,35	1,15, 17,28	15,17, 13,16	2,29, 27,28	35,38	32,2	12,28, 35	
20	พลังงานที่ใช้กับวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	10,36, 23			10,2, 22,37	19,22, 18	1,4					19,35, 16,25		1,6	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	น้ำหนักของวัตถุที่เคลื่อนที่	น้ำหนักของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่	ความยาวของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	พื้นที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่	พื้นที่ของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ปริมาตรของวัตถุที่เคลื่อนที่	ปริมาตรของวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่	ความเร็ว	แรง	ความตึง แแรงดัน	รูปร่าง	ความเสถียรของวัตถุ	
21	กำลัง	8,36, 38,31	19,26, 17,27	1,10, 35,27		19,38	17,32, 13,38	35,6, 38	30,6, 25	15,35, 2	26,2, 36,35	22,10, 35	29,14, 2,40	35,32, 15,31
22	การสิ้นเปลืองพลังงาน	15,6, 19,28	19,6, 18,9	7,2,6, 13	6,38,7	15,26, 17,30	17,7, 30,18	7,18, 23	7	16,35, 38	36,38			14,2, 39,6
23	การสิ้นเปลืองสสาร	35,6, 23,40	35,6, 22,32	14,29, 10,39	10,28, 24	35,2, 10,31	10,18, 39,31	1,29, 30,36	3,39, 18,31	10,13, 28,38	14,15, 18,40	3,36, 37,10	29,35, 3,5	2,14, 30,40
24	การสูญเสียข้อมูลข่าวสาร	10,24, 35	10,35, 5	1,26	26	30,26	30,16		2,22	26,32				
25	การสิ้นเปลืองเวลา	10,20, 37,35	10,20, 26,5	15,2, 29	30,24, 14,5	26,4,5, 16	10,35, 17,4	2,5,34, 10	35,16, 32,18		10,37, 36,5	37,36, 4	4,10,3, 4,17	35,3, 22,5
26	ปริมาณของสสาร	35,6, 18,31	27,26, 18,35	29,14, 35,18		15,14, 29	2,18, 40,4	15,20, 29		35,29, 34,28	35,14, 3	10,36, 14,3	35,14	15,2, 17,40
27	ความน่าเชื่อถือ	3,8,10, 40	3,10,8, 28	15,9, 14,4	15,29, 28,11	17,10, 14,16	32,35, 40,4	3,10, 14,24	2,35, 24	21,35, 11,28	8,28, 10,3	10,24, 35,19	35,1, 16,11	
28	ความแม่นยำของการวัด	32,35, 26,28	28,35, 25,26	28,26, 5,16	32,28, 3,16	26,28, 32,3	26,28, 32,3	32,13, 6		28,13, 32,24	32,2	6,28, 32	6,28, 32	32,35, 13
29	ความแม่นยำของการผลิต	28,32, 13,18	28,35, 27,9	10,28, 29,37	2,32, 10	28,33, 29,32	2,29, 18,36	32,28, 2	25,10, 35	10,28, 32	28,19, 34,36	3,35	32,30, 40	30,18
30	ปัจจัยที่เป็นโทษที่มีต่อวัตถุ	22,21, 27,29	2,22, 13,24	17,1, 39,4	1,18	22,1, 33,28	27,2, 39,35	22,23, 37,35	34,39, 19,27	21,22, 35,28	13,35, 39,18	22,2, 37	22,1, 3,35	35,24, 30,18
31	ผลกระทบที่เป็นโทษ	19,22, 15,39	35,22, 1,39	17,15, 16,22		17,2, 18,39	22,1, 40	17,2, 40	30,18, 35,4	35,28, 3,23	35,28, 1,40	2,33, 27,18	35,1	35,40, 27,39
32	ความสามารถในการผลิตได้	28,29, 15,16	1,27, 36,13	1,29,1 3,17	15,17, 27	13,1, 26,12	16,40	13,29, 1,40	35	35,13, 8,1	35,12	35,19, 1,37	1,28, 13,27	11,13, 1
33	ความสะดวกในการใช้งาน	25,2, 13,5	6,13, 1,25	1,17, 13,12		1,17, 13,16	18,16, 15,39	1,16, 35,15	4,18, 39,15	18,13, 34	28,13, 35	2,32, 12	15,34, 29,28	32,35, 30
34	ความสามารถในการซ่อมแซม	2,27, 35,11	2,27, 35,11	1,28, 10,25	3,18, 31	15,13, 32	16,25	25,2, 35,11	1	34,9	1,11, 10	13	1,13, 2,4	2,35
35	ความสามารถในการปรับเปลี่ยน	1,6,15, 8	19,15, 29,16	35,1, 29,2	1,35, 16	35,30, 29,7	15,16	15,35, 29		35,10, 14	15,17, 20	35,16	15,37, 1,8	35,30, 14
36	ความซับซ้อนของอุปกรณ์	26,30, 34,36	2,36, 35,39	1,19, 26,24	26	14,1, 13,16	6,36	34,25, 6	1,16	34,10, 28	26,16	19,1, 35	29,13, 28,15	2,22, 17,19
37	ความซับซ้อนของการควบคุม	27,26, 28,13	6,13, 28,1	16,17, 26,24	26	2,13, 15,17	2,39, 30,16	29,1, 4,16	2,18, 26,31	3,4, 16,35	36,28, 40,19	35,36, 37,32	27,13, 1,39	11,22, 39,30
38	ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ	28,26, 18,35	28,26, 35,10	14,13, 17,18	23	17,14, 13		35,13, 16		28,10	2,35	13,35	15,32, 1,13	18,1
39	ผลผลิต	35,26, 24,37	28,27, 15,3	18,4, 28,38	30,7, 14,26	10,26, 34,31	10,35, 17,7	2,6,34, 10	35,37, 10,2		28,15, 10,36	10,37, 14	14,10, 34,40	35,3, 22,39

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)
ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	ความแข็งแรง	ความทนทานของวัสดุที่เคลื่อนที่	ความทนทานของวัสดุที่ไม่เคลื่อนที่	อุณหภูมิ	ความสว่าง	พลังงานที่ใช้กับวัสดุที่เคลื่อนที่	พลังงานที่ใช้กับวัสดุที่ไม่เคลื่อนที่	กำลัง	การสิ้นเปลืองพลังงาน	การสิ้นเปลืองวัสดุ	การสูญเสียข้อมูลข่าวสาร	การสิ้นเปลืองเวลา	ปริมาณของวัสดุ		
21	กำลัง	26,10, 28	19,35, 10,38	16	2,14, 17,25	16,6, 19	16,6, 19,37				10,35, 38	28,27, 18,38	10,19	35,20, 10,6	4,34, 19
22	การสิ้นเปลืองพลังงาน	26			19,38, 7	1,13, 32,15				3,38		35,27, 2,37	19,10	10,18, 32,7	7,18, 25
23	การสิ้นเปลืองสสาร	35,28, 31,40	28,27, 3,18	27,16, 18,38	21,36, 39,31	1,6,13	35,18, 24,5	28,27, 12,31	28,27, 18,38	35,27, 2,31			15,18, 35,10	6,3, 10,24	
24	การสูญเสียข้อมูลข่าวสาร		10	10		19				10,19	19,10		24,26, 28,32	24,28, 35	
25	การสิ้นเปลืองเวลา	29,3, 28,18	20,10, 28,18	28,20, 10,16	35,29, 21,18	1,19, 26,17	35,38, 16,18	1	35,20, 10,6	10,5,1, 8,32	35,18, 10,39	24,26, 28,32		35,38, 18,16	
26	ปริมาณของสสาร	14,35, 34,10	3,35, 10,40	3,35, 31	3,17, 39		34,29, 16,18	3,35, 31	35	7,18, 25	6,3,10, ,24	24,28, 35	35,38, 18,16		
27	ความน่าเชื่อถือ	11,28	2,35, 3,25	34,27, 6,40	3,35, 10	11,32, 13	21,11, 27,19	36,23	21,11, 26,31	10,11, 35	10,35, 29,39	10,28	10,30, 4	21,28, 40,3	
28	ความแม่นยำของการวัด	28,6, 32	28,6, 32	10,26, 24	6,19, 28,24	6,1,32	3,6,32		3,6,32	26,32, 27	10,16, 31,28		24,34, 28,32	2,6,32	
29	ความแม่นยำของการผลิต	3,27	3,27,4 0		19,26	3,32	32,2		32,2	13,32, 2	35,31, 10,24		32,26, 28,18	32,30	
30	ปัจจัยที่เป็นโทษที่มีต่อวัสดุ	18,35, 37,1	22,15, 33,28	17,1, 40,33	22,33, 35,2	1,19, 32,13	1,24,6 ,27	10,2, 22,37	19,22, 31,2	21,22, 35,2	33,22, 19,40	22,10, 2	35,18, 34	35,33, 29,31	
31	ผลกระทบที่เป็นโทษ	15,35, 22,2	15,22, 33,31	21,39, 16,22	22,35, 2,24	19,24, 39,32	2,35,6	19,22, 18	2,35, 18	21,35, 2,22	10,1, 34	10,21, 29	1,22	3,24, 39,1	
32	ความสามารถในการผลิตได้	1,3,10 ,32	27,1,4	35,16	27,26, 18	28,24, 27,1	28,26, 27,1	1,4	27,1, 12,24	19,35	15,34, 33	32,24, 18,16	35,28, 34,4	35,23, 1,24	
33	ความสะดวกในการใช้งาน	32,40, 3,28	29,3, 8,25	1,16, 25	26,27, 13	13,17, 1,24	1,13, 24		35,34, 2,10	2,19, 13	28,32, 2,24	4,10, 27,22	4,28, 10,34	12,35	
34	ความสามารถในการซ่อมแซม	11,1, 2,9	11,29, 28,27	1	4,10	15,1, 13	15,1, 28,16		15,10, 32,2	15,1, 32,19	2,35, 34,27		32,1, 10,25	2,28, 10,25	
35	ความสามารถในการปรับเปลี่ยน	35,3, 32,6	13,1, 35	2,16	27,2, 3,35	6,22, 26,1	19,35, 29,13		19,1, 29	18,15, 1	15,10, 2,13		35,28	3,35, 15	
36	ความซับซ้อนของอุปกรณ์	2,13, 28	10,4, 28,15		2,17, 13	24,17, 13	27,2, 29,28		20,19, 30,34	10,35, 13,2	35,10, 28,29		6,29	13,3, 27,10	
37	ความซับซ้อนของการควบคุม	27,3, 15,28	19,29, 39,25	25,24, 6,35	3,27, 35,16	2,24, 26	35,38	19,35, 16	19,1, 16,10	35,3, 15,19	1,13, 10,24	35,33, 27,22	18,28, 32,9	3,27, 29,18	
38	ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ	25,13	6,9		26,2, 19	8,32, 19	2,32, 13		28,2, 27	23,28	35,10, 18,5	35,33	24,28, 35,30	35,13	
39	ผลผลิต	29,28, 10,18	35,10, 2,18	20,10, 16,38	35,21, 28,10	26,17, 19,1	35,10, 38,19	1	35,20, 10	28,10, 29,35	28,10, 35,23	13,15, 23		35,28	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)
ตารางความขัดแย้งทางเทคนิค

ลักษณะ ที่ต้องเปลี่ยนแปลง	ผลกระทบที่ ไม่พึงปรารถนา (ความขัดแย้ง)													
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
	ความน่าเชื่อถือ	ความแม่นยำของการวัด	ความแม่นยำของการผลิต	ปัจจัยที่เป็นโทษที่มีต่อวัตถุ	ผลกระทบที่เป็นโทษ	ความสามารถในการผลิตได้	ความสะดวกในการใช้งาน	ความสามารถในการซ่อมแซม	ความสามารถในการปรับเปลี่ยน	ความซับซ้อนของอุปกรณ์	ความซับซ้อนของการควบคุม	ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ	ผลผลิต	
21	กำลัง	19,24, 26,31	32,15, 2	32,2	19,22, 31,2	2,35, 18	26,10, 34	26,35, 10	35,2, 10,34	19,17, 34	20,19, 30,34	19,35, 16	28,2, 17	28,35, 34
22	การสิ้นเปลืองพลังงาน	11,10, 35	32		21,22, 35,2	21,35, 2,22		35,22, 1	2,19		7,23	35,3, 15,23	2	28,10, 29,35
23	การสิ้นเปลืองสสาร	10,29, 39,35	16,34, 31,28	35,10, 24,31	33,22, 30,40	10,1, 34,29	15,34, 33	32,28, 2,24	2,35, 34,27	15,10, 2	35,10, 28,24	35,18, 10,13	35,10, 18	28,35, 10,23
24	การสูญเสียข้อมูลข่าวสาร	10,28, 23			22,10, 1	10,21, 22	32	27,22				35,33	35	13,23, 15
25	การสิ้นเปลืองเวลา	10,30, 4	24,34, 28,32	24,26, 28,18	35,18, 34	35,22, 18,39	35,28, 34,4	4,28,1, 0,34	32,1, 10	35,28	6,29	18,28, 32,10	24,28, 35,30	
26	ปริมาณของสสาร	18,3, 28,40	13,2, 28	33,30	35,33, 29,31	3,35, 40,39	29,1, 35,27	35,29, 25,10	2,32, 10,25	15,3, 29	3,13, 27,10	3,27, 29,18	8,35	13,29, 3,27
27	ความน่าเชื่อถือ		32,3, 11,23	11,32, 1	27,35, 2,40	35,2, 40,26		27,17, 40	1,11	13,35, 8,24	13,35, 1	27,40, 28	11,13, 27	1,35, 29,38
28	ความแม่นยำของการวัด	5,11, 1,23			28,24, 22,26	3,33, 39,10	6,35, 25,18	1,13, 17,34	1,32, 13,11	13,35, 2	27,35, 10,34	26,24, 32,28	28,2, 10,34	10,34, 28,32
29	ความแม่นยำของการผลิต	11,32, 1			26,28, 10,36	4,17, 34,26		1,32, 35,23	25,10		26,2, 18		26,28, 18,23	10,18, 32,39
30	ปัจจัยที่เป็นโทษที่มีต่อวัตถุ	27,24, 2,40	28,33, 23,26	26,28, 10,18			24,35, 2	2,25, 28,29	35,10, 2	35,11, 22,31	22,19, 29,40	22,19, 29,40	33,3, 34	22,35, 13,24
31	ผลกระทบที่เป็นโทษ	24,2, 40,39	3,33, 26	4,17, 34,26							19,1, 31	2,21, 27,1	2	22,35, 18,39
32	ความสามารถในการผลิตได้		1,35, 12,18		24,2			2,5,13, 16	35,1, 11,9	2,13, 15	27,26, 1	6,28, 11,1	8,28,1	35,1, 10,28
33	ความสะดวกในการใช้งาน	17,27, 8,40	25,13, 2,34	1,32, 35,23	2,25, 28,39		2,5,12		12,26, 1,32	15,34, 1,16	32,26, 12,17		1,34, 12,3	15,1, 28
34	ความสามารถในการซ่อมแซม	11,10, 1,16	10,2, 13	25,10	35,10, 2,16		1,35, 11,10	1,12, 26,15		7,1,4, 16	35,1, 13,11		34,35, 7,13	1,32, 10
35	ความสามารถในการปรับเปลี่ยน	35,13, 8,24	35,5, 1,10		35,11, 32,31		1,13, 31	15,34, 1,16	1,16,7, 4		15,29, 37,28	1	27,34, 35	35,28, 6,37
36	ความซับซ้อนของอุปกรณ์	13,35, 1	2,26, 10,34	26,24, 32	22,19, 29,40	19,1	27,26, 1,13	27,9, 26,24	1,13	29,15, 28,37		15,10, 37,28	15,1, 24	12,17, 28
37	ความซับซ้อนของการควบคุม	27,40, 28,8	26,24, 32,28		22,19, 29,28	2,21	5,28, 11,29	2,5	12,26	1,15	15,10, 37,28		34,21	35,18
38	ระดับการเป็นระบบอัตโนมัติ	11,27, 32	28,26, 10,34	28,26, 18,23	2,33	2	1,26, 13	1,12, 34,3	1,35, 13	27,4, 1,35	15,24, 10	34,27, 25		5,12, 35,26
39	ผลผลิต	1,35, 10,38	1,10, 34,28	18,10, 32,1	22,35, 13,24	35,22, 18,39	35,28, 2,24	1,28, 7,19	1,32, 10,25	1,35, 28,37	12,17, 28,24	35,18, 27,2	5,12, 35,26	

การแกะแบบผลิตภัณฑ์ (Product Teardown) เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ช่วยให้เราเข้าใจหลักการทางวิศวกรรมที่อยู่เบื้องหลังของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดโอกาสด้านความคิดสร้างสรรค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วย ทำให้ได้ศึกษาและวิเคราะห์หน้าที่การทำงานของชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อที่จะหาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ช่วยเปรียบเทียบคู่แข่ง และทำให้เกิดแนวทางใหม่ๆ ในการออกแบบ

การออกแบบมักประสบความยุ่งยากในการเชื่อมความต้องการ และข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์เข้ากับประเด็นต่างๆ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดเทคนิค “การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อ X โดยที่ X เป็นหนึ่งในเกณฑ์คุณภาพต่างๆ เช่น หน้าที่การทำงาน ความน่าเชื่อถือ ความทนทาน สิ่งแวดล้อม การผลิตและการประกอบ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้แบบของผลิตภัณฑ์เพื่อสนองความต้องการและความพึงพอใจของลูกค้า ส่วนการออกแบบเพื่อการผลิตและประกอบจะทำให้ลดต้นทุนของผู้ประกอบการ

สิ่งที่จำเป็นต่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อีกอย่างหนึ่ง คือ การสร้างต้นแบบประโยชน์ของต้นแบบ ใช้เพื่อการเรียนรู้ , การสื่อสารระหว่างฝ่ายต่างๆ , ทดสอบการทำงานร่วมกันของชิ้นส่วน และการเน้นเป้าหมายโดยต้นแบบจะถูกทดสอบว่าได้ค่าเป้าหมายตามระดับที่ต้องการหรือไม่

ต้นแบบเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบและเป็นส่วนสนับสนุนการออกแบบนวัตกรรม (Innovation) ได้พัฒนาจากการดัดแปลงจากสิ่งที่มีอยู่ให้ดีขึ้นโดยแนวคิดการทดลองและพิสูจน์ความจริง (tried and true) มากกว่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดโดยสิ้นเชิง การดัดแปลงอย่างต่อเนื่องจากจุดเริ่มต้นไปสู่ความสำเร็จและการออกแบบมีความคล้ายคลึงกับการปรับแต่งมากกว่าการประดิษฐ์ทั้งหมด ถึงแม้ว่าผลลัพธ์อาจไม่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้ก็ตาม (Lansdown, 1987, quoted in Bahrami & Dagli, 1993, p.119)

การสร้างต้นแบบประกอบด้วย 3 กิจกรรม ได้แก่ การแก้ไข (Modification), การดัดแปลง (adaptation) และการสร้างสรรค์ (creation) การสร้างสรรค์ต้นแบบ (Prototype creation) เป็นการออกแบบจากจุดเริ่มต้นหรือสิ่งที่คิดขึ้นมาครั้งแรก การแก้ไขต้นแบบ (Prototype modification) ประกอบด้วยการทำงานภายใต้ขอบเขตของการออกแบบงานเฉพาะ การดัดแปลงต้นแบบ (Prototype adaptation) เป็นการขยายขอบเขตของการออกแบบงานเฉพาะ (Bahrami & Dagli, quoted in Parsaei & Sullivan, 1993, p.119)

