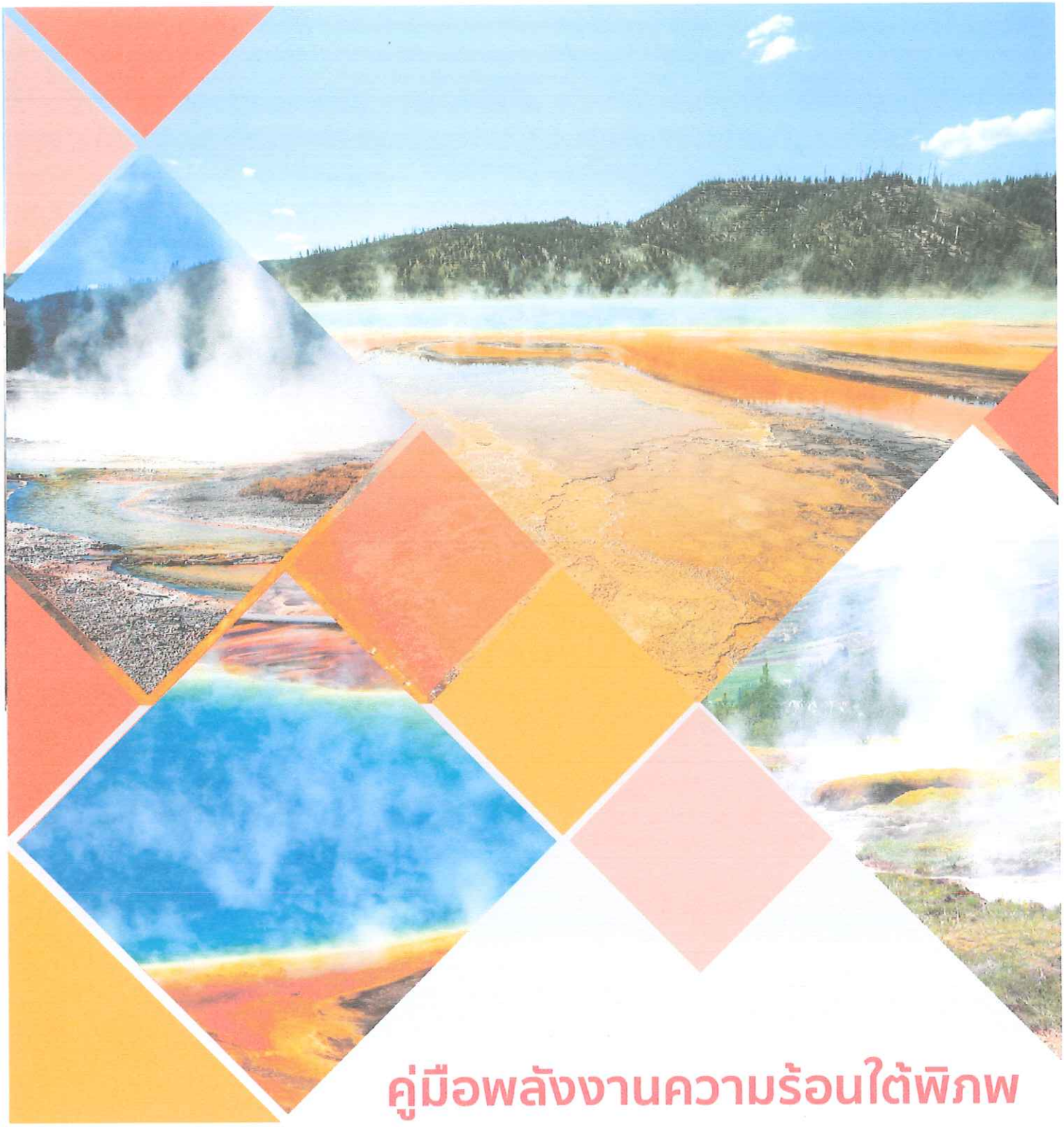


คู่มือพลังงานความร้อนใต้พิภพ

โครงการถ่ายทอดและเผยแพร่การใช้พลังงานทดแทน (2 หลักสูตร)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน
สำนักถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี

สารบัญ

สารบัญ ..... ก

สารบัญรูป ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

คำนำ ..... ซ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย 3

2.1 พลังงานความร้อนใต้พิภพ 3

2.2 ลักษณะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ 6

2.2.1 แหล่งที่เป็นไอน้ำ 6

2.2.2 แหล่งที่เป็นน้ำ 6

2.2.3 แหล่งหินร้อนแห้ง 6

2.3 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย 8

2.4 อุณหภูมิแหล่งกักเก็บ 12

บทที่ 3 การสำรวจพื้นที่และขุดเจาะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ 13