การสร้างต้นแบบ จะต้องสอดคล้องกับเป้าหมายของโครงการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ มิฉะนั้นจะเป็นการเสียเวลาเปล่า การวางแผนต้นแบบจะกระทำเพื่อกำหนดเป้าหมาย

ของต้นแบบแต่ละชิ้นให้ชัดเจน ก่อนลงมือสร้างและทดสอบ โดยทั่วไปการวางแผนการต้นแบบจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ซึ่งใช้ได้กับต้นแบบทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นวัตถุกายภาพหรือต้นแบบเชิงวิเคราะห์

ขั้นที่ 1 กำหนดวัตถุประสงค์ของต้นแบบ ต้นแบบสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง ได้แก่ การเรียนรู้ การสื่อสาร การทำงานของชิ้นส่วนต่างๆ และการเน้นเป้าหมาย

ขั้นที่ 2 กำหนดระดับการประมาณผลิตภัณฑ์ ในการวางแผนต้นแบบ เราควรกำหนดว่าต้องการให้ต้นแบบประมาณผลิตภัณฑ์มากในระดับใด เช่น จำเป็นต้องใช้ต้นแบบทางกายภาพหรือไม่ หรือต้นแบบเชิงวิเคราะห์ก็เพียงพอ ในกรณีส่วนใหญ่ต้นแบบที่ดีที่สุดคือ ต้นแบบที่ง่ายที่สุดซึ่งจะช่วยให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดในขั้นที่ 1

ขั้นที่ 3 ร่างแผนการทดลอง ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ เรายังพิจารณาว่าการสร้างต้นแบบเปรียบเสมือนการทดลองอย่างไร การทดลองที่ดีจะช่วยสร้างความมั่นใจว่าเราได้ประโยชน์จากกิจกรรมการสร้างต้นแบบมากที่สุด แผนการทดลองควรประกอบด้วยการกำหนดตัวแปรในการทดลอง (ถ้ามี) ลำดับขั้นการทดลอง การวัดค่าต่างๆ และแผนวิเคราะห์การทดลอง ในกรณีต้องศึกษาหลายตัวแปร เราอาจใช้วิธีทางสถิติช่วย เช่น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

ขั้นที่ 4 การกำหนดตารางที่เวลาสำหรับจัดหาวัสดุ การสร้างและการทดสอบต้นแบบ (มณฑล, 2546)

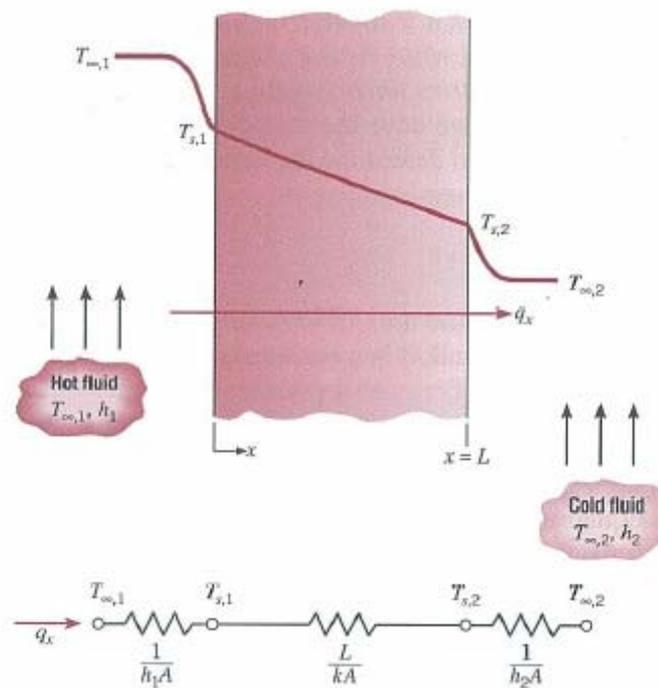
2.2 การถ่ายเทความร้อนกับพลังงานแสงอาทิตย์ (Heat Transfer and Solar Energy)

2.2.1 ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) เป็นความคล้ายคลึงกันระหว่างการแพร่ของความร้อนและประจุไฟฟ้า ไม่เพียงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ความต้านทานทางความร้อนก็เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนเช่นกัน นิยามของความต้านทาน คือ สัดส่วนของความต่างศักย์กับอัตราการถ่ายเท ดังนั้นจึงได้สมการของความต้านทานการนำความร้อน (Thermal resistance for conduction) $R_{t,cond}$ ดังต่อไปนี้

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (2.1)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานการพาความร้อน (Thermal resistance for convection)

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_{\infty}}{q} = \frac{L}{hA} \quad (2.2)$$



ภาพที่ 2.1

Heat transfer through a plane wall (a) Temperature distribution

(b) Equivalent thermal circuit

ในเทอมของความแตกต่างของอุณหภูมิโดยรวม (Overall temperature difference)

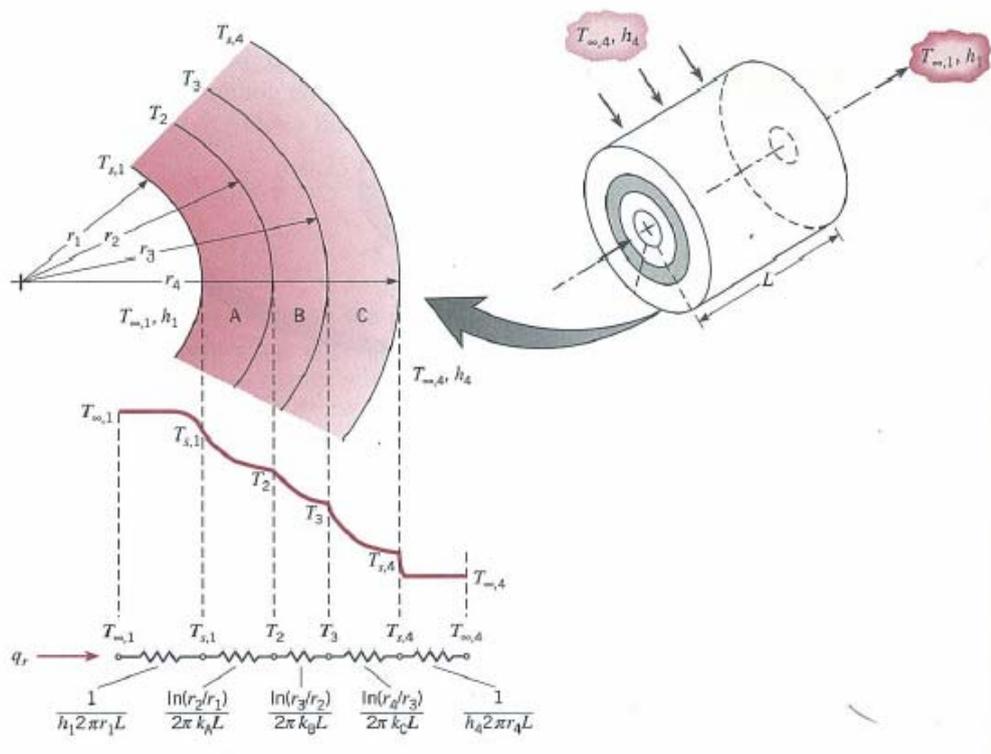
 $T_{\infty,1}$ $T_{\infty,2}$ และความต้านทานทางความร้อน

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (2.3)$$

โดยที่

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{k A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (2.4)$$

(Incropera & Frank P, 1996, pp. 76-78)



ภาพที่ 2.2

Temperature distribution for a composite cylindrical wall

สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของภาชนะทรงกระบอก

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot}} = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,4}) \tag{2.5}$$

โดยที่

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{k_A} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{k_B} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_3}{k_C} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_4}} \tag{2.6}$$

(Incropera & Frank P, 1996, pp. 90-93)

2.2.2 ค่าคงที่การพาความร้อน Convection heat transfer coefficients h_c

(Ursula Eicker, 2003, pp. 89-90)

การพาความร้อนเกิดขึ้นในภาพที่การพาโดยอิสระระหว่างแผ่นดูดซับ (Absorber plate) และกระจกรับแสง (Glazing) และการพาความร้อนโดยกระแสมระหว่าง cover และ

สิ่งแวดล้อม ค่าที่แสดงคุณลักษณะของการพาความร้อนคือ Nuβelt number Nu ซึ่งค่าคงที่การพาความร้อนสามารถคำนวณในฟังก์ชันของความยาว L และการนำความร้อน λ (Heat conductivity) ของอากาศ

$$Nu = \frac{h_c L}{\lambda} \quad (2.7)$$

การพาความร้อนที่บริเวณแผ่นกระจก (Glass cover) ของแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) ส่วนเป็นผลจากกระแสลม ซึ่งเป็นการพาความร้อนโดยแรงภายนอก (Forced convection) อีกส่วนหนึ่งซึ่งน้อยกว่า มาจากการพาความร้อนโดยอิสระ (free convection) ระหว่างพื้นผิวและอุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient temperature) การประมาณค่าการพาความร้อนรวมได้ดังนี้

$$h_c = \sqrt[3]{h_{c,w}^3 + h_{c,free}^3} \quad (2.8)$$

ค่าที่การพาความร้อนโดยกระแสลมคำนวณจากสมการ Nuβelt โดยทิศทางของกระแสลมขนานกับพื้นผิวด้วย turbulent boundary layer

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{\frac{1}{3}} - 1)} \quad (2.9)$$

$$h_{c,w} = \frac{Nu_{turb} \lambda}{L} \quad (2.10)$$

ค่า Reynolds number Re เป็นมาจากความเร็วลม v_w และความยาวของพื้นผิว L ในสภาวะการไหลในแนวขนาน จาก $Re = v_w L / \nu$ สำหรับการแทนค่า ν, ρ, λ, c_p ได้ใช้ค่าของอากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศ

$$h_{c,free} = 1.78 (T_g - T_o)^{1/3} [Wm^{-2}K^{-1}] \quad (2.11)$$

และค่าที่การพาความร้อนโดยกระแสลมได้จาก

$$h_{c,w} = 4.214 + 3.575 v_w \quad (2.12)$$

2.2.3 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์

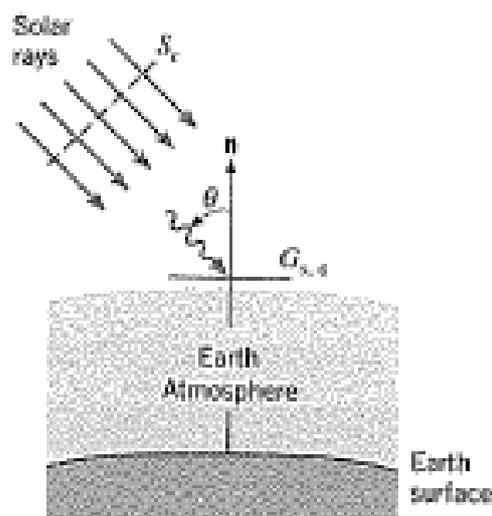
การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) คือ การถ่ายเทพลังงานในลักษณะการส่องผ่านโดยวัตถุที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะมุ่งเน้นการแผ่รังสีจากพื้นผิวของของแข็ง แต่การแผ่รังสีความร้อนก็สามารถเกิดกับวัตถุในสถานะของเหลวหรือก๊าซได้ Emission เกิดจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอิเล็กตรอนภายในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น พลังงานจากสนามการแผ่รังสีจะถูกส่งผ่านโดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Photons) ขณะที่การนำความร้อนและการพา

ความร้อนต้องอาศัยวัสดุที่เป็นตัวกลางหรือสื่อ แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในขณะที่การแผ่รังสีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นในที่ที่เป็นสุญญากาศ

การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation) เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่อยู่บนโลก โดยทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งทำให้เกิดการสร้างอาหาร, โยธรรมชาติและเชื้อเพลิง มากกว่านั้นยังทำให้เกิดความอบอุ่นต่อการดำรงชีวิตและนำหลักการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Photovoltaic) ในการผลิตไฟฟ้า

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดรังสีความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.39×10^9 เมตร โดยมีระยะห่างจากโลกประมาณ 1.5×10^{11} เมตร โดยถือว่าขนาด, ขนาดของคลื่นความถี่และทิศทางของการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบบนพื้นโลก และมีความแตกต่างระหว่างบนพื้นโลกและนอกชั้นบรรยากาศของโลก ถ้าเราวางพื้นผิวในแนวระนาบนอกชั้นบรรยากาศโลก การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีลักษณะลำแสงของรังสีที่ขนานกัน โดยทำมุมเซนิต θ (Zenith angle) เป็นมุมระหว่างลำแสงของรังสีจากดวงอาทิตย์กับแนวตั้งฉากของพื้นโลก สำหรับการรับการแผ่รังสีจากนอกชั้นบรรยากาศโลก (Extraterrestrial solar irradiation) $G_{s,0}$ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดบนพื้นโลก, ช่วงเวลาของวันและปี โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$G_{s,0} = S_c \cdot f \cdot \cos \theta \quad (2.13)$$



ภาพที่ 2.3

Directional nature of solar radiation outside the earth's atmosphere

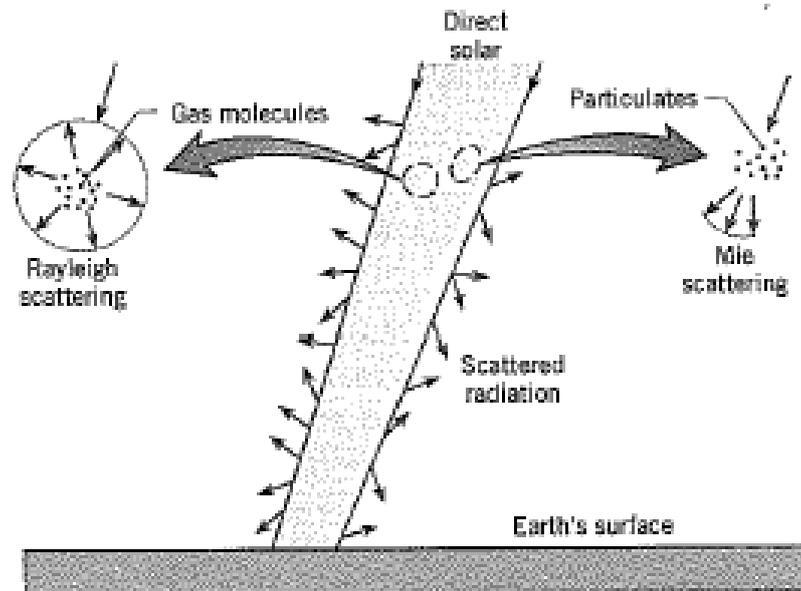
โดยที่ S_c (Solar constant) เป็นค่าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพื้นที่โดยมีทิศทางตั้งฉากกับแนวลำแสงของรังสีจากดวงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 1353 วัตต์ต่อตารางเมตร และ f (small correction factor) เป็นค่าคงที่ที่ได้จากความคลาดเคลื่อนจากการเอียงศูนย์กลางของวงโคจรโลกในระบบสุริยะจักรวาล ($0.97 \lesssim f \lesssim 1.03$)

มีการกระจายช่วงความยาวคลื่นต่างๆ จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การแผ่รังสีจะมุ่งเน้นไปที่ช่วงความยาวคลื่นต่ำ ($0.2 \lesssim \lambda \lesssim 3 \mu\text{m}$) ของคลื่นความร้อน ในขณะที่การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านไปยังชั้นบรรยากาศ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด, คลื่นและทิศทาง เนื่องจากการดูดซับ (Absorption) และการกระเจิง (Scattering) จากการแผ่รังสีโดยส่วนต่างๆ ของชั้นบรรยากาศ การดูดซับโดยก๊าซโอโซน (O_3) ของชั้นบรรยากาศจะมีผลมากในช่วงของคลื่น UV โดยเห็นได้ชัดในช่วงความยาวคลื่น $0.4 \mu\text{m}$. โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะดูดซับได้โดยสมบูรณ์ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า $0.3 \mu\text{m}$. ช่วงคลื่นแสงที่มองเห็น (Visible region) จะถูกดูดซับโดย O_3 และ O_2 ช่วงของคลื่นอินฟราเรด จะถูกดูดซับโดยไอน้ำในชั้นบรรยากาศ และทุกๆ ช่วงความยาวคลื่นจะถูกดูดซับโดยฝุ่นและละอองที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ

ส่วนการเกิดการกระเจิง (Scattering) ในชั้นบรรยากาศ เป็นการเปลี่ยนทิศทางรังสีของดวงอาทิตย์ ประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ Rayleigh (หรือ molecular) scattering เป็นการกระเจิงทุกทิศทาง ดังนั้นส่วนที่เกิดจากการแผ่รังสีนี้เป็นส่วนที่ตกกระทบลงบนพื้นโลกประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนที่เหลือกระจายไปในอากาศ และ Mie scattering เป็นการกระเจิงโดยฝุ่นและอนุภาคที่เป็นละออง จะทำให้ทิศทางของการแผ่รังสีใกล้เคียงมุมของรังสีที่ตกกระทบ ดังนั้นการแผ่รังสีนี้จะตกกระทบลงสู่พื้นโลกทั้งหมดในทิศทางที่ใกล้เคียงกับรังสีดวงอาทิตย์

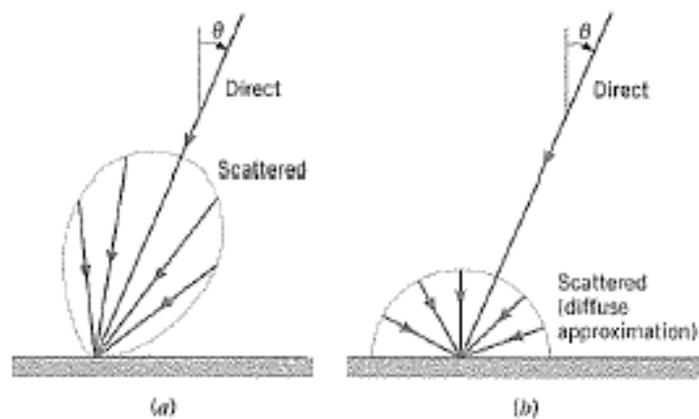
ผลของการแผ่รังสีประกอบด้วย การกระเจิง (Scattering) โดยทิศทางของรังสีตกกระทบลงมายังพื้นโลก ดูได้จากภาพที่ 2.4 ในส่วนการแผ่รังสีนั้นได้จากการทะลุผ่านลงสู่ชั้นบรรยากาศโดยไม่มี การกระเจิง (scattering) หรือการดูดซับ (absorption) ในทิศทางของมุมเซนิต (Zenith angle) ในส่วนนี้จะเรียกว่า การแผ่รังสีโดยตรง (Direct radiation) ในส่วนการแผ่รังสีแบบแพร่กระจายจะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเข้มของการแผ่รังสีบ่อยครั้งให้ตั้งสมมติฐานโดยเป็นอิสระกับทิศทาง การแผ่รังสีอยู่ในแบบของแพร่กระจาย (diffuse) ดังนั้นการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์โดยรวมที่ตกถึงพื้นโลกเท่ากับผลรวมของการแผ่รังสีโดยตรงกับแบบแพร่กระจาย (diffuse) ในกรณีวันที่มีสภาพอากาศโปร่งใส ค่าการแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย (diffuse) จะประมาณการ 10% ของการแผ่รังสีรวม โดยจะแปรผันตามสภาพอากาศ และถ้า

สภาพอากาศมีดึกริม ค่าการแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย (diffuse) จะใกล้เคียงที่ 100% ของการแผ่รังสีทั้งหมด



ภาพที่ 2.4

Scattering of solar radiation in the earth's atmosphere



ภาพที่ 2.5

Directional distribution of solar radiation at the earth's surface

(a) Actual distribution (b) Diffuse approximation

การแผ่รังสีของช่วงคลื่นยาว จะรวมค่าอิมิชชัน (Emission) ที่ได้จากพื้นโลก โดยเปรียบได้กับค่าอิมิชชันจากส่วนของบรรยากาศ ดังนั้นค่ากำลังงานของอิมิชชันที่ได้จากพื้นโลกจะหาได้จากสมการ

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.14)$$

โดยที่ ϵ และ T เป็นค่า surface emissivity และอุณหภูมิตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิอยู่ในช่วง 250 ถึง 370 เคลวิน (K) ค่าอิมิชชันจะถูกพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น 4 – 40 μm . โดยจะให้ค่า emission สูงสุดที่ช่วงคลื่น 10 μm .