3.1 กระบวนการคัดเลือกพื้นที่ 13

3.1.1 สภาพทางธรณีวิทยาและโครงสร้างแนวเส้น 13

3.1.2 อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวดินและอัตราการไหลของน้ำพุร้อน 13

3.1.3 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น 15

3.1.4 ลักษณะภูมิประเทศ 15

3.1.5 เส้นทางคมนาคม 15
3.1.6 ลักษณะพื้นที่ 17
3.1.7 พืชผลทางการเกษตร 18
3.1.8 แนวทางการบริหารจัดการ 18
3.1.9 ผลการพิจารณาคัดเลือกพื้นที่ 19

3.2 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 20

3.3 การเจาะพัฒนาหลุมผลิตน้ำร้อน 24
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขุดเจาะ 25
3.3.2 รูปแบบทางเทคนิคของการเจาะหลุมสำรวจ 25
3.3.3 ปัญหาของหลุมเจาะน้ำพุร้อนในประเทศไทย 28
3.3.4 การบำรุงรักษาหลุมเจาะน้ำพุร้อนและท่อน้ำพุร้อน 30

บทที่ 4 พลังงานความร้อนใต้พิภพเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า 33

4.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง 35
4.1.1 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้งสู่ชุมชน 36

4.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่ 38
4.2.1 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่สู่ชุมชน 39

4.3 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน 40
4.3.1 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ 42
4.3.2 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงานสู่ชุมชน 47
4.3.3 กรณีศึกษา: การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชนแหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ 51

บทที่ 5 พลังงานความร้อนใต้พิภพเพื่อการอบแห้ง 59

5.1 หลักการอบแห้ง 59

5.2 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ 63
5.2.1 ผนังห้องอบแห้ง 65
5.2.2 ระบบไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิ 65
5.2.3 ตะแกรงภายในห้อง 66

5.2.4 ผนังแจกลม 68
5.2.5 พัดลมและมอเตอร์ 68
5.2.6 แผงแลกเปลี่ยนความร้อน 68
5.2.7 ท่อนำน้ำร้อนเข้าสู่แผงแลกเปลี่ยนความร้อน 70
5.2.8 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน 71

5.3 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ 73
5.3.1 หลักการปั๊มความร้อนแบบอัดไอ 74
5.3.2 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน 78

บทที่ 6 พลังงานความร้อนใต้พิภพในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน 81

6.1 หลักการของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน 81

6.2 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน 86

บรรณานุกรม 89

บรรณานุกรมดัชนี 97

ผู้เรียบเรียง 100

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 การใช้ประโยชน์น้ำพุร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552] 1
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลก [U.S. Geological Survey, 2013] 4
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดแหล่งกักเก็บน้ำร้อน [U.S. Geological Survey, 2013] 5
รูปที่ 2.3 แหล่งหินร้อนแห้ง [Geothermal Resource, 2013] 7
รูปที่ 3.1 ลักษณะแผนที่โครงสร้างแนวเส้น [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 14
รูปที่ 3.2 ลักษณะทางภูมิประเทศ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 16
รูปที่ 3.3 ลักษณะเส้นทางคมนาคม [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 16
รูปที่ 3.4 ลักษณะพื้นที่ของแหล่งน้ำพุร้อนห้วยหมากเหลี่ยม อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 17
รูปที่ 3.5 การจัดวางขั้วแบบชลัมเบอร์เจอร์ และแบบไดโพล-ไดโพล [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 20
รูปที่ 3.6 แผนที่แสดงจุดสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 21
รูปที่ 3.7 ภาพการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 21
รูปที่ 3.8 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบแนวดิ่ง [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 22
รูปที่ 3.9 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบไดโพล-ไดโพล [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 23
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 24
รูปที่ 3.11 รถเจาะสำรวจแบบ Top head drive [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 25
รูปที่ 3.12 โครงสร้างของหลุมเจาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 26
รูปที่ 3.13 การวัดอุณหภูมิของน้ำระหว่างการเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 27
รูปที่ 3.14 เศษหินตัวอย่าง (Cutting) ที่ได้จากการเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 27
รูปที่ 3.15 การเกิดตะกรันที่บริเวณหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560] 28
รูปที่ 3.16 การเกิดตะกรันที่วาล์วควบคุม [นัฐพร, 2560] 29
รูปที่ 3.17 การเกิดตะกรันที่ปากหลุมเจาะและวาล์วควบคุม [นัฐพร, 2560] 29
รูปที่ 3.18 การดับน้ำพุร้อนโดยการอัดน้ำเย็นลงไปในหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560] 30
รูปที่ 3.19 สภาพหลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ดับแล้ว [นัฐพร, 2560] 31
รูปที่ 3.20 การคว้านหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560] 32
รูปที่ 4.1 หลุมเจาะแบบไอแห้ง [REUK-Renewable Energy UK, 2018] [Mahmut, 2018] 35
รูปที่ 4.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง [นัฐพร, 2560] 36