ค่าอิมิชชันจากชั้นบรรยากาศที่ได้ผลของโมเลกุลของ H_2O และ CO_2 และช่วงคลื่น 5 – 8 μm . และมากกว่า 13 μm . ถึงแม้ว่าค่าอิมิชชันจากชั้นบรรยากาศจะไม่ใช่ไปตามองค์ประกอบของวัตถุดำ (Blackbody) การรับการแผ่รังสีบนโลก (Earth irradiation) จากการอิมิชชันของชั้นบรรยากาศหาได้จาก

$$G_{\text{atm}} = \sigma T_{\text{sky}}^4 \quad (2.15)$$

โดยที่ T_{sky} เป็น effective sky temperature ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นบรรยากาศ โดยจะอยู่ในช่วง 230 K ภายใต้สภาวะอากาศที่มีท้องฟ้าโปร่งและหนาวเย็น และ 285 K ภายใต้สภาวะอากาศที่มีท้องฟ้ามีดครึ้มและอบอุ่น ในเวลากลางคืนอิมิชชันจากชั้นบรรยากาศจะเหลือเพียงการรับการแผ่รังสีบนโลก (Earth irradiation) (Incropera & Frank P, 1996, pp. 680-683)

มุมแสงอาทิตย์ (Solar angle) ตามที่แกนหมุนของโลกเอียงที่ 23.45 องศา โดยพิจารณาจากระนาบการโคจรของโลกเมื่อเทียบกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ ผลของการเอียงนี้ก็คือ การเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างรังสีของจากดวงอาทิตย์ ที่ตกกระทบมายังระนาบบนบริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลก (Solar declination: δ) มุมนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 สำหรับปี ค.ศ.1964 และตารางที่ 2.5 สำหรับปี ค.ศ.1977 และหามุมนี้ในวันอื่นๆ จากการประมาณตามสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = 23.4 \sin\left[360^\circ \frac{(284+N)}{365}\right] \quad (2.16)$$

โดยที่ N เป็นวันที่ของปี โดยวันที่มกราคม มีค่า $N = 1$ สำหรับค่า N ให้ดูที่ตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

การหมุนของโลก เป็นผลของการปรากฏการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามภาพที่ 2.6 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์สามารถกำหนดในภาพที่ของอัลติจูด (Altitude) β และอซิมุท (Azimuth) ϕ

ตารางที่ 2.4

Date, Inclination and Equation of time for 21st date of each month of 1964 with data (A, B, C) Use to Calculate Direct Thermal Radiation Intensity at the Earth's Surface

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
Year Day	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
Declination δ , degrees	-19.9	-10.6	0.0	+11.9	+20.3	+23.45	+20.5	+12.1	0.0	-10.7	-19.9	-23.45
Equation of time, minutes	-11.2	-13.9	-7.5	+1.1	+3.3	-1.4	-6.2	-2.4	+7.5	+15.4	+13.8	+1.6
Solar noon	late		early				late		early			
A, W/m ²	1230	1215	1186	1136	1104	1088	1085	1107	1152	1193	1221	1234
B, dimensionless	0.142	0.144	0.156	0.180	0.196	0.205	0.207	0.201	0.177	0.160	0.149	0.142
C, dimensionless	0.058	0.060	0.071	0.097	0.121	0.134	0.136	0.122	0.092	0.073	0.063	0.057

A = apparent solar irradiation at air mass zero for each month.
 B = atmospheric extinction coefficient.
 C = ratio of the diffuse radiation on a horizontal surface to the direct normal irradiation.

ที่มา : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning engineers, [ASHRAE], 1999, p.32.3

ตารางที่ 2.5

Solar Position Data

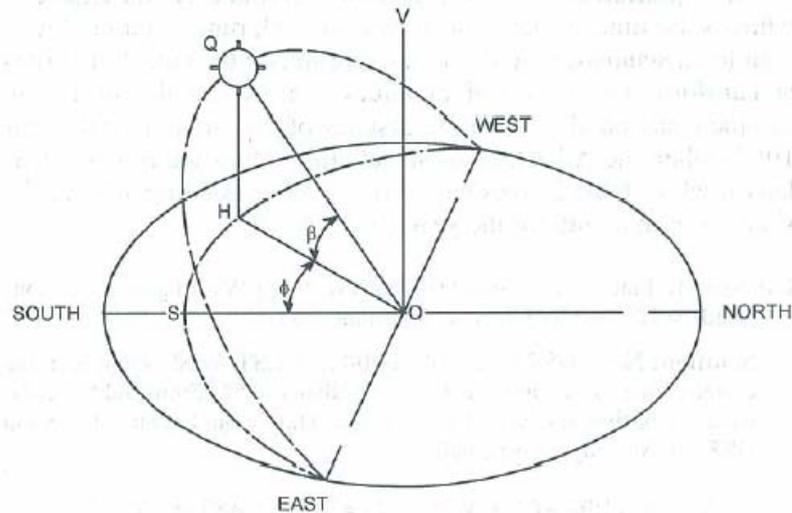
Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1 Year Day	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
Declination δ	-23.0	-17.0	-7.4	+4.7	+15.2	+22.1	+23.1	+17.9	+8.2	-3.3	-14.6	-21.9
Eq of Time	-3.6	-13.7	-12.5	-4.0	+2.9	+2.4	-3.6	-6.2	+0.0	+10.2	+16.3	+11.0
6 Year Day	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
Declination δ	-22.4	-15.5	-5.5	+6.6	+16.6	+22.7	+22.7	+16.6	+6.7	-5.3	-16.1	-22.5
Eq of Time	-5.9	-14.2	-11.4	-2.5	+3.5	+1.6	-4.5	-5.8	+1.6	+11.8	+16.3	+9.0
11 Year Day	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
Declination δ	-21.7	-13.9	-3.5	-8.5	+17.9	+23.1	+22.1	+15.2	+4.4	-7.2	-17.5	-23.0
Eq of Time	-8.0	-14.4	-10.2	-1.1	+3.7	+0.6	-5.3	-5.1	+3.3	+13.1	+15.9	+6.8
16 Year Day	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
Declination δ	-20.8	-12.2	-1.6	+10.3	+19.2	+23.3	+21.3	+13.6	+2.5	-8.7	-18.8	-23.3
Eq of Time	-9.8	-14.2	-8.8	+0.1	+3.8	-0.4	-5.9	-4.3	+5.0	+14.3	+15.2	+4.4
21 Year Day	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
Declination δ	-19.6	-10.4	+0.4	+12.0	+20.3	+23.4	+20.6	+12.0	+0.5	-10.8	-20.0	-23.4
Eq of Time	-11.4	-13.8	-7.4	+1.2	+3.6	-1.5	-6.2	-3.1	+6.8	+15.3	+14.1	+2.0
26 Year Day	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
Declination δ	-18.6	-8.6	+2.4	+13.6	+21.2	+23.3	+19.3	+10.3	-1.4	-12.6	-21.0	-23.4
Eq of Time	-12.6	-13.1	-5.8	+2.2	+3.2	-2.6	-6.4	-1.8	+8.6	+15.9	+12.7	-0.5

ที่มา : ASHRAE, 1999, p.32.3

ที่เวลาเที่ยงตรง ดวงอาทิตย์จะอยู่บนเมอริเดียน ซึ่งเป็นเส้นจากทิศเหนือไปทิศใต้ ผลก็คืออซิมุท (Azimuth) ϕ เท่ากับ 0 จะได้ว่าอัลติจูด ณ เวลาเที่ยงตรง (noon altitude) β_N ตามสมการ

$$\beta_N = 90^\circ - LAT \quad (2.16)$$

ขณะที่ $LAT =$ ละติจูด



ภาพที่ 2.6

Apparent daily path of the sun showing solar altitude β and solar azimuth ϕ

เนื่องจากการที่โลกหมุนรอบตัวเองและการโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะสามารถทำนายได้นั้น ทำให้สามารถคำนวณหาอัลติจูด (Altitude) β และอาซิมุท (Azimuth) ϕ ตามตำแหน่งของละติจูด, ลองติจูด และช่วงวันเวลาที่กำหนด apparent solar time (AST) จะแสดงในภาพที่ของมุมรายชั่วโมง (Hour angle, H) โดยที่

$$H = \text{ระยะเวลาเป็นชั่วโมงจากเวลาเที่ยงตรง} \times 15^\circ$$

$$= \text{ระยะเวลาเป็นชั่วโมงจากเวลาเที่ยงตรง} / 4$$

ในการคำนวณหาอัลติจูด β และอาซิมุท ϕ เมื่อทราบค่า Hour angle H และละติจูด LAT และ declination δ นั้น ได้ตามสมการดังนี้

$$\sin \phi = \cos(LAT) \cos \delta \cos H + \sin(LAT) \sin \delta \quad (2.17)$$

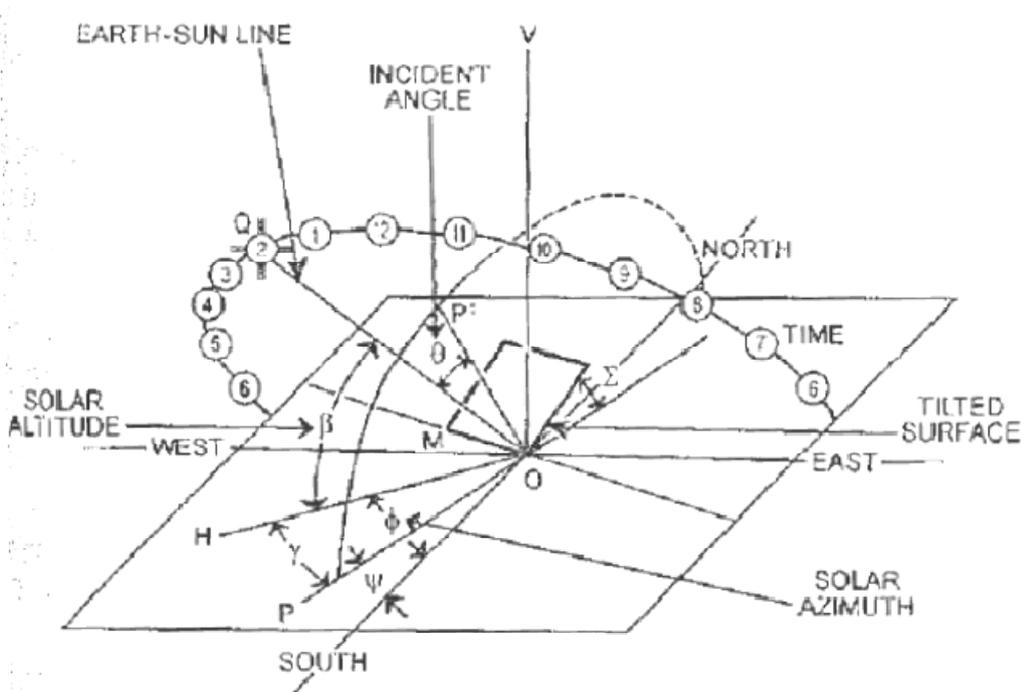
$$\sin \phi = \frac{\sin \theta \sin H}{\cos \beta} \quad (2.18)$$

หรือ

$$\cos \phi = \frac{\sin \beta \sin(LAT) - \sin \delta}{\cos \beta \cos(LAT)} \quad (2.19)$$

มุมระหว่างเส้นปกติบนระนาบพื้นที่รับการแผ่รังสีกับเส้นของรังสีดวงอาทิตย์มายังโลก คือ มุมตกกระทบ θ (Incident angle) ซึ่งมีความสำคัญมากต่อเทคโนโลยีทางด้านแสงอาทิตย์ เพราะจะมีผลต่อความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกลงมายังพื้นผิว และความสามารถในการดูดซับ, ส่งผ่าน และการสะท้อนของรังสีจากดวงอาทิตย์

การหาค่ามุม θ จะต้องทราบค่ามุมอาซิมุทพื้นผิว (Surface azimuth) ψ และมุมอาซิมุทพื้นผิว-แสงอาทิตย์ (Surface-solar azimuth) γ โดยที่อาซิมุทพื้นผิว (มุม POS ตามภาพที่ 2.7) เป็นมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากจากทิศเหนือจรดทิศใต้ กับเส้น PO ซึ่งเป็นเส้นปกติที่ลากจากพื้นผิวที่รับการแผ่รังสีในแนวนอนตามเส้น OM ส่วน



ภาพที่ 2.7

Solar angle with respect to a tilted surface

อาซิมุทพื้นผิว-แสงอาทิตย์ (มุม HOP ตามภาพที่ 2.7) เป็นมุมต่างระหว่างอาซิมุทพื้นผิว ϕ กับอาซิมุทพื้นผิว ψ สำหรับพื้นผิวที่หันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ในเวลาเช้า $\gamma = \phi - \psi$ และในเวลาบ่าย $\gamma = \phi + \psi$ สำหรับพื้นผิวที่หันไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเวลาเช้า $\gamma = \phi + \psi$

และในเวลาบ่าย $\gamma = \phi - \psi$ สำหรับพื้นผิวที่หันไปทางทิศใต้ ในทุกช่วงเวลา $\psi = 0$ และ $\gamma = \psi$ มุม δ, β และ ϕ มีค่าเป็นบวกเสมอ

สำหรับพื้นผิวที่เอียงทำมุม Σ (เทียบกับแนวนอน) มุมตกกระทบ θ (มุม QOP¹ ตามภาพที่ 2.7) หาได้จาก

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta + \cos \Sigma \quad (2.20)$$

(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning engineers, [ASHRAE], 1999, chap.32, pp.32.1-32.4)

2.3 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heater) (Stu Campbell, 1978)

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1. แผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector)
2. ระบบการหมุนเวียนน้ำ
3. ระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำ

แผงรับแสงอาทิตย์(Solar Collector)มีหลายแบบ ได้แก่ แบบโฟกัส (Focusing Collector) ให้มีความเข้มข้นมากๆ โดยใช้เลนส์ในการรวมแสงหรือกระจกสะท้อนภาพที่โค้งแบบพาราโบลา ซึ่งจะสะท้อนกลับไปยังจุดที่ต้องการ ซึ่งแบบรวมแสงนี้มีข้อดีตรงที่สามารถทำอุณหภูมิที่สูงมากๆ ได้ตามจุดที่ต้องการ แต่ข้อเสียก็คือการควบคุมลำแสงไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระยะเวลาที่ต่างกันยาก เนื่องจากทิศทางของแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงมุมตกกระทบตลอดเวลา นอกจากนั้น ไม่มีผลกับการแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย (diffuse) จะมีผลเฉพาะการแผ่รังสีโดยตรง (direct) ,มีความซับซ้อนในการประดิษฐ์มาก มีราคาสูง และไม่ง่ายนักที่จะทำให้การไหลของน้ำให้สัมพันธ์ต่อลำแสงจากแผงรับแสงอาทิตย์นี้ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ส่วนแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือแบบแผ่นราบ (Flat plate collector) ซึ่งไม่จำเป็นต้องรับแสงอาทิตย์ในทิศทางเฉพาะ มีความยืดหยุ่นของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะสมพลังงานความร้อน และยังสามารถรับแสงในลักษณะแพร่กระจาย (diffuse) ได้ สามารถสร้างได้ง่าย โดยโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย แผ่นโลหะทาสีดำและมีช่องน้ำไหลผ่านในตำแหน่งต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านบน , ด้านล่าง หรืออาจแทรกอยู่ระหว่างแผ่น ขึ้นอยู่กับการออกแบบ น้ำจะร้อนต่อเมื่อน้ำไหลเข้าพอและระยะของการไหลยาวเพียงพอ

มีอยู่สอง प्रकारแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) มีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อน้ำหรือสายยางน้ำตามสวน คือ (1) แผ่นเก็บความร้อนที่ทำจากโลหะซึ่งสามารถทำให้เกิดความร้อนมากกว่าพลาสติกจากสายยางน้ำ (2) แผ่นดูดซับ (absorber plate) ซึ่งอยู่ภายในกระจกที่เก็บความร้อนได้ โดยปกติแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ (flat plate collector) ทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าแบบโฟกัส (focusing collector) บางครั้งอยู่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 100 ถึง 210 องศาฟาเรนไฮต์ หรือโดยประมาณ 38 ถึง 99 องศาเซลเซียส แต่จะต้องทนที่อุณหภูมิที่มากกว่านี้ได้ โดยความร้อนจำนวนมากได้รับจากแผ่นดูดซับและถ่ายเทความร้อนโดยของเหลวที่ไหลผ่านแผ่นดูดซับซึ่งอุณหภูมิของไหลนี้อยู่ระหว่าง 130 ถึง 210 องศาฟาเรนไฮต์ หรือโดยประมาณ 54 ถึง 99 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลภายในแผงรับแสงอาทิตย์

แผงรับแสงอาทิตย์พื้นที่ 1 ตารางฟุต จะเก็บความร้อนได้ 700 บีทียูต่อวัน (1 ตารางฟุตที่เมตร จะเก็บความร้อนได้ 7.95 เมกะจูล) หรืออาจจะมากกว่าในวันที่อากาศสดใส การไหลของน้ำประมาณ 1 แกลลอนต่อชั่วโมงต่อแผ่นดูดซับ 1 ตารางฟุต

แผ่นดูดซับถูกรอบด้วยกล่องโลหะหรือไม้ซึ่งปิดด้านบนด้วยแผ่นกระจกซึ่งเป็นหนึ่งในภาพที่ของกระจกรับแสง (glazing) (หรืออาจจะเป็นไฟเบอร์กลาสหรือพลาสติกแทนที่กระจก) ภายใต้ของแผ่นดูดซับโดยปกติจะต้องมีฉนวนกันความร้อนบุด้านใต้ของแผงรับแสงอาทิตย์

กระจกรับแสงยอมให้แสงอาทิตย์ที่มีช่วงแสงที่มองเห็น (Visible light) โดยเฉพาะช่วงความยาวคลื่นสั้นผ่านลงไปถึงแผ่นดูดซับและเก็บรักษาอากาศที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งได้จากการพาความร้อนจากแผ่นดูดซับ ผลก็คืออากาศภายในแผงรับแสงอาทิตย์จะร้อนขึ้น ที่สำคัญมากกว่านั้นคือการเก็บรักษาแสงอาทิตย์ที่มีช่วงความยาวคลื่นยาวไม่ให้หลุดรอดออกไปสู่ชั้นบรรยากาศได้ อันเป็นส่วนหนึ่งของคุณสมบัติของกระจก รวมถึงไฟเบอร์กลาสและพลาสติกบางชนิด โดยเป็นการสร้างปรากฏการณ์เรือนกระจกภายในแผงรับแสงอาทิตย์

รังสีที่ถูกแผ่ออก ไม่สามารถทะลุผ่านกระจกออกไปได้เนื่องจากจะเกิดความยาวคลื่นที่มากขึ้นและสะท้อนกลับมากกระทบกับแผ่นดูดซับอีกครั้ง กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รังสีใดที่ตกกระทบที่แผ่นดูดซับจะกำเนิดรังสีที่มีความยาวสูงขึ้น ก่อนที่จะไปตกกระทบที่พื้นผิวของกระจกรับแสงอีกครั้ง ซึ่งผลจากการแผ่รังสี จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาก

ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อการได้รับพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบมี 4 ข้อ ดังนี้

1. ความเข้มของแสงอาทิตย์
2. ทิศทางของแผงรับแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแสงอาทิตย์

3. อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม

4. วัสดุที่ใช้ทำส่วนประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์ได้แก่กระจกรับแสงและ

แผ่นดูดซับ

แผ่นดูดซับโดยทั่วไปทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเหล็ก (โดยที่เงินเป็นโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูงสุดแต่ราคายังต้องพิจารณาด้วย)

ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์หนึ่งๆ เป็นการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ดูดซับโดยแผงรับแสงอาทิตย์ต่อปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบบนแผงรับแสงอาทิตย์โดยหาได้จากสมการง่าย ๆ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{พลังงานที่ Solar collector ผลิตได้}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบบน Solar collector}} \quad (2.21)$$

สำหรับแผงรับแสงอาทิตย์หนึ่งๆ จะกล่าวได้ว่าไม่มีประสิทธิภาพโดยสมบูรณ์ที่สภาวะสมดุล เมื่อปริมาณการแผ่รังสีดวงอาทิตย์เท่ากับปริมาณพลังงานสูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม เรียกว่า stasis ซึ่งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อเกิดการสะท้อนและความร้อนสูญเสียบริเวณพื้นที่ด้านหลังของแผงรับแสงอาทิตย์อันเนื่องจากสภาพฉนวนที่ไม่ดี ปัญหานี้เกิดจากการสะท้อนที่มากเกินไปในช่วงกลางวัน นั่นหมายถึง การเอียงทำมุมของแผงรับแสงอาทิตย์ต่อแนวรังสีของดวงอาทิตย์ไม่เหมาะสม บางครั้งแผงรับแสงอาทิตย์จะถึงสภาวะ stasis เมื่อระบบร้อนมากเกินไป

ความร้อนสูญเสียจากแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่มีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ (1)ปริมาณความร้อนที่แผ่นดูดซับสามารถดูดซับ (2)ปริมาณการแผ่รังสีของแผ่นดูดซับ (3)อุณหภูมิบรรยากาศและความเร็วลม (4)จำนวนชั้นของกระจกรับแสง (5)คุณสมบัติของกระจกรับแสงในการรับแสง (6)ฉนวนที่อยู่ภายใต้กล่องแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้ยากที่จะวัดได้ แต่เราควรตระหนักในการออกแบบระบบ

แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบมีหลักการการทำงานคล้ายคลึงกับท่อน้ำกลางแจ้งที่อยู่ในสนาม แต่มีความแตกต่างตรงที่การไหลของน้ำหรือของไหลอื่นจะไหลในลักษณะใด ด้วยเหตุนี้เราสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท

1. การหมุนเวียนโดยอิสระ (Free circulating collectors)
2. การหมุนเวียนโดยแรงจากภายนอก (forced circulating collectors)
3. การไหลของน้ำแบบเปิด (Open water collectors)

การหมุนเวียนโดยอิสระ เป็นส่วนหนึ่งของระบบการทำน้ำร้อนแบบเทอร์มิไซฟอน น้ำหรือของไหลจะไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ไปยังตำแหน่งที่สูงขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำเกิดโดย

ธรรมชาติ การไหลเกิดขึ้นเพราะว่าน้ำจะลอยตัวขึ้นเมื่อน้ำร้อนขึ้นซึ่งคล้ายกับอากาศ เมื่อมีแสงแดดส่อง น้ำในท่อที่อยู่ในแผ่นดูดซับจะร้อนขึ้น ทำให้ความหนาแน่นหรือค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำลดลง ก็จะทำให้น้ำไหลขึ้นไป แล้วผ่านด้านบนบนสุดของแผงรับแสงอาทิตย์ น้ำหรือของไหลที่เย็นกว่าก็จะไหลแทนที่จากด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์

การหมุนเวียนโดยแรงจากภายนอก จะมีการไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์เหมือนกัน แต่มีแรงทางกล โดยปกติจะใช้ปั๊มขนาด 1/20 หรือ 1/12 แรงม้า สามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ต้องการกลไกในการควบคุมอุณหภูมิในการเปิดปิดการทำงานของปั๊มตามปริมาณแสงแดดที่ได้รับ

การไหลของน้ำแบบเปิด ประกอบด้วยวัสดุเป็นลักษณะแผ่นรอนหลังคาเหล็กหรืออลูมิเนียม โดยน้ำจะไหลจากบนลงล่างตามช่องของรอนหลังคา แบบที่รู้จักแพร่หลายของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดนี้ คือ แผงรับแสงอาทิตย์แบบโทมัสสัน (Thomason collector) มีการออกแบบและพัฒนาในวอชิงตันดีซี ประเทศสหรัฐอเมริกา จดสิทธิบัตรในชื่อโทมัสสัน (Thomason) มีหลักการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน เริ่มจากน้ำเย็นถูกปั๊มขึ้นไปด้านบนตามท่อบนหลังคาบ้านที่อยู่เหนือแผงรับแสงอาทิตย์แล้วไหลออกจากรูที่เจาะไว้ตรงกันกับรอนของหลังคาทาด้วยสื่อดำซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นดูดซับ

ในการวางตำแหน่งทิศทางของแผงรับแสงอาทิตย์ แม้ว่าเส้นที่ลากจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ทำมุมกับทิศทางการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ประมาณ 25 องศา อย่างไรก็ตาม ยังคงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์มากกว่าร้อยละ 90 ดังตารางที่ 2.6 กล่าวอีกนัย คือ เราไม่ต้องกังวลในเรื่องความแม่นยำทิศทางในการวางตำแหน่งของแผงรับแสงอาทิตย์กับการรังสีที่ตั้งฉาก

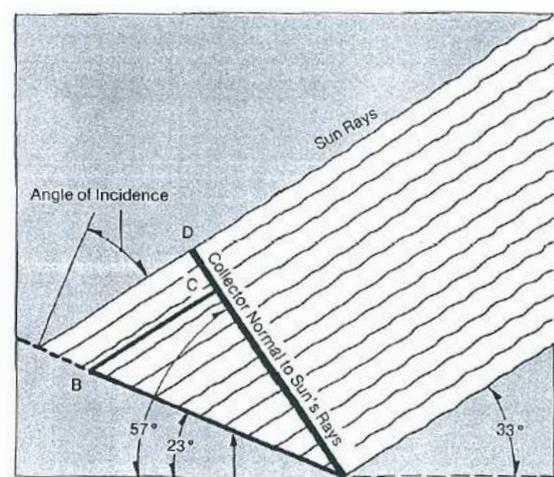
ในทางอุดมคติแผงรับแสงอาทิตย์ควรจะทำมุม 90 องศากับรังสีจากดวงอาทิตย์ แต่ในความเป็นจริงจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยแต่ละเดือนในรอบ 1 ปี มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Sun's Altitude) จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ให้คำนึงอยู่เสมอว่า เมื่อใดก็ตามลำแสงดวงอาทิตย์ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์ด้วยมุมที่น้อยกว่า 30 องศา แผงรับแสงอาทิตย์จะสะท้อนการแผ่รังสีมากกว่าการดูดซับ (ภาพที่ 2.8)

ตารางที่ 2.6

Collector Interception Efficiency for Various Misalignments

Misalignment Angle	Percent of Maximum Solar Energy Intercepted
0°	100.0
5°	99.6
10°	98.5
15°	96.5
20°	94.0
25°	90.6
30°	86.6
35°	81.9
40°	76.6
45°	70.7
50°	64.3

ที่มา : Stu Campbell, 1978

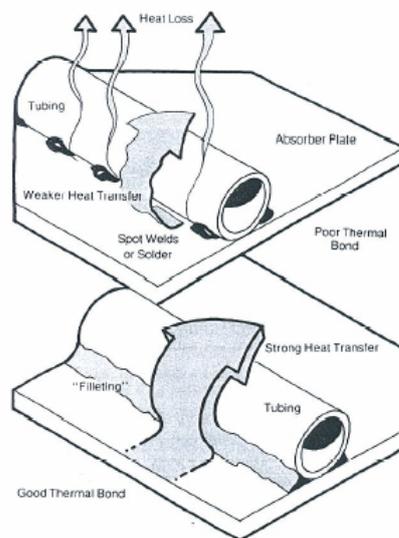


ภาพที่ 2.8

มุมตกกระทบ (Angle of Incidence) บนแผงรับแสงอาทิตย์

แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำมุมที่ถูกต้อง แต่เป็นไปได้ในการรักษาตำแหน่งของแผงรับแสงอาทิตย์ให้ตั้งฉากกับรังสีตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องหาตำแหน่งที่ยอมรับได้ มุมระหว่างเส้นการแผ่รังสีและเส้นที่ตั้งฉากกับแผงรับแสงอาทิตย์เรียกว่ามุมตกกระทบ (Angle of Incidence) ในขณะที่มุมตกกระทบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์จะลดลง

โดยปกติแผ่นแผงรับแสงอาทิตย์ทำจากวัสดุได้วัสดุหนึ่งจาก 3 ชนิดนี้ ได้แก่ อลูมิเนียม, ทองแดงหรือเหล็ก โดยการถ่ายความร้อนจะเกิดขึ้นจากแผ่นโลหะดังกล่าวไปยังน้ำโดยการนำความร้อน ความร้อนสามารถถ่ายเทจากวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง ไม่ว่าจะเป็นการขึ้น, ลงหรือด้านข้าง ดังนั้นไม่ว่าจะให้ท่ออยู่ด้านบนหรือด้านล่างของแผ่นดูดซับจึงไม่มีผลที่ต่างกัน แต่ที่สำคัญก็คือการยึดระหว่างท่อกับแผ่นดูดซับให้มีพื้นที่การยึดติดมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นท่อควรสัมผัสโดยตรงกับแผ่นดูดซับตลอดช่วงความยาว กล่าวอีกนัยว่า การเชื่อมระหว่างท่อกับแผ่นดูดซับให้เชื่อมตลอดแนวตามภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9

ความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนระหว่างแนวเชื่อมที่ต่างกัน

โดยทั่วไปแผ่นดูดซับภายในแผงรับแสงอาทิตย์ทำจากทองแดง, อะลูมิเนียมหรือเหล็กเหนียว ข้อที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดซับมีดังนี้ (Bruce Anderson, 1977, pp.147-151)

(1) มีเพียงพอกับนำไปใช้หรือไม่ (Availability) สำหรับทองแดงมีพอกับนำไปใช้แต่ขาดแคลนและราคาแนวโน้มสูงขึ้น อะลูมิเนียมและเหล็กหาแหล่งได้ง่าย แหล่งอะลูมิเนียมที่กำลังจะลดลงไป ในขณะที่แผ่นดูดซับที่ทำจากเหล็กเหนียวที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีอยู่น้อยเนื่องจากมีข้อจำกัดในการดูแลเรื่องการกัดกร่อนเป็นพิเศษ

(2) แหล่งพลังงานที่ต้องการใช้ในการผลิต (Energy resources required in manufacture) เนื่องจากแหล่งพลังงานลดลงและการอนุรักษ์พลังงานเป็นเรื่องสำคัญต่อความอยู่รอดของประชากรโลก ทางเลือกของโลหะจำเป็นต้องอยู่บนพื้นฐานของปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตด้วย ตัวอย่างเช่น การผลิตอะลูมิเนียมต่อน้ำหนักต้องการพลังงานในกระบวนการผลิตมากกว่าเหล็กเหนียว

(3) ค่าการนำความร้อน (Conductivity) โลหะจะไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นดูดซับหากของพื้นผิวของไหลได้รับการสัมผัสโดยตรงจากแสงอาทิตย์ โดยทั้งหมดเราใช้ของเหลว ของเหลวต้องไหลตามช่อง โดยทั่วไปจะเป็นท่อที่ยึดติดกับแผ่นโลหะ ความร้อนจะถ่ายเทจากแผ่นโลหะไปยังท่อโดยการนำ โดยที่แผ่นโลหะที่ไม่ได้สัมผัสกับของไหลโดยตรง ถ้าการนำความร้อนมีค่าสูงไม่เพียงพอ ความร้อนก็จะสูญเสียออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ก่อนที่จะถ่ายเทโดยการนำความร้อนไปยังท่อ ทองแดงเป็นโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนาเพียง 2 มิลลิเมตรได้ รองลงมาคืออะลูมิเนียม โดยสามารถเทียบเคียงการนำความร้อนที่เท่ากันโดยการใช้อลูมิเนียมหนาเป็น 2 เท่าหรือแผ่นเหล็กเหนียวหนาเป็น 9 เท่าของแผ่นทองแดง

(4) ความทนทาน (Durability) จำกัดโดยการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ทองแดงมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าอะลูมิเนียมและเหล็กเหนียว แต่น้ำและสารป้องกันการแข็งตัว (Anti-freeze) ก็ให้เกิดการกัดกร่อนกับโลหะทั้งสาม โดยเฉพาะสภาวะภายในแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นการเร่งอัตราการเกิดการกัดกร่อน การป้องกันการเกิดการกัดกร่อนต่อเหล็กเหนียวทำได้โดยการทำให้เป็นเหล็กกัลวาไนซ์ (Galvanized) หรือเหล็กไร้สนิม (Stainless) การกัดกร่อนสามารถทำให้ลดลงได้ถ้าเติมสารยับยั้ง (Inhibitor) ลงไปในน้ำหรือสารป้องกันการแข็งตัว เช่น สารที่มีส่วนประกอบของโครเมต (Chromate-based) ซึ่งโครเมต (ซึ่งอาจอยู่ตามลำพังหรือผสมกับสารเคมีตัวอื่น) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดในระบบระบายความร้อน (Cooling Tower) (มันซินและไพพรธอน, 2540, หน้า 44) การใช้น้ำอ่อน (Soft water) ที่มีแร่

ธาตุหรือโลหะเจือปนต่ำ ภายในท่ออลูมิเนียมอาจเคลือบด้วยกระบวนการเคลือบสังกะสี (Zinc Lining Process) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ ค่าพีเอช (pH) ของระบบมีผลต่อการกัดกร่อนเป็นอย่างมาก ยิ่ง สารละลายที่ใช้กับอลูมิเนียม ต้องมีค่าพีเอช (pH) เป็นกลาง ประมาณ 6-7 ถ้าหากค่าพีเอช (pH) มากหรือน้อยกว่าช่วงนี้ จะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างมาก อลูมิเนียมก็เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกถึงคุณภาพของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของโลหะ และการสร้างตะกอนเป็นอย่างมาก อลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นทำให้การกัดกร่อนและการสร้างตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะทำให้ก๊าซออกซิเจนที่ละลายน้ำหรือดีโอ (DO:Dissolved Oxygen) มีโอกาสเข้าถึงผิวโลหะได้ง่าย (แม้ว่าปริมาณดีโอจะลดลงก็ตาม) และทำให้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถหนีจากน้ำได้สะดวก เนื่องจากน้ำมีความหนืดลดลง ดังนั้นจึงเท่ากับเป็นการส่งเสริมการกัดกร่อนโลหะ นอกจากนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของหินปูน และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามการเพิ่มของอลูมิเนียม การสร้างตะกอนจึงเกิดได้ง่ายที่อลูมิเนียมสูง ในกรณีของระบบปิดแบบทั่วไป การกัดกร่อนโลหะจะเพิ่มขึ้นตามอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นเสมอเพราะออกซิเจนไม่สามารถหลบหนีไปได้ การเพิ่มอลูมิเนียมให้สูงจึงเท่ากับเป็นการเปิดโอกาสให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปถึงผิวโลหะ (มันลินและไพเพอร์รอน, 2540, หน้า 44-45)

(5) ความยากง่ายในการติดตั้ง (Ease to handling) น้ำหนักของแผ่นดูดซับไม่มีความสำคัญต่อการออกแบบมากนัก แต่จะมีผลต่อความยากง่ายในการสร้างและติดตั้ง โดยทั่วไป น้ำหนักของแผงรับแสงอาทิตย์ น้อยกว่า 5 ปอนด์ต่อพื้นที่ 1 ตารางฟุต

การบัดกรี (Soldering) หรือการเชื่อมประสาน (Welding) ในการยึดติดระหว่างแผ่นดูดซับและท่อควรพิจารณา การบัดกรีระหว่างท่อและแผ่นทองแดงเป็นเรื่องง่ายแต่มีค่าแรงงานสูง ในขณะที่อลูมิเนียมไม่สามารถเชื่อมหรือบัดกรีกับโลหะอื่นได้

(6) ต้นทุน (Cost) โดยศักยภาพทางความร้อนของโลหะต่างๆ ต่อต้นทุน ได้แก่ ทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็กไร้สนิมและเหล็กเหนียว ล่าสุดพบว่าอลูมิเนียมดีที่สุด แต่ยังไม่สามารถขจัดปัญหาการเกิดการกัดกร่อนได้ แม้ว่าทองแดงมีปริมาณลดลง เหล็กไร้สนิมก็มีราคาใกล้เคียง ก็ น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในระยะยาว

ในกรณีที่ เป็นแผ่นดูดซับแบบท่อขนาน ท่อขนาน (Parallel Riser) ควรจะเป็นท่อขนาด 3/8 นิ้ว ถึง 1/2 นิ้ว ในขณะที่ท่อร่วม (manifold) มีขนาด 3/4 นิ้ว (แผงรับแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน ท่อขนานควรมีขนาดใหญ่กว่า 1/2 นิ้ว) ข้อดีของแบบท่อขนานคือแรงเสียดทานการไหลน้อยกว่า

การแผ่รังสีความร้อนถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่แผ่นดูดซับสีดำ ความร้อนถ่ายเทไปยังของไหลซึ่งอยู่ภายในท่อ การเดินแนวเชื่อมควรให้มีตลอดช่วงความยาวของท่อ ดังนั้นจะทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสมากขึ้น ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความร้อนเกิดการไม่ถ่ายเทไปยังของไหลเท่าที่ควร