รูปที่ 4.3 โรงไฟฟ้าย่อย McCabe หน่วยที่ 5 และ 6 ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ The Geysers [California Energy Commission, 2018] 37
รูปที่ 4.4 Larderello Geothermal Complex, Italy [ClimateCare, 2018] 37
รูปที่ 4.5 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่ [นัฐพร, 2560] 38
รูปที่ 4.6 Wairakei Power Station [Christopher, 2015] 39
รูปที่ 4.7 Sarulla Geothermal Power Plant [Geothermal Resources Council, 2018] 39
รูปที่ 4.8 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองสารทำงาน [U.S. Department of Energy, 2013] 40
รูปที่ 4.9 ชุดสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549] 41
รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ในวัฏจักรแรงคิน [นัฐพร, 2560] 42
รูปที่ 4.11 แผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปีแสดงกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรแรงคิน [นัฐพร, 2560] 43
รูปที่ 4.12 การทำงานจริงของกังหัน (3-4) และปั๊ม (1-2) [นัฐพร, 2560] 45
รูปที่ 4.13 กระบวนการไอเซนทรอปิกที่ปั๊มและกังหัน [นัฐพร, 2560] 45
รูปที่ 4.14 หลุมเจาะน้ำพุร้อนลึก 1 กิโลเมตร ประกอบไปด้วยของเหลวร้อยละ 90 และไอน้ำร้อยละ 10 [นัฐพร, 2560] 48
รูปที่ 4.15 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำพุร้อนและน้ำสะอาด [นัฐพร, 2560] 49
รูปที่ 4.16 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดกำลังผลิต 60 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] [นัฐพร, 2560] 49
รูปที่ 4.17 สภาวะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ของ Qing-Shui power plant [นัฐพร, 2560] 50
รูปที่ 4.18 แหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง [นัฐพร และคณะ, 2560] 51
รูปที่ 4.19 หลุมเจาะน้ำพุร้อนทั้ง 6 หลุม [นัฐพร และคณะ, 2560] 52
รูปที่ 4.20 ถังพักน้ำพุร้อนของหลุมเจาะที่ 1 ก่อนการนำไปใช้ประโยชน์ด้านนันทนาการและการท่องเที่ยว [นัฐพร และคณะ, 2560] 54
รูปที่ 4.21 แผนภาพการใช้ประโยชน์ร่วมด้านการท่องเที่ยวและการผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อนสำหรับแหล่งน้ำพุร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และคณะ, 2560] 55
รูปที่ 4.22 แบบแปลนโรงเรือนติดตั้งระบบผลิตพลังงานร่วมแบบขั้นบันไดด้านหน้า [นัฐพร และคณะ, 2560] 56
รูปที่ 4.23 แบบแปลนโรงเรือนติดตั้งระบบผลิตพลังงานร่วมแบบขั้นบันไดด้านหลัง [นัฐพร และคณะ, 2560] 56
รูปที่ 4.24 โรงเรือนระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และคณะ, 2560] 57
รูปที่ 4.25 แบบแปลนระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [นัฐพร และคณะ, 2560] 57
รูปที่ 4.26 ต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [นัฐพร และคณะ, 2560] 58
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและเวลาในการอบแห้ง (Drying curve) [นัฐพร, 2560] 60