ในการกำหนดจำนวนชั้นของกระจกรับแสงว่าจะมีหนึ่งชั้นหรือสองชั้น เป็นเรื่องยากที่จะตัดสินใจ มีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมของแสงอาทิตย์, สภาพอากาศ, มุมลาดชันของแผงรับแสงอาทิตย์ ละติจูดและอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ถ้าเป็นกรณีหนึ่งชั้นสำหรับวัสดุทำกระจกรับแสงที่ดีจะส่งผ่าน (Transmits) ความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนประมาณ 92% ในขณะที่สองชั้นจะส่งผ่านความร้อน 80% หลังจากนั้น ในแต่ละชั้นของกระจกหรือพลาสติกจะดูดซับความร้อนไว้บางส่วน ส่งไปที่แผงรับแสงอาทิตย์บางส่วน และสะท้อนการแผ่รังสีกลับไปยังบรรยากาศอีกส่วนหนึ่ง สำหรับกรณีสองชั้นที่มีอากาศระหว่างชั้นจะทำหน้าที่เก็บความร้อนไว้ โดยควรมีช่องว่างระหว่างชั้นกระจกรับแสงประมาณ 1/2 นิ้ว และมีช่องว่างระยะ 3/4 นิ้ว ถึง 1 นิ้ว ระหว่าง กระจกรับแสง ด้านในและแผ่นดูดซับและถ้าวัสดุที่ใช้ทำกระจกรับแสงเป็นแก้ว ควรจะติดตั้งเป็นลำดับสุดท้ายเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหาย

เครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้การถ่ายเทความร้อนโดยอ้อม ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์ ให้ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำตามต้องการ โดยประมาณการว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 0.15-0.20 ตารางเมตรต่อ แผงรับแสงอาทิตย์ 1 ตารางเมตร หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องถ่ายเทความร้อนที่ 30-40 วัตต์ต่อเคลวินต่อแผงรับแสงอาทิตย์ 1 ตารางเมตร (Ursula Eicker, 2003, p 49)

ฉนวนสำหรับถังพักน้ำ (Storage Tank Insulation) ความสูญเสียความร้อนจากถังพักน้ำเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพ สมการต่อไปนี้จะสามารถคำนวณค่าความเป็นฉนวน R

$$\frac{1}{R} = \frac{fQ}{A\theta(t_{avg} - t_a)} \quad (2.22)$$

โดยที่

R = thermal resistivity of insulation, m²K/W

f = specified fraction of stored energy that can be lost in time θ

Q = stored energy, J

A =exposed surface area of storage unit, m²

θ = given time period, s

t_{avg} = average temperature in storage unit, °C

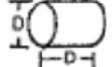
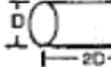
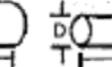
t_a = ambient temperature surrounding storage unit during season when it will be heated, °C

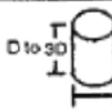
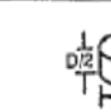
ค่าความเป็นฉนวน $\frac{fQ}{A\theta}$ สามารถหาได้จากตารางที่ 2.7 ในถังเก็บน้ำในแต่ละสภาพที่

ทรง

ตารางที่ 2.7

Insulation factor $fQ/A\theta$ for cylindrical water tank

Horizontal Tank Insulation Factor, W/m ²				
Size, m ³				
0.95	11.45	10.91	9.62	8.74
1.89	14.42	13.75	15.27	11.01
2.84	16.53	15.74	13.88	12.59
3.8	18.17	17.32	15.27	13.85
5.7	20.82	19.81	17.48	15.87
7.6	22.90	21.83	19.24	17.44
11.4	26.21	24.98	22.02	19.97
15.1	28.86	27.48	24.23	21.99
18.9	31.10	29.62	26.12	23.69

Vertical Tank Insulation Factor, W/m ²				
Size, m ³				
0.30	6.62	5.93	6.78	6.21
0.45	7.54	6.78	7.76	7.13
0.95	9.68	8.64	7.76	9.09
1.89	12.21	10.91	12.49	11.45
2.84	13.97	12.49	14.29	13.12
3.8	15.36	13.75	15.74	14.42
5.7	17.60	15.74	18.01	16.53
7.6	19.34	17.32	19.81	18.17
11.4	22.18	19.81	22.68	20.82
15.1	24.39	21.83	24.98	22.90
18.9	26.28	23.50	26.90	24.67

ที่มา : ASHRAE, 1996, p.33.15

ระบบการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยส่วนใหญ่จะใช้ถังเหล็กขนาดใหญ่ วัสดุที่เหมาะสมในการเป็นฉนวน ได้แก่ ไฟเบอร์กลาส , โฟมแข็งและโฟมยืดหยุ่น

ไฟเบอร์กลาส การขนถ่ายไม่ยุ่งยากและเป็นวัสดุไม่ติดไฟ แต่ต้องอาศัยแรงงานในการติดตั้ง ฉนวนอื่นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ โฟมโพลีไอโซไซยานูเรต(Polyisocyanurate foam) ด้วยความหนา 75 – 100 มิลลิเมตร ค่าความเป็นฉนวนอยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 5.3 m²/K/W

การแบ่งชั้นและการลัดกระแสน้ำ (Stratification and Short Circuit) ของน้ำภายในถังเก็บน้ำ เกิดจากน้ำร้อนจะลอยขึ้นมาอยู่ด้านบนของผิวหน้า ในขณะที่น้ำเย็นจะนอนก้นอยู่ด้านล่างเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิ น้ำที่แตกต่างกัน ท่อขาเข้าของแผงรับแสงอาทิตย์ควรจะอยู่ด้านล่างของถังเก็บน้ำ จะทำให้แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นส่วนที่น้ำมีอุณหภูมิต่ำสุด ส่วนขาออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ควรจะอยู่ใกล้จุดสูงสุดของถังน้ำ ในทำนองเดียวกันการต่อท่อน้ำร้อนที่จะออกไปใช้งาน ควรจะต่อจากด้านบนของถังเพื่อที่จะได้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงสุด และการต่อท่อน้ำเย็นที่จะเติมทดแทนก็ควรจะต่อลงไปยังด้านล่างของถังน้ำ เพราะว่าเป็นการเพิ่มความดันสถิตยของน้ำให้มากขึ้น ถังเก็บน้ำในลักษณะแนวตั้งจะช่วยทำให้เพิ่มการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ น้ำภายในถังให้มากยิ่งขึ้นกว่าการใช้ถังเก็บน้ำในลักษณะแนวนอน

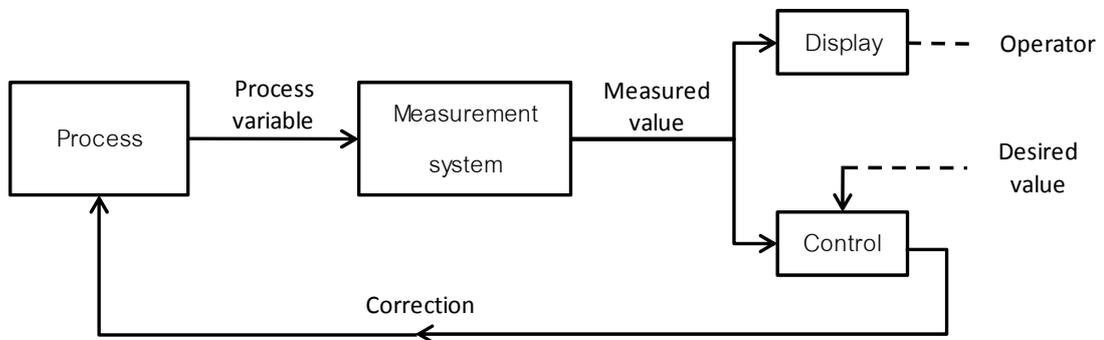
ถ้าระบบมีอัตราการหมุนเวียนของน้ำที่มาก หรือความจุของถังเก็บน้ำที่ใช้สำรองมีค่าใกล้เคียงกับการนำน้ำร้อนไปใช้งานจริง การแบ่งชั้นดังกล่าวก็จะไม่เด่นชัด (ASHRAE, 1996, chap 33, pp. 33.14-33.15)

2.4 การควบคุมทางอุตสาหกรรม (Industrial Control) (E.A. Parr ,1998)

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการควบคุมทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

2.4.1 ระบบวัดคุม (Instrumentation Systems)

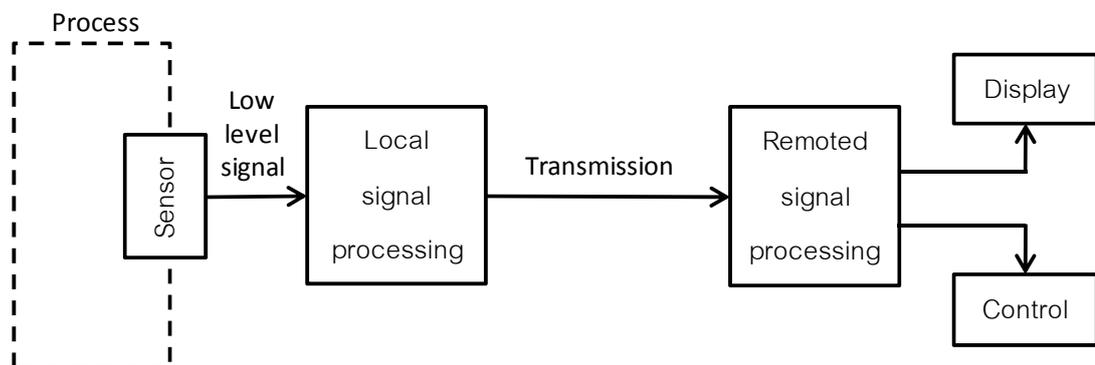
การวัดค่าปริมาณที่แม่นยำ เช่น อัตราการไหล, ความดันและอุณหภูมิเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการควบคุมหรือการตรวจติดตามการทำงานของกระบวนการใดๆ ภาพที่ 2.10 แสดงถึงระบบวัดคุมทางอุตสาหกรรม ปริมาณทางฟิสิกส์ เรียกว่า ค่าวัด (measurand) หรือตัวแปรกระบวนการ (process variable) ถูกแปลงโดยระบบการวัดไปสู่ค่าที่วัดได้ โดยปกติจะเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าหรือนิวแมติกส์ ซึ่งสามารถแสดงค่าและควบคุมได้



ภาพที่ 2.10

ระบบวัดคุมและควบคุมทางอุตสาหกรรม

จากภาพที่ 2.10 สามารถเขียนให้ละเอียดและเข้าใจมากขึ้นตามภาพที่ 2.11 อุปกรณ์ตรวจจับหรือเซนเซอร์ (Sensor) เชื่อมต่อโดยกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงซึ่งเชื่อมโยงกับตัวแปรกระบวนการที่ตรวจติดตามอยู่ ตัวอย่างเช่น เทอร์มิสเตอร์ประเภทความต้านทานชนิดแพลทตินัม (Platinum resistance thermometer) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง หรือการเปลี่ยนแปลงการไหลจะให้ความดันตกคร่อมแตกต่างกันที่แผ่นออริฟิส (Orifice plate)



ภาพที่ 2.11

ส่วนประกอบของระบบวัดคุม

ในหลายๆ ระบบ มีชุดอุปกรณ์ในการตรวจจับที่จะวัดค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง แผ่นออริฟิส (Orifice plate) ใช้วัดอัตราการไหล โดยการทำให้เกิดความดันตกคร่อมซึ่งแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่เกิดขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นนี้อาจแปลงเป็นระยะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยกระบอกที่ยืดหดได้ (bellow) แล้วระยะที่เกิดขึ้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยตัวปรับความต้านทาน (Potentiometer) จากระบบตามที่กล่าวมา เช่น เซอร์ตัวแรกจะถูกเรียกว่า อุปกรณ์ตรวจจับปฐมภูมิ (Primary Sensor) จากตัวอย่างที่กล่าวมา แผ่นออริฟิส (Orifice plate) ก็คือ อุปกรณ์ตรวจจับปฐมภูมิ

สัญญาณเริ่มแรกที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์โดยทั่วไปมีขนาดเล็ก ดังนั้น จึงมีการกระบวนการหรือปรับสภาวะทางสัญญาณ (Signal Processing or Conditioning) การปรับสภาวะทางสัญญาณทั่วไปเป็นวงจรบริดจ์โดยเปลี่ยนความต้านทานของเกจความเครียด (Strain Gauge) ไปสู่ค่าศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งหรือความถี่หนึ่งไปยังตัวแปลงศักย์ไฟฟ้าในการเปลี่ยนพัลส์เทรน (Pulse train) จากมาตรวัดการไหลแบบใบพัด (Turbine flow meter) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามอัตราการไหล

การส่งต่อไปยังกระบวนการไปยังอุปกรณ์แสดงผลหรือควบคุมเป็นสิ่งสำคัญมาก ในขณะที่เราไม่อาจจะหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนในระบบการวัดนี้ ตัวอย่างเช่น การส่งต่อสัญญาณผ่านสายไฟ , ท่อนิวแมติกส์ , สายไฟเบอร์ออปติก และการเชื่อมต่อทางวิทยุ ความคลาดเคลื่อนมาจากสัญญาณรบกวนและอิมพีแดนซ์ในสายไฟ การรั่วในระบบนิวแมติกส์

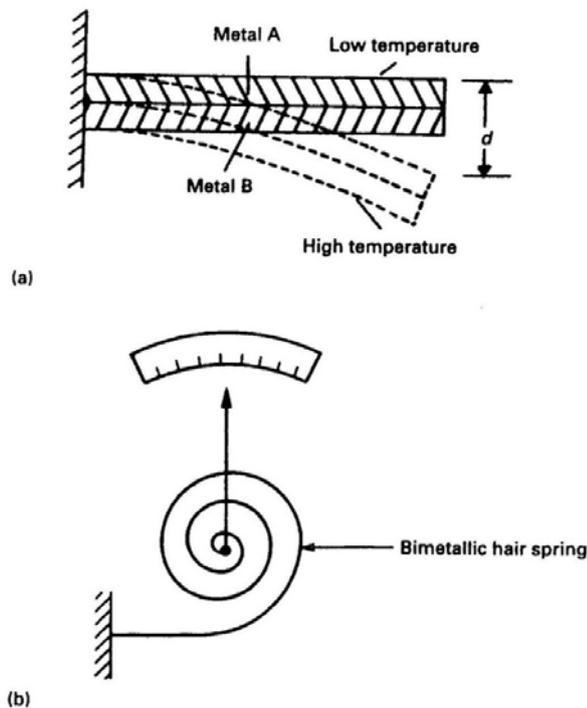
อีกคำหนึ่งที่เกี่ยวข้องบ่อยๆ คือ ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) คำจำกัดความของทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนจากปริมาณทางฟิสิกส์เป็นอย่างอื่น โดยเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) เทอโมคัปเปิลจัดเป็นทรานสดิวเซอร์หนึ่งซึ่งเปลี่ยนค่าอุณหภูมิเป็นศักย์ทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์สามารถใช้แทนกันได้โดยไม่มีกฎเกณฑ์ใดๆ รวมถึงคำว่าทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) ใช้ในความหมายเดียวกับเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์เช่นกัน

2.4.2 อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensors)

หลักการของอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิมี 4 ชนิดโดยแบ่งตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์ซึ่งแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ดังนี้

1. การขยายตัวของวัตถุตามอุณหภูมิโดยมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปริมาตรหรือความดัน รูปแบบง่ายที่สุดก็คือ เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทหรือแอลกอฮอล์ในหลอดแก้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทอร์โมมิเตอร์แบบโลหะ 2 ชนิด (Bimetallic thermometers)

จากภาพที่ 2.12 โลหะสองชนิด คือ โลหะ A และโลหะ B มาแปะติดกัน โดยโลหะ A มีค่าคงที่การขยายตัวสูง ในขณะที่โลหะ B มีค่าคงที่การขยายตัวต่ำ ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น โลหะ A จะขยายตัวมากกว่า ทำให้แท่งโลหะนี้โก่งงอ ทำให้เกิดระยะโก่งงอ (deflection) d ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงค่า d จะเกิดน้อยตามภาพที่ 2.12a แต่จะทำให้มีค่ามากขึ้นและแปรผันแบบเส้นตรงมากขึ้นหากทำให้เป็นลักษณะขดคล้ายรูปก้นหอยตามภาพที่ 2.12b เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้มีราคาถูกแต่ความแม่นยำ (Accuracy) ต่ำ ไม่นิยมแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมมากนัก เพราะไม่สามารถแสดงผลในระยะใกล้ได้ สวิตช์ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้หลักการนี้คือ เทอโมสแตต (Thermostat) โดยมีลักษณะตามภาพที่ 2.12b แต่เปลี่ยนจากเข็มชี้เป็นหน้าสัมผัสของสวิตช์



ภาพที่ 2.12

Bimetallic thermometer (a) Bimetallic strip (b) indicating bimetallic thermometer

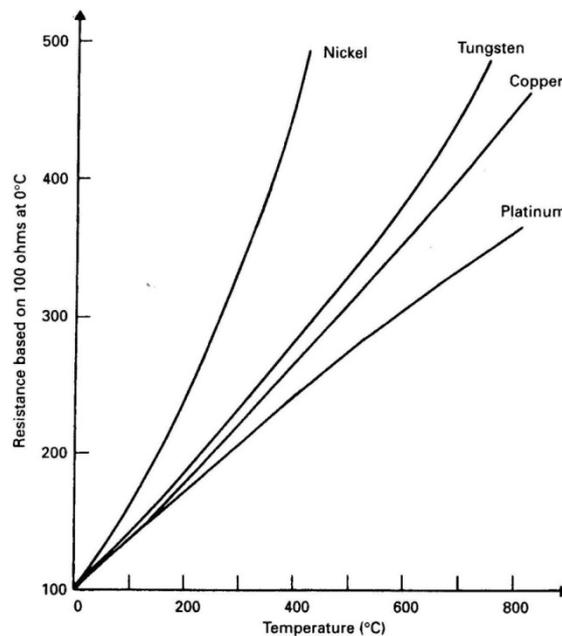
2.การเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้นตรงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ R_0 คือค่าความต้านทานของโลหะใดโลหะหนึ่งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสแล้ว ที่ค่าอุณหภูมิ T ใดๆ เป็นไปตามสมการด้านล่างนี้

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots) \quad (2.23)$$

สำหรับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม ในเทอมค่ากำลังสองจะไม่นำมาคำนวณ ดังนั้นจะมีความสัมพันธ์ตามสมการด้านล่างนี้

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (2.24)$$

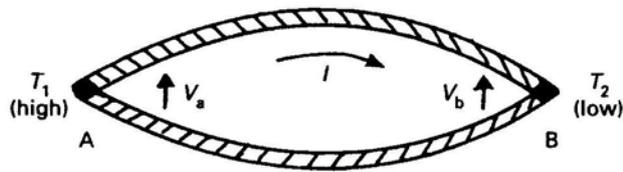
จากภาพที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับค่าอุณหภูมิในโลหะต่างๆ ในโลหะแต่ละชนิด กำหนดความต้านทานเริ่มต้น 100 โอห์ม ที่ 0 องศาเซลเซียสเป็นจุดอ้างอิง จะเห็นว่าเทอร์มิสเตอร์โลหะชนิดนี้เกิดมีค่าความไว (Sensitive) มากที่สุด แต่ความต้านทานไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมากที่สุดเช่นกัน ในขณะที่แพลตินัมมีค่าความไวต่ำที่สุด แต่ความต้านทานมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมากที่สุด ในทางปฏิบัติ การเลือกใช้โลหะชนิดใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำที่ต้องการ การต้านทานการกัดกร่อนและค่าใช้จ่าย เทอร์มิสเตอร์ความต้านทานชนิดแพลตินัมมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง แม้จะมีราคาแพงมากที่สุด ตัวอย่างของทรานสดิวเซอร์ของการวัดแบบนี้ ได้แก่ ทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิชนิดความต้านทาน (Resistance temperature transducer : RTD) และเทอร์มิสเตอร์ (Thermister)



ภาพที่ 2.13

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับค่าอุณหภูมิในโลหะต่างๆ

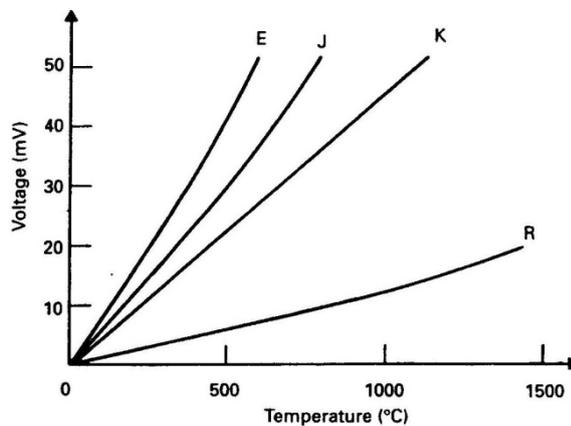
3. การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันระหว่างโลหะต่างชนิดกันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จากภาพที่ 2.14 แสดงโลหะ 2 ชนิดเชื่อมต่อกัน 2 จุด ถ้าด้านใดด้านหนึ่งได้รับความร้อนที่ค่าอุณหภูมิ T_1 และอีกด้านหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเป็น T_2 ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยค่ากระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและค่าอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ซึ่งสามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำได้ อุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานเช่นนี้เรียกว่า เทอร์โมคัปเปิล



ภาพที่ 2.14

โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิลอย่างง่าย

ถึงแม้เราจะสามารถนำโลหะต่างชนิดใดๆ ทำเทอร์โมคัปเปิล ในหลายๆ ปีที่ผ่านมาได้มีการจำมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่มีการจัดทำเป็นลายลักษณ์อักษร ซึ่งสามารถนำไปใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ผลิตได้โดยจากภาพที่ 2.15 ได้เปรียบเทียบค่าตอบสนอง (Output) ของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด และตารางที่ 2.8 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล



ภาพที่ 2.15

ความไวของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ

4. การเปลี่ยนแปลงพลังงานแผ่รังสีตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อวัตถุใดได้รับความร้อน จะแผ่ความร้อนในรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำจะไม่เกิดการแผ่ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะแผ่รังสีที่มองเห็นได้ การแผ่รังสีนี้สามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิได้

ตารางที่ 2.8

ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล

Type	Material +	Material –	$\Delta V/^\circ\text{C}$ at 100°C (μV)	Usable range ($^\circ\text{C}$)	Comments
E	Chromel (90% nickel, 10% chromium)	Constantan (57% copper, 43% nickel)	68	0 to 800	Highest-output thermocouple
T	Copper	Constantan	46	-185 to +300	Used for cryogenics and mildly oxidising or reducing atmospheres (e.g. boiler flues)
K	Chromel	Alumel (94% nickel, 3% manganese, 2% aluminium, 1% silicon)	42	0 to 1100	General purpose, widely used
J	Iron	Constantan	46	20 to 700	Used with reducing atmospheres. Iron tends to rust and oxidise; can be improved with chrome/nickel/titanium steel
R	Platinum/13% rhodium	Platinum	8	0 to 1600	High temperatures (e.g. steel making). Used in UK in preference to type S
S	Platinum/10% rhodium	Platinum	8	0 to 1600	As type R, but used outside UK
V	Copper	Copper/nickel	—	—	Compensating cable for type K to 80°C can also be used for type T
U	Copper	Copper/nickel	—	—	Compensating cable for types R and S to 50°C

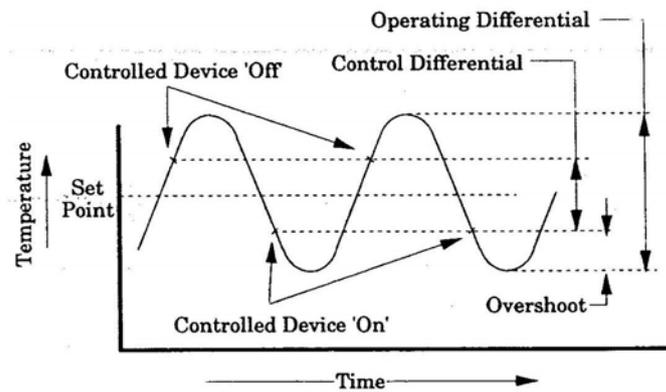
ที่มา : Michael J.Coffin 1992, p.34

2.4.3 การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control action)

การควบคุมอัตโนมัติ เป็นความสามารถของระบบในการจัดการแก้ไขสัญญาณของผลตอบสนอง (Output signal) ที่ถูกต้องไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมในการตอบสนองต่อการปรับสัญญาณขาเข้า (Input signal) จากตัวแปรที่ถูกควบคุม (Controlled variable) โดยทั่วไปการควบคุมอัตโนมัติแบ่งได้ 5 แบบ ซึ่งมีความแตกต่างกันตามอัตราการตอบสนองต่อการปรับค่าของตัวแปรควบคุม (Controlled variable) เพื่อให้เข้าสู่สภาวะที่ต้องการ มีดังนี้

1. แบบสองตำแหน่ง (Two positions) หรือเรียกว่าการควบคุมแบบเปิด/ปิด (on/off control) หรือการควบคุมแบบดิจิทัล (Digital control) เป็นแบบการควบคุมที่ง่ายที่สุด

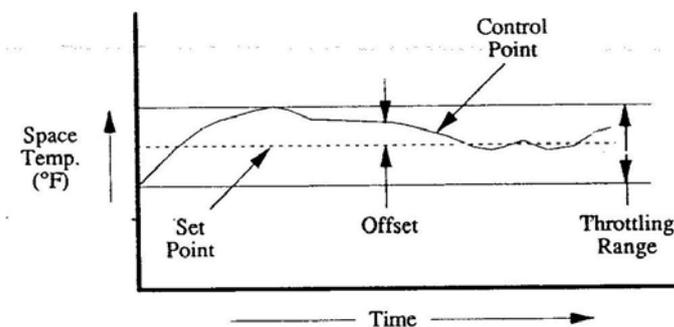
ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับระยะระหว่างสภาวะเปิดและปิด ระบบจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าที่วัดได้ช้าหรือเร็วอย่างไร ภาพที่ 2.16 แสดงถึงการตอบสนองของการควบคุมแบบสองตำแหน่ง



ภาพที่ 2.16

Two position control action chart (heating action shown)

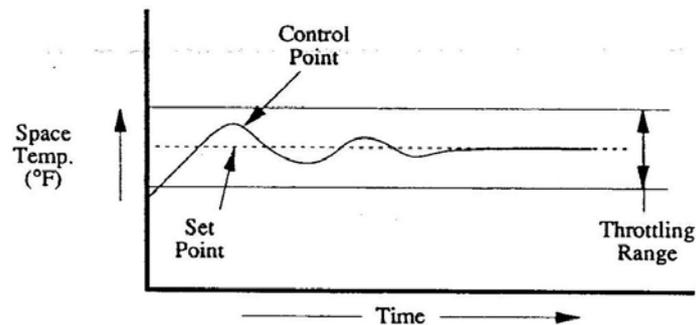
2.การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional) หมายถึงค่าผลตอบสนอง (output) ของระบบสามารถแปรเปลี่ยนในช่วงการควบคุมได้ อุปกรณ์ควบคุมสามารถเปลี่ยนตำแหน่งตามสัดส่วนในการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของตัวแปรควบคุม โดยทำให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการควบคุม คือใช้เวลาที่สั้นที่สุดและแม่นยำมากที่สุด ภาพที่ 2.17 แสดงการควบคุมแบบนี้



ภาพที่ 2.17

Proportional control action

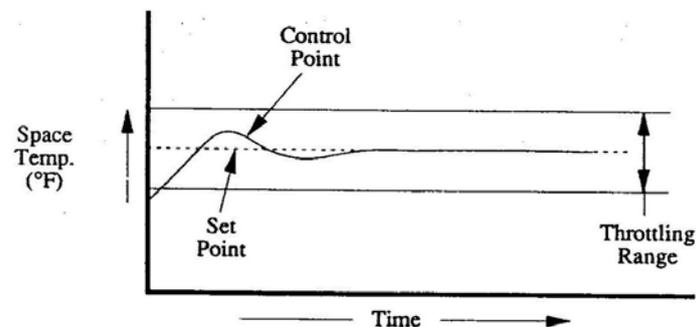
3. Proportional plus integral (PI or reset control) เป็นนำฟังก์ชันอินทิกรัลมาใช้ในการควบคุมแบบสัดส่วนโดยกำจัดค่าออฟเซ็ท (offset) ที่เกิดขึ้นโดยฟังก์ชันอินทิกรัลในการเปลี่ยนค่าจุดควบคุม (control point) ของตัวควบคุมโดยปริมาณของค่าออฟเซ็ท นำค่าควบคุมกลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ (Set point) โดยทั่วไปมีการใช้การควบคุมแบบนี้กับระบบที่มีภาวะที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมอย่างช้าๆ



ภาพที่ 2.18

Proportional plus integral (PI) control action

(4) Proportional plus integral plus derivative (PID) การควบคุมแบบนี้เป็นการเพิ่มระดับของสมการควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งก็คือฟังก์ชันเดริเวทีฟ (derivative function) ลดเวลาในการปรับค่าจุดควบคุมให้เร็วขึ้น



ภาพที่ 2.19

Proportional plus integral plus derivative (PID) control action

(5) Artificial intelligence (AI) เป็นการควบคุมที่อาศัยการเรียนรู้ด้วยตัวเอง ทำให้เกิดการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมล่วงหน้า โดยอาศัยการประเมินจากข้อมูลในอดีต (Coffin & Michael J., 1991, pp.19-26)

2.5 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A,B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1.ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดียว (Main effects) คือ ผลกระทบกรณี ที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดียว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบปัจจัย B และผลกระทบ ปัจจัย C

2.ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors or 2-way Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ผลกระทบของ ปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB,BC และ AC

3.ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

วัตถุประสงค์หลักของการใช้การทดลองแฟคทอเรียลนั้น ก็คือ การสำรวจศึกษา ผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา; Interactions) ระหว่างปัจจัย จึงควรทำความเข้าใจในความหมายของ คำว่าผลกระทบร่วมหรืออันตรกิริยาก่อน ในที่นี้จะใช้คำง่าย ๆ คือ “ผลกระทบร่วม”แทน”อันตร กิริยา ผลกระทบร่วม (Interactions) คือ “ความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง (Y) ที่จะมีค่า ต่าง เท่ากัน เมื่อทดลองทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยหนึ่ง (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้แต่ละระดับของปัจจัยที่สอง”

การออกแบบการทดลองกรณี 2^2 แฟคทอเรียล (2^2 Factorial Design) การทดลอง แบบนี้ ใช้ได้อย่างแพร่หลายสำหรับการทดลองต่างๆ ที่ประกอบด้วยปัจจัยหลายๆ ปัจจัย นอกจากนี้ยังเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัยเหล่านั้นต่อผลตอบสนองที่ ต้องการด้วย โดยการออกแบบการทดลองกรณีหลายปัจจัย หลายๆ กรณีงานวิจัยมักเกี่ยวข้องกับ “การออกแบบเฉพาะ” จึงมีการออกแบบแนวคิดเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานจริงต่อไป การออกแบบ

เฉพาะในที่นี้หมายถึง การออกแบบการทดลองใน 2 ระดับของปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ เป็นจำนวน k ปัจจัยโดยระดับนี้อาจแทน “ระดับของปริมาณ (Quantity Level)” เช่น ประสิทธิภาพ เครื่องจักร คน โดยแบ่งออกเป็นระดับสูง (high) และต่ำ (low) หรือเป็นระดับที่มี (Yes) หรือไม่มี (No) ของปัจจัยนั้นๆ ในการศึกษาบทนี้จะแสดงถึงวิธีการพิเศษสำหรับการออกแบบและการวิเคราะห์โดยสมมติว่า

1. ปัจจัยของผลกระทบเป็นแบบคงที่ (Fixed Effect Model)
2. การออกแบบเป็นแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)
3. ข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

การออกแบบชนิด 2^k นี้มักใช้ในงานทดลองเมื่อมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายตัว ซึ่งให้จำนวนการทดลองที่ต่ำที่สุดใน k ปัจจัยของการออกแบบกรณีหลายปัจจัยที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาจำนวนปัจจัย (Factor Screening Experiment) เนื่องจากพิจารณา 2 ระดับ ในแต่ละปัจจัย นอกจากนี้มีการสมมติให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเป็นแบบ “เชิงเส้น” ในช่วงของระดับการทดลองที่ได้เลือกไว้

การออกแบบในอนุกรมของ 2^k แฟคทอเรียล นี้มีเพียง 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A และ B ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับเท่านั้น จึงเรียกรูปแบบการทดลองชนิดนี้ว่า “การออกแบบการทดลองกรณี 2^2 แฟคทอเรียล ซึ่งระดับของปัจจัยประกอบไปด้วยระดับต่ำ (Low) และระดับสูง (high) เท่านั้น

ตารางที่ 2.9

ตารางที่แสดงสัญลักษณ์ของผลกระทบ หรืออิทธิพลที่เกิดขึ้นจากปัจจัย และความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย

	อิทธิพลที่เกิดขึ้นจาก	สัญลักษณ์
ปัจจัยหลักที่ 1	Main Effect of A	A
ปัจจัยหลักที่ 2	Main Effect of B	B
ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย	Interaction of A and B	AB

ที่มา : ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 201

นอกจากนี้กำหนดให้ระดับของปัจจัยแทนด้วยสัญลักษณ์ดังแสดงในตารางที่ต่อไป

ตารางที่ 2.10

ตารางที่แสดงสัญลักษณ์ของปัจจัยและระดับของปัจจัย

ระดับ	สัญลักษณ์
ต่ำ	Low -
สูง	High +

ที่มา : ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 201

ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จึงประกอบไปด้วย 4 วิธีการปฏิบัติ และเราสามารถเขียนวิธีปฏิบัติทั้งหมดด้วยสัญลักษณ์มาตรฐาน ซึ่งเรียกว่า Treatment Combination โดยการใช้อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ กล่าวคือ

ถ้าองค์ประกอบการทดลอง หรือวิธีปฏิบัติที่มีการกำหนดปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งอยู่ในระดับสูง (High) จะมีการแสดงเป็นตัวอักษรเล็ก

ถ้าองค์ประกอบการทดลอง หรือวิธีปฏิบัติที่มีการกำหนดปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งอยู่ในระดับต่ำ (Low) จะไม่มีการแสดงเป็นอักษร ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ต่อไป

ตารางที่ 2.11

ตารางที่แสดงสัญลักษณ์ของผลรวมข้อมูลการทดลองในแต่ละวิธีปฏิบัติ

ปัจจัย		Treatment Combination
A	B	
Low	Low	(1)
High	Low	a
Low	High	b
High	High	ab

ที่มา : ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 202

หลักการเขียนสัญลักษณ์มาตรฐานนี้สามารถนำไปใช้ได้ในทุกๆ กรณีของการออกแบบการทดลอง กรณี 2^2 แฟคทอเรียล นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดเพิ่มเติมกล่าวคือ ผลจากการปฏิบัติ a,b,ab และ (1) หมายถึง “ผลรวมในทุกๆ ครั้งของการทดลอง (n)” ดังนั้นผลกระทบหลักของปัจจัยหนึ่งจะเป็นค่าเฉลี่ยของผลกระทบทั้งหมด (Total Effect) จากการปฏิบัติที่เกิดขึ้น (ซึ่งสามารถแทนด้วยสัญลักษณ์มาตรฐาน) แต่มีเครื่องหมายบวกและลบที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามมีปริมาณที่เท่ากันในแต่ละเครื่องหมาย

การหาผลกระทบหลัก (Main Effect) ของปัจจัย A

= ผลเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองปัจจัย A เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระดับจากต่ำไปสูง

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2n} \{[a - (1)] + [ab - b]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] = \bar{y}_A^+ - \bar{y}_A^- \end{aligned} \quad (2.25)$$

การหาผลกระทบหลัก (Main Effect) ของปัจจัย B

= ผลเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองปัจจัย B เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระดับจากต่ำไปสูง

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2n} \{[b - (1)] + [ab - a]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] = \bar{y}_B^+ - \bar{y}_B^- \end{aligned} \quad (2.26)$$

การหาผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A และ B (AB-Interaction)

= ผลเฉลี่ยของความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลกระทบปัจจัย A ที่ระดับสูงและต่ำของ B

$$= \frac{1}{2n} \{[ab - b] + [a - (1)]\} = \bar{y}_{AB}^+ - \bar{y}_{AB}^- \quad (2.27)$$

ถ้าค่าผลกระทบหลักมีค่า

(+) หมายความว่า ถ้าเพิ่มระดับปัจจัยจากต่ำไปสูง ค่าตอบสนองจะเพิ่มขึ้น

(-) หมายความว่า ถ้าเพิ่มระดับปัจจัยจากต่ำไปสูง ค่าตอบสนองจะลดลง

ขั้นตอนต่อไปคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อใช้ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยต่อผลการทดลองที่กำลังสนใจ โดยในขั้นตอนแรกจะต้องพิจารณาผลกระทบทั้งหมด (Total Effects) หรืออาจเรียกว่า คอนทราสต์ (Contrast) ซึ่งเป็นผลรวมของผลกระทบอันเกิดจากปัจจัย A และ B รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองคือ A และ B ซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ต่อไป

ตารางที่ 2.12

ตารางที่แสดงคอนทราสต์ (Contrast) เพื่อใช้ในการคำนวณผลกระทบของปัจจัยหลักและผลกระทบจากความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย

ปัจจัย/ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย	(1)	a	b	ab	คอนทราสต์
A	-1	+1	-1	+1	$ab + a - b - (1)$
B	-1	-1	+1	+1	$ab + b - a - (1)$
AB	+1	-1	-1	+1	$ab + (1) - a - b$

ที่มา : ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 203

และผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares, SS) ของปัจจัยใดๆ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{(\text{Total Contrast})^2}{\text{จำนวนการทดลองทั้งหมด}} \quad (2.28)$$

ในที่นี้ซึ่งเป็นการพิจารณาการออกแบบการทดลองกรณี 2^2 แฟคทอเรียล การคำนวณค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.13

ตารางที่แสดงการคำนวณค่าผลรวมกำลังสอง เพื่อใช้ในการหาผลกระทบของปัจจัยหลัก และผลกระทบจากความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย

ปัจจัย/ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย	(1)	a	b	ab	คอนทราสต์
A	-1	+1	-1	+1	$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n(4)}$
B	-1	-1	+1	+1	$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n(4)}$
AB	+1	-1	-1	+1	$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n(4)}$

ที่มา : ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 203

โดยแต่ละค่ามีองศาเสรี (Degree of Freedom, df) เท่ากับ หนึ่ง ส่วนค่า SS อื่นๆ ยังคงใช้สูตรตามปกติที่ได้กล่าวมาแล้ว