รูปที่ 5.2 การหาช่วงเวลาในการอบแห้ง [นัฐพร, 2560] 61
รูปที่ 5.3 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์และส่วนประกอบ [นัฐพร, 2560] 64
รูปที่ 5.4 แสดงการหมุนเวียนลมภายในห้องอบแห้ง [Nattaporn et al., 2014] 64
รูปที่ 5.5 ลักษณะแผ่นฉนวนการขึ้นฉนวนโพลีสไตรีน [นัฐพร, 2560] 65
รูปที่ 5.6 ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าของห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560] 66
รูปที่ 5.7 ชั้นวางตะแกรงเหล็กภายในห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560] 67
รูปที่ 5.8 โครงสร้างตะแกรงเหล็กภายในห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560] 67
รูปที่ 5.9 ผนังแจกลม [นัฐพร, 2560] 68
รูปที่ 5.10 โครงเหล็กรองรับน้ำหนักอุปกรณ์ระบบอบแห้ง ใบพัดและมอเตอร์ [นัฐพร, 2560] 69
รูปที่ 5.11 แผงแลกเปลี่ยนความร้อนหรือคอยล์ร้อน (Drying coil) [นัฐพร, 2560] 69
รูปที่ 5.12 ระบบท่อนำน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560] 70
รูปที่ 5.13 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อน [นัฐพร, 2560] 71
รูปที่ 5.14 ระบบท่อนำน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560] 72
รูปที่ 5.15 ตะแกรงวางผลิตผลทางการเกษตรสำหรับอบแห้ง [นัฐพร, 2560] 72
รูปที่ 5.16 แผนผังขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงาน [นัฐพร, 2560] 73
รูปที่ 5.17 ระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ [Nattaporn and Tanongkiat, 2009] 74
รูปที่ 5.18 แผนภาพความดันและเอนทัลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ [นัฐพร, 2560] 75
รูปที่ 5.19 แผนภาพห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ [Nattaporn et al., 2014] 77
รูปที่ 5.20 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอชั้นเดียว [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552] 78
รูปที่ 5.21 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอชั้นเดียว [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552] 79
รูปที่ 5.22 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอสองชั้น [ฟองสวาท และคณะ, 2552] 79
รูปที่ 5.23 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอสองชั้น [ฟองสวาท และคณะ, 2552] 80
รูปที่ 6.1 การขับเคลื่อนด้านความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร, 2560] 82
รูปที่ 6.2 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร, 2560] 83
รูปที่ 6.3 ห้องเย็นระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนและห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ [นัฐพร, 2560] 86
รูปที่ 6.4 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ [นัฐพร และชัชวาลย์, 2548] 87
รูปที่ 6.5 ต้นแบบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร และคณะ, 2560] 88

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549] 8
ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำพุร้อนผิวดิน [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 14
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของแหล่งน้ำพุร้อน [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 15
ตารางที่ 3.3 แผนการนำพืชผลทางการเกษตรมาแช่เย็นหรืออบแห้ง [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 18
ตารางที่ 3.4 แบบประเมินความเหมาะสมโดยรวม [ฟองสวาท และคณะ, 2551] 19
ตารางที่ 4.1 การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพทั่วโลก [ThinkGeoEnergy, 2018] 33
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ [การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2556] 47
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลทางกายภาพของแหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง [นัฐพร และคณะ, 2560] 53

คำนำ

คู่มือการอบรม “พลังงานความร้อนใต้พิภพ” เป็นคู่มือที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จัดทำขึ้นภายใต้การถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยีพลังงานทดแทน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาทักษะความรู้ของเจ้าหน้าที่สำนักถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี (สถผ.) ศูนย์บริการวิชาการที่ 1-10 สำนักวิชาการพลังงานเขต พลังงานจังหวัด ให้เป็นหน่วยงานหลักในการถ่ายทอดและเผยแพร่สนับสนุนข้อมูลทางวิชาการ อุปกรณ์เทคโนโลยีพลังงานทดแทน กิจการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานให้กับชุมชนและประชาชนผู้สนใจ เพื่อให้มีการใช้งานพลังงานความร้อนใต้พิภพให้มากขึ้น

โดยในคู่มือเล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 6 บท คือ บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง แนวทางการใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนใต้พิภพ ที่เหมาะสมต่อลักษณะทางกายภาพของประเทศไทย บทที่ 2 แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย บทที่ 3 การสำรวจพื้นที่และขุดเจาะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ บทที่ 4 การผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื้อหานำเสนอ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพในรูปแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับศักยภาพด้านความร้อน บทที่ 5 นำเสนอ ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ที่ใช้พลังงานความร้อนจากน้ำพุร้อนและห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ที่มีการเพิ่มความร้อนของน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำถึงปานกลางมาใช้ในการอบแห้ง บทที่ 6 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน อธิบายการประยุกต์พลังงานความร้อนใต้พิภพ มาใช้ในการผลิตความเย็น

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าคู่มือพลังงานความร้อนใต้พิภพจะสามารถใช้ประกอบการฝึกอบรมและนำความรู้ ความเข้าใจที่ได้ ไปถ่ายทอดและเผยแพร่ เพื่อส่งเสริมเทคโนโลยีให้แพร่หลายมากขึ้น และหากคู่มือที่จัดทำขึ้นมีข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำ ขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้และยินดีรับข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นและคำติชม เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขให้เกิดความเหมาะสมในการใช้งานในโอกาสต่อไป

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