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \quad (2.29)$$

ซึ่งมีองศาเสรีเท่ากับ $4n-1$ ในขณะที่องศาเสรีสำหรับความผิดพลาดคือ $4(n-1)$ และมีค่า

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.30)$$

ในการแสดงการคำนวณค่าของคอนทราสต์ (Contrast) โดยการใช้ภาพที่ภาพดังกล่าวอาจเกิดความสับสน เข้าใจยากหากประยุกต์ใช้ในกรณีตั้งแต่สามปัจจัยขึ้นไป จึงได้มีการนำเสนอวิธีการเพื่อลดความผิดพลาดในการคำนวณคอนทราสต์ (Contrast) โดยอาศัย “วิธีการเขียนองค์ประกอบ การทดลอง หรือวิธีปฏิบัติเป็นลำดับมาตรฐาน” และใช้ขั้นตอนดังต่อไปนี้ในการพิจารณาเครื่องหมายหน้าสัญลักษณ์มาตรฐานของวิธีปฏิบัติ

-คอนทราสต์ (Contrast) ของปัจจัยใดๆ จะมีเครื่องหมายหน้าวิธีปฏิบัติเป็นบวก เมื่อมีอักษรตรงกัน เช่น ในกรณี 2 ปัจจัย

วิธีปฏิบัติ	เครื่องหมายกำกับแต่ละวิธีปฏิบัติ สำหรับการคำนวณ Contrast ของปัจจัย A
(1)	-
a	+
b	-
ab	+

วิธีปฏิบัติ	เครื่องหมายกำกับแต่ละวิธีปฏิบัติ สำหรับการคำนวณ Contrast ของปัจจัย B
(1)	-
a	-
b	+
ab	+

-คอนทราสต์ (Contrast) ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยจะเป็น “ผลคูณ หรือ Product” ของ Contrast ทั้งสองตัว เช่น

วิธีปฏิบัติ	เครื่องหมายกำกับแต่ละวิธีปฏิบัติ สำหรับการคำนวณ Contrast ของปัจจัย A		
	A	B	ความสัมพันธ์ระหว่าง AB
(1)	-	-	+
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	+

การเปรียบเทียบด้วยเครื่องหมายแลค่าผลบวกกำลังสองสำหรับ 2^k ในการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลเต็มภาพที่ (กรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ) สามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการใช้การเปรียบเทียบด้วยเครื่องหมาย (Contrast) แทนการวิเคราะห์ด้วยตารางที่วิเคราะห์ความแปรปรวนได้ เนื่องจากการกำหนดค่าโคด (code) แบบออร์ทอกอนัล (Orthogonal Coding) นั้น จะใช้ค่า -1 แทน ระดับปัจจัยที่มีค่าน้อย และค่า +1 แทน ระดับปัจจัยที่มีค่ามาก

การใช้ Contrast นั้นสามารถคำนวณได้ทั้งส่วนของผลรวม (Total Contrast) และค่าเฉลี่ย (Mean Contrast) โดยทำการเขียนภาพที่แผนการทดลองใหม่จากโคด (code) - / +1 ให้อยู่ในภาพที่ของ Treatment Combination (กลุ่มของวิธีปฏิบัติ) โดยมีหลักการเขียนสรุปสั้นๆ คือ ในวิธีการปฏิบัติหนึ่งๆ ปัจจัยใดทำการทดลองที่ระดับสูง (ค่ามาก) Treatment Combination จะกำหนดโดยใช้ “ผลคูณของชื่อปัจจัยทุกปัจจัยที่ทดลองที่ระดับสูง” โดยการแทนอักษรตัวเล็ก กรณีที่ทำการทดลองที่ระดับต่ำ (-1) ทั้งหมด Treatment Combination = (1)

การเขียน Treatment Combination

1) การทดลอง 2^2 Full Factorial (ศึกษา 2 ปัจจัย)

A	B	Treatment Combination
-	-	(1)
-	+	b
+	-	a
+	+	ab

2) การทดลอง 2^3 Full Factorial (ศึกษา 3 ปัจจัย)

A	B	C	Treatment Combination
-	-	-	(1)
+	-	-	a
-	+	-	b
+	+	-	ab
-	-	+	c
+	-	+	ac
-	+	+	bc
+	+	+	abc

เมื่อสามารถแปลงค่าระหว่าง Code และค่า Treatment Combination ได้ จะสามารถทำ “การคำนวณ Contrast ได้โดยใช้ เครื่องหมาย ± 1 ในแต่ละสดมภ์ของปัจจัยที่สนใจคุณกับค่าตอบสนองภายใต้ Treatment Condition นั้นๆ” ก็จะได้ค่า Total Contrast หรือการเปรียบเทียบค่าผลรวมด้วยเครื่องหมาย

ในกรณีที่ต้องการคำนวณค่าเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยเครื่องหมาย (Mean Contrast) ก็ สามารถทำได้ในลักษณะใกล้เคียงกัน เพียงแต่เมื่อเป็นค่าเฉลี่ย จะต้องคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองและหารด้วยเครื่องหมาย + หรือ - ในแต่ละสดมภ์

การวิเคราะห์ด้วยการทดลอง สมมติฐานในตารางที่วิเคราะห์ความแปรปรวนยังคงมีความสำคัญอยู่ การคำนวณค่า Contrast (การเปรียบเทียบเครื่องหมาย) กรณีการทดลอง 2^k แฟคทอเรียล เต็มภาพที่ก็ยังคงมีความสำคัญเช่นกันเนื่องจาก

$$\text{ค่าผลกระทบบ} = \frac{(\text{Total Contrast})}{\text{สิ่งหนึ่งของการคำนวณการทดลองทั้งหมด}} \quad (2.31)$$

$$\text{ค่าผลบวกกำลังสอง (Sum Square) ของปัจจัย} = \frac{(\text{Total Contrast})^2}{\text{สิ่งหนึ่งของการคำนวณการทดลองทั้งหมด}} \quad (2.32)$$

(ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, น. 169-209)

2.4 เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering Economic)

2.6.1 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน เป็นวิธีการที่เพิ่มเติมของวิธีการหามูลค่าปัจจุบัน ซึ่งการหาค่าระยะเวลาในการคืนทุนนี้ สามารถหาได้ทั้งที่อัตราดอกเบี้ยมากกว่า 0 (แบบคิดดอกเบี้ย) และเท่ากับ 0 (แบบไม่คิดดอกเบี้ย)

ระยะเวลาคืนทุน เป็นการประมาณการเวลาที่ได้รับผลรวมของกำไร หรือผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับค่าลงทุนเริ่มต้น ระยะเวลาการคืนทุนมักจะคิดเป็นปี แต่ผลที่ได้รับมักจะไม่ใช่ในรูปแบบจำนวนเต็ม การใช้ระยะเวลาคืนทุนในการวิเคราะห์โครงการมีหลักการ คือ ไม่ควรใช้ระยะเวลาการคืนทุนมาทำการตัดสินใจว่า เราควรทำโครงการนั้นๆ หรือไม่ แต่เรามักจะนำวิธีนี้มาทำการตรวจสอบการลงทุนเบื้องต้นเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานก่อนที่เราจะใช้วิธีการของ present worth analysis มาวิเคราะห์อีกครั้ง

การคำนวณที่อัตราผลตอบแทนมากกว่า 0% ซึ่งเรียกว่า Discounted payback period แต่ในทางปฏิบัติ แล้วมักจะใช้วิธีแบบไม่คิดอัตราดอกเบี้ย หรือแบบ Simple payback เพื่อตรวจสอบการลงทุนเบื้องต้น ว่าควรทำการพิจารณาด้วยวิธีอื่นต่อหรือไม่ ในระยะเวลาคืนทุนแบบ Discounted payback period ที่อัตราดอกเบี้ยมากกว่า 0% สามารถหาค่า n_p ได้ดังนี้

$$0 = -P + \sum NCF_t (P/F, i\%, t) \quad (2.33)$$

หลังจากที่ทราบเวลา n_p ปี ซึ่งเป็นระยะเวลาคืนทุนของโครงการ ซึ่งคิดที่อัตราผลตอบแทน $i\%$ แล้ว ถ้าทรัพย์สินนั้นมีอายุการใช้งานน้อยกว่า n_p แสดงว่าไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน เพราะการใช้งานยังไม่ถึงจุดเกิดความคุ้มค่าในการลงทุน อีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน คือ เราจะไม่พิจารณากระแสเงินสดที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายหลังจากระยะเวลา n_p ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่ทำให้การวิเคราะห์โครงการด้วยระยะเวลาคืนทุนแตกต่างจากวิธีการอื่นๆ ที่ทำการพิจารณากระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ ซึ่งทำให้วิธีการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนมีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีอื่น

2.6.2 อัตราผลตอบแทน (Rate of Return)

เพื่อกำหนดอัตราผลตอบแทนของกระแสเงินของโครงการใดๆ สามารถคำนวณได้จากการใช้สมการของมูลค่าปัจจุบัน (PW) หรือมูลค่ารายปี (AW) อย่างไม่อย่างหนึ่ง การใช้มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนหรือค่าใช้จ่าย (PW_0) เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของรายได้หรือรายรับ

(PW_R) จากนั้นย้ายข้างมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่าย (PW_D) เพื่อให้สมการมีค่าเท่ากับศูนย์ (0) แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาอัตราดอกเบี้ย (i)

$$PW_D = PW_R \quad (2.34)$$

$$0 = -PW_D + PW_R \quad (2.35)$$

การคำนวณหาอัตราดอกเบี้ย (i) โดยใช้สมการมูลค่ารายปีสามารถทำได้ด้วยขั้นตอนดังนี้

$$AW_D = AW_R \quad (2.36)$$

$$0 = -AW_D + AW_R \quad (2.37)$$

ค่าอัตราดอกเบี้ย (i) ที่คำนวณได้จากข้างต้น ซึ่งทำให้สมการทั้งสองเป็นจริง คือ อัตราผลตอบแทนของโครงการ (i^*) การตัดสินใจว่าโครงการทางเลือกใดๆ สมควรถูกเลือกหรือไม่ นั้น ทำได้โดยการนำเอาอัตราผลตอบแทนของโครงการ (i^*) มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่น่าสนใจ (Minimum Attractive Rate of Return: MARR)

ถ้า $i^* \geq \text{MARR}$,ยอมรับโครงการนั้นว่ามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

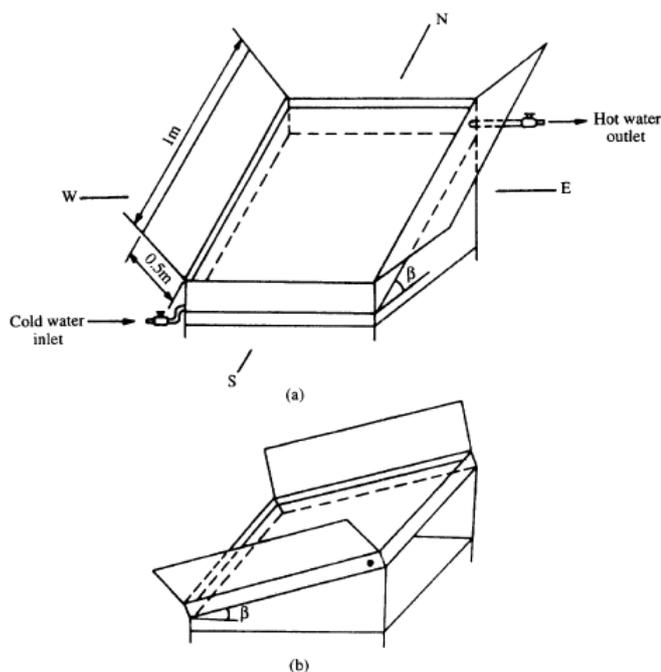
ถ้า $i^* < \text{MARR}$,ไม่ยอมรับโครงการนั้น

(ลีแลนด์ แบลงค์ และ แอนโทนี ทาร์ควิน 2005/2549, หน้า 106-109,131-138)

2.5 วรรณกรรมปริทรรศน์

G.N.Tiwari ,Duong Duc Hong and R.K.Goyal (1998) ได้ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดถังเก็บในตัว เพื่อใช้ชนบทหรือตัวเมืองของประเทศเวียดนามด้วยต้นทุนต่ำ อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้และบำรุงรักษา โดยเครื่องทำน้ำร้อนนี้ทำการทดลองที่เมืองฮานอย ในช่วงเดือนที่อากาศหนาวที่สุดของประเทศเวียดนาม คือ เดือนมกราคม โดยส่วนประกอบหลักประกอบด้วยแผ่นกระจกขนาด 1 ตารางเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็น Absorber รับการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยติดตั้งอยู่ด้านบนถึงบรรจุน้ำหุ้มฉนวนขนาด 100 ลิตร และแผ่นสะท้อน จากศึกษาพบว่ามุมการวางเครื่องทำน้ำร้อนเพื่อให้ตั้งฉากกับแนวรังสีจากดวงอาทิตย์มีผลต่ออุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดต่างๆ บนพื้นโลก และเกิดผลความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เด่นชัดระหว่างการติดตั้งแผ่นสะท้อนกับที่ไม่ติดตั้งแผ่นสะท้อน โดยถ้าติดตั้งแผ่นสะท้อนด้านทิศตะวันออกและตะวันตกโดยทำมุมที่เหมาะสม จากการทดลอง ถ้าวางเครื่องทำน้ำร้อนนี้ในแนวระนาบ จะได้น้ำร้อนอุณหภูมิ 29.3

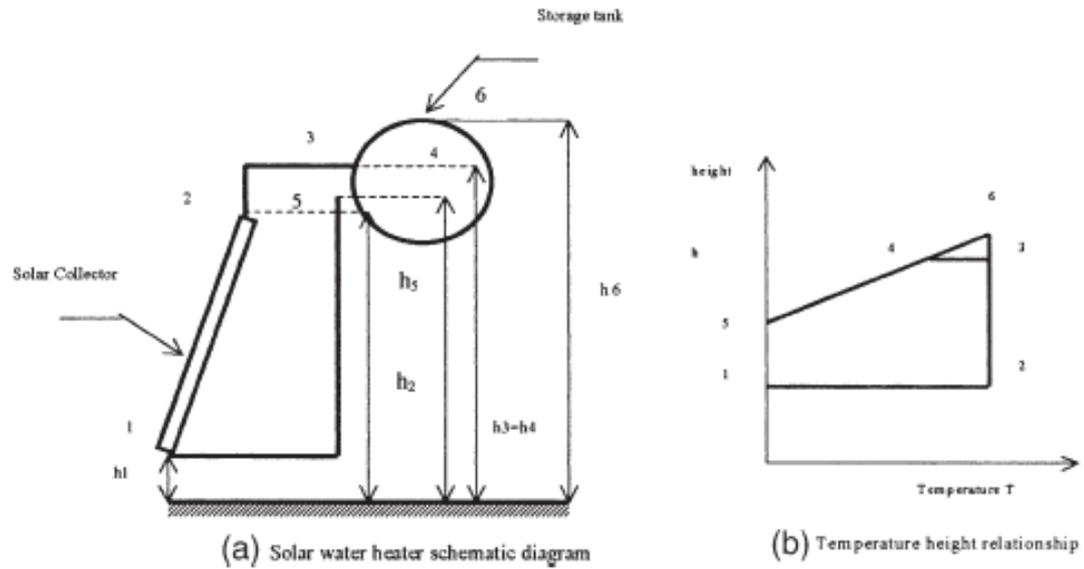
องศาเซลเซียส แต่ถ้าถ้าวางโดยทำมุม 35 องศา กับแนวระนาบและติดแผ่นสะท้อนที่มุม 75 องศา จากแนวระนาบ จะได้น้ำร้อนอุณหภูมิ 29.3 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.20

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดถังเก็บในตัว

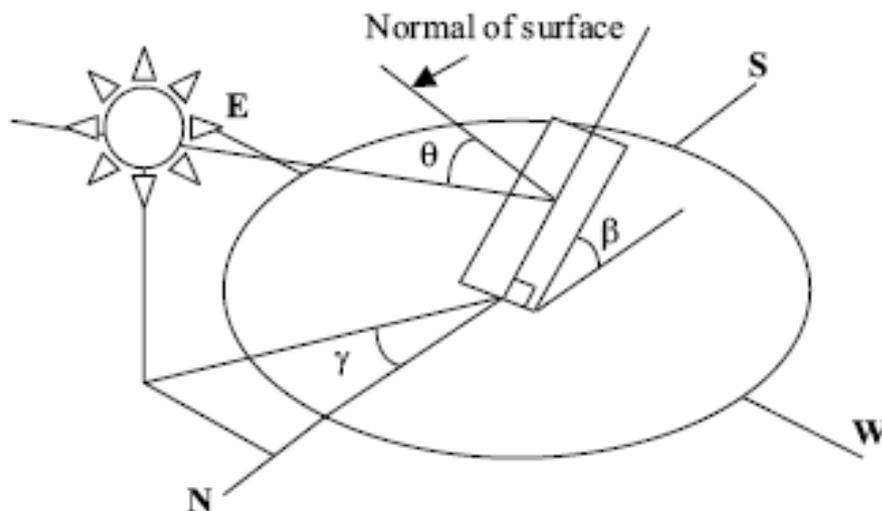
A.A. Karaghoulis and W.E. Alnaser (2001) ได้ศึกษาโดยการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนขนาด 1.1 ตารางเมตร น้ำปริมาณ 100 ลิตรในประเทศบาห์เรน พบว่าสามารถทำน้ำร้อนด้วยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 12.4 ถึง 17.5 องศาเซลเซียส คิดเป็นปริมาณพลังงาน 6.075 ถึง 7.33 เมกะจูลต่อตารางเมตร โดยเฉพาะวันที่มีสภาพอากาศแจ่มใสสามารถทำน้ำร้อนด้วยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 19 ถึง 25 องศาเซลเซียส กำลังความร้อนสูงสุด 695 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิในถังสูงสุดที่ 52 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.21

- (a) ไดอะแกรมของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
- (b) ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

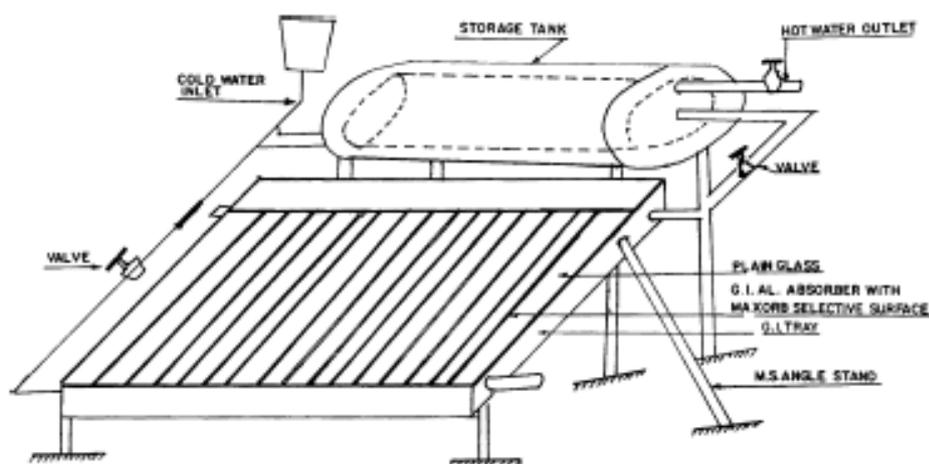
Saiful Bari (2001) ได้ศึกษามุมการวาง (Orientation) เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุดตามภาพที่ 2.22 โดยกล่าวว่ามุมลาดเอียง (Slope : β) ของแผงรับความร้อนที่เหมาะสม สำหรับพื้นที่ในตำแหน่งละติจูดไม่เกิน 40 องศาจากเส้นศูนย์สูตร ให้ใช้มุมลาดเอียงเท่ากับค่าละติจูดของพื้นที่นั้นได้เลย ในขณะที่พื้นที่ในตำแหน่งละติจูดเกินกว่า 40 องศา ให้ใช้มุมลาดเอียงโดยการบวกเพิ่มค่าละติจูดของพื้นที่นั้นประมาณ 10 องศา โดยตำแหน่งละติจูด 0 – 60 องศาเหนือ เมื่อมุมลาดชันอยู่ในช่วง ± 10 องศาจากมุมที่ดีที่สุด ทำให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปีลดลงไม่เกิน 2% แต่จะลดลงเป็น 6% หากมุมลาดชันอยู่ที่ ± 20 องศาจากมุมที่ดีที่สุด สำหรับการวางตำแหน่งของแผงรับแสงห่างจากมุมอาซิมุท (Azimuth Angle : γ) อยู่ที่ ± 20 ทำให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปีลดลง 1% ถ้า ± 40 จะลดลง 2% ส่วนตำแหน่งละติจูดมากกว่า 20 องศาเหนือ จะลดลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 2.22

มุมที่มีความสำคัญต่ออุปกรณ์ด้านพลังงานแสงอาทิตย์

N.M.Nahar (2002) ได้ศึกษาถึงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แผ่นราบ เพื่อลดต้นทุนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงในประเทศอินเดีย ทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เป็นที่นิยม โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนระหว่างการใช้ท่อทองแดงกับแผ่นทองแดง ท่อทองแดงกับแผ่นอลูมิเนียม และท่อเหล็กกล้าไนต์กับแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งอยู่ภายในแผงรับแสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าไม่แตกต่างกัน โดยจะสามารถผลิตน้ำร้อนปริมาณ 100 ลิตร ได้อุณหภูมิสูงสุด 62 องศาเซลเซียส (เวลา 16:00 น.) และสามารถคงอุณหภูมิไว้ที่ 50.4 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าใช้ท่อเหล็กกล้าไนต์กับแผ่นอลูมิเนียมจะทำให้ต้นทุนลดลง และจากการประเมินระยะเวลาคืนทุนจะอยู่ระหว่าง 2.92 – 4.53 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่จะไปทดแทน



ภาพที่ 2.23

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ

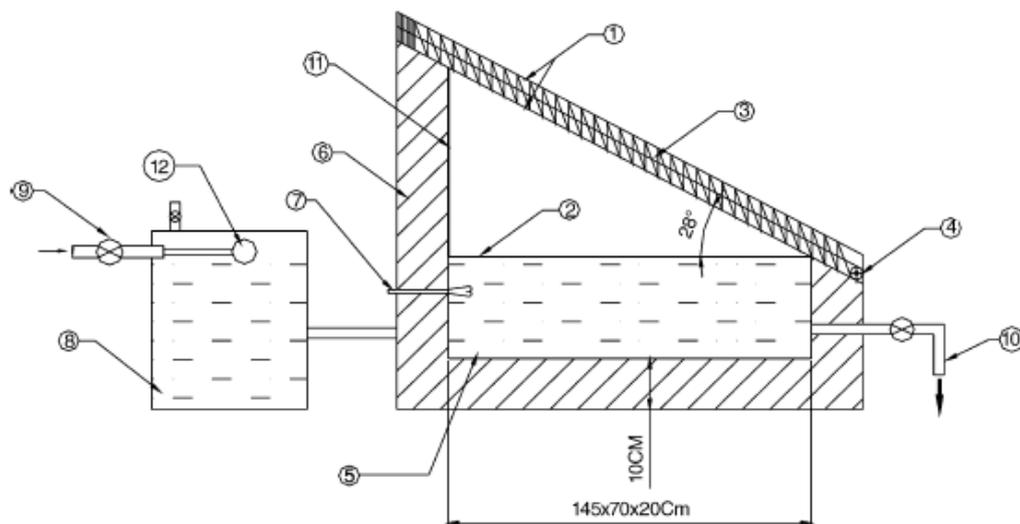
N.M.Nahar (2003) ได้ออกแบบทดลองการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการหมุนเวียนในตัวเอง และถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 ลิตร ในประเทศอินเดีย จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำโดยเฉลี่ยจาก 23.6 องศาเซลเซียส เป็น 60.6 องศาเซลเซียส และยังสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำในช่วงเช้าของวันถัดไปได้ที่โดยเฉลี่ยที่ 51.6 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับร้อยละ 57 และจากการทดลองนี้ ได้ทำนายการใช้งานเครื่องทำน้ำร้อนนี้ ในช่วงฤดูหนาวของประเทศอินเดีย โดยสามารถผลิตน้ำร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 70 องศาเซลเซียส ในตอนเย็นของแต่ละวัน และอุณหภูมิของน้ำในช่วงเช้าของวันถัดไปอยู่ที่ 40 – 60 องศาเซลเซียส จากการศึกษาจึงสรุปได้ว่า เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการหมุนเวียนในตัวเองนี้ มีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้เพื่อทดแทนการใช้อุปกรณ์ที่ต้องอาศัยการสันดาบของเชื้อเพลิงเพื่อทำน้ำร้อนได้

M.N.Nieuwoudt และ E.H.Mathews (2005) ได้ศึกษาออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนแบบเคลื่อนย้ายเพื่อใช้ในพื้นที่ชนบทของประเทศแอฟริกาใต้ เพื่อเป็นอีกทางเลือกในการทำน้ำร้อนจากการทำน้ำร้อนโดยแทนที่การใช้เชื้อเพลิงจำพวกไม้ฟืนหรือถ่านไม้ ซึ่งหายากและราคาแพงมากยิ่งขึ้น โดยสามารถทำน้ำร้อนได้ 60 องศาเซลเซียส ในตอนเย็น และจะลดลงเหลือ 40 องศาเซลเซียส ในเวลาประมาณ 20.00 น.ของแต่ละวัน



ภาพที่ 2.24
เครื่องทำน้ำร้อนแบบเคลื่อนย้าย

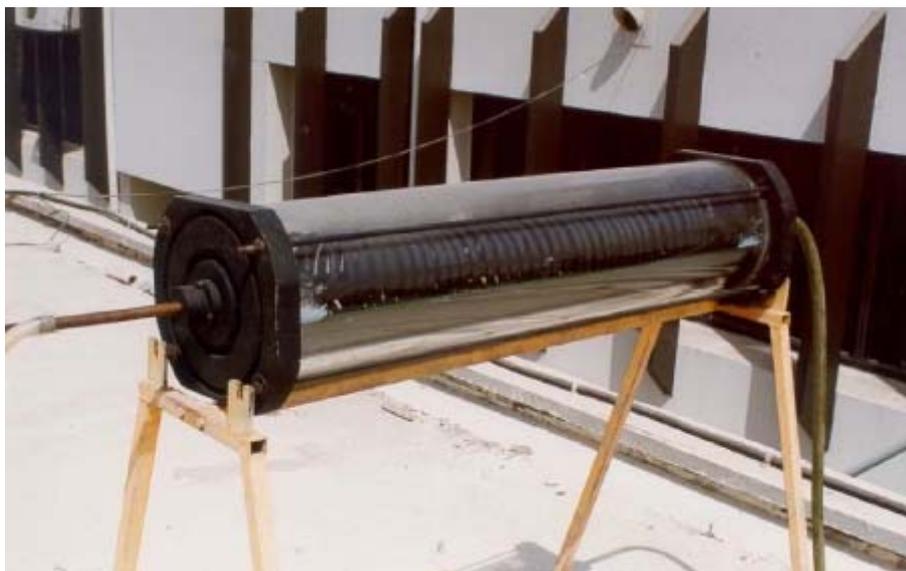
C.Dharuman, J.H.Arakeri และ K.Srinivasan (2006) ได้ศึกษาถึงการประเมินประสิทธิภาพการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในสวนการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร โดยกล่าวว่า ส่วนใหญ่ของน้ำร้อนที่ต้องการทั้งในอาคารบ้านเรือนและอาคารในงานอุตสาหกรรม ต้องการน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส และได้ทำการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการจัดเตรียมแหล่งจ่ายน้ำ ถังผสมและถังจัดเก็บน้ำร้อนในตัว ด้วยพื้นที่ของแผ่นดูดซับ 1.3 ตารางเมตรและความจุน้ำที่ 170 ลิตร สามารถผลิตน้ำร้อนที่ประมาณ 100 ลิตรต่อวัน ศักยภาพของเครื่องทำน้ำร้อนนี้ได้จากภายใต้การใช้งานโดยทั่วไปในหลายๆ กรณีของแต่ละวัน ทุกๆ เข้าเวลา 7.00 น. เมื่อน้ำร้อนถูกเปิดใช้ น้ำดิบจะไหลมาจากวาล์วกลอยเพื่อแทนที่น้ำปริมาณ 100 ลิตรที่ถูกใช้ไป จากช่วงเวลาทั้งวัน น้ำจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 50 – 60 องศาเซลเซียส แล้วอุณหภูมิของช่วงเช้าในวันถัดไปจะลดลงที่ 45 – 50 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพรวมของช่วงกลางวันจะอยู่ที่ 60% และทั้งหมดที่ 40% ซึ่งเพียงพอต่อการใช้ในการอาบน้ำและทำความสะอาดในครัวเรือน โดยในช่วงกลางวัน สามารถนำน้ำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมหรือการรักษาพยาบาลได้ ซึ่งเป็นเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำกว่าแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มีขนาดถึงเก็บเท่ากับประมาณ 30%



ภาพที่ 2.25

การทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในส่วนการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร

Hussain Al-Madani (2006) ได้ออกแบบและทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบทรงกระบอก ส่วนประกอบหลัก ประกอบด้วยแผ่นดูดซับเป็นลักษณะทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุแก้วคุณภาพสูง มีความยาว 0.8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 0.14 เมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร และแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นท่อที่ทำจากทองแดงทาสีดำที่ผิวท่อด้านนอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2 มิลลิเมตร และด้านนอก 3.175 มิลลิเมตร นำมาขดกันเป็นลักษณะคล้ายสปริง ผลที่ได้คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำเข้าและออกอยู่ที่ 27.8 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยทดลองในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายน 2002 โดยประสิทธิภาพสูงสุดที่ 41.8% ได้นำมาประเมินตามหลักเศรษฐศาสตร์โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบทรงกระบอกและแบบแผ่นราบพบว่าสามารถทดแทนได้อย่างดี



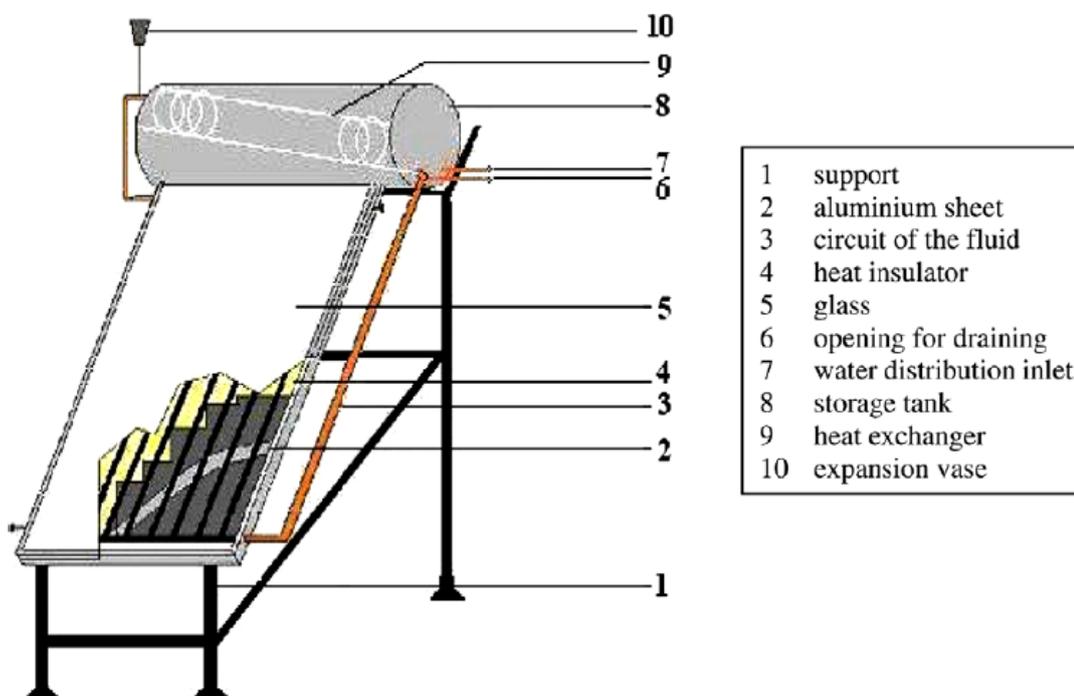
ภาพที่ 2.26

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบทรงกระบอก

Keh-Chin Chang, Tsong-Sheng Lee, Wei-Min Lin, Kung-Ming Chung (2008) ได้กล่าวว่า ใน 2 ทศวรรษที่ผ่านมาของประเทศไต้หวัน สัดส่วนการสำรองพลังงานลดลงอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาการใช้แหล่งพลังงานภาพที่แบบใหม่และเทคโนโลยี เป็นสิ่งจำเป็นต่อการจัดการทางด้านอุปสงค์และอุปทานของพลังงาน การส่งเสริมการใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทำแผนส่งเสริมการใช้ในช่วงแกระหว่างปี ค.ศ. 1986–1991 และเริ่มอีกครั้งตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 จนถึงปัจจุบัน โดยแผนเหล่านี้ได้กระตุ้นต่อผู้บริโภค และทำให้มีการใช้อย่างแพร่หลายอย่างมากยิ่งขึ้น ยังรวมถึงปัจจัยอื่นด้วย นอกจากราคาของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และดัชนีของราคาพลังงานที่มีผลต่อการตลาดของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ยังรวมถึงสภาพภูมิประเทศ ,โครงสร้างทางประชากรศาสตร์ ,ความเป็นสังคมเมืองหรือสังคมชนบท ชนิดและโครงสร้างของบ้านพักอาศัย

P.M.E. Koffi, H.Y. Andoh, P. Gbaha, S. Touré และ G. Ado (2008) ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) โดยทำจากท่อทองแดงแล้วนำมาหมุนขดภายในถังเก็บน้ำร้อน โดยผลจากการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยให้ความร้อน

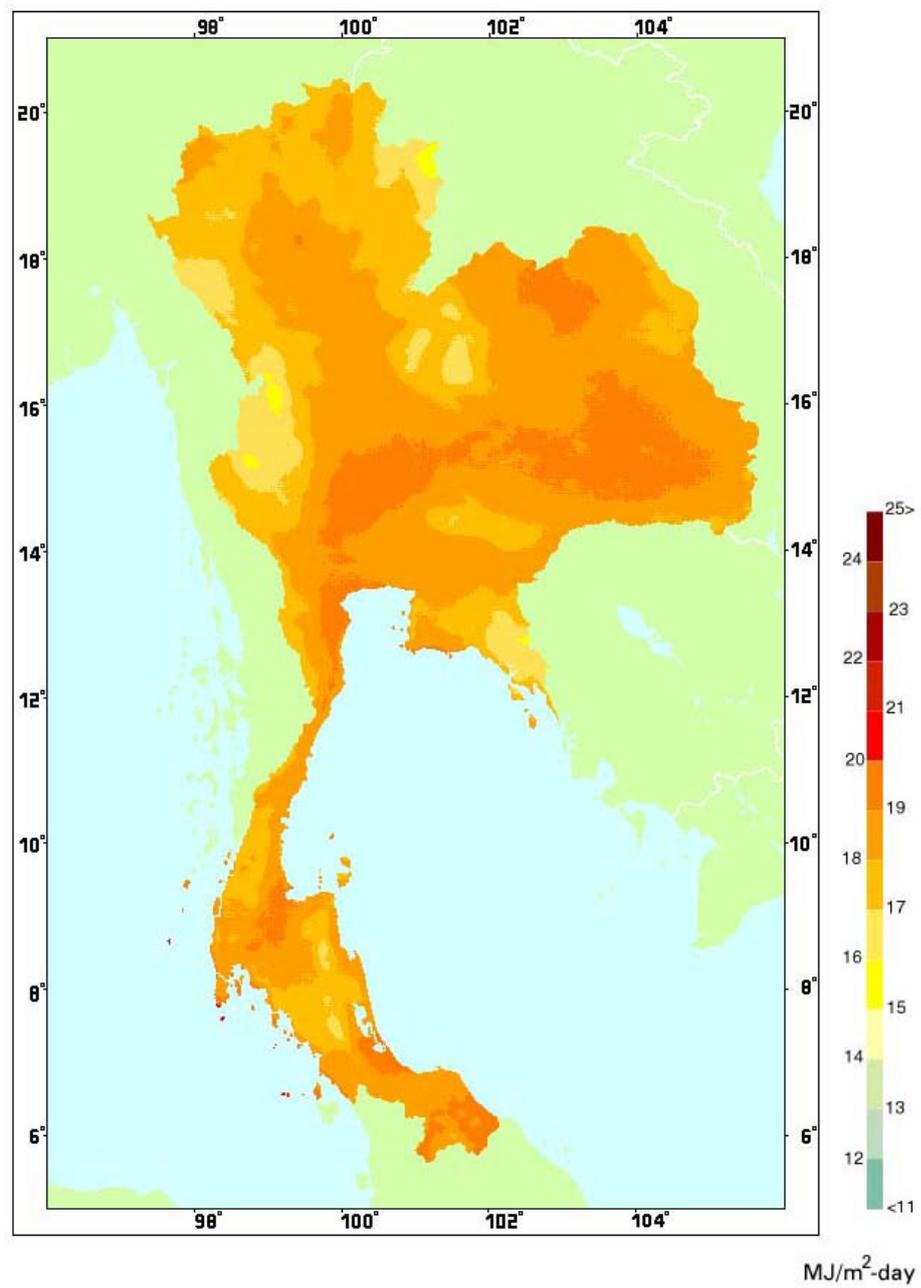
สูงสุดที่ 989 วัตต์ต่อตารางที่เมตร และน้ำที่ไหลออกจากแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดถึง 85 องศาเซลเซียส โดยมีประสิทธิภาพที่ร้อยละ 58



ภาพที่ 2.27

เครื่องทำน้ำร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (ม.ป.ป.) ได้จัดทำโครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย โดยการวิเคราะห์จากข้อมูลดาวเทียม ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดภาคพื้นดิน โดยข้อมูลดาวเทียมที่ใช้เป็นข้อมูลดิจิทัล ในช่วงความยาวคลื่นจากดาวเทียม GMS4 และ GMS5 เป็นระยะเวลา 6 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ.1993-1998 รังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันโดยเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศไทย พบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 เมกะจูลต่อตารางที่เมตรต่อวัน จากผลที่ได้แสดงว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 2.28

แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย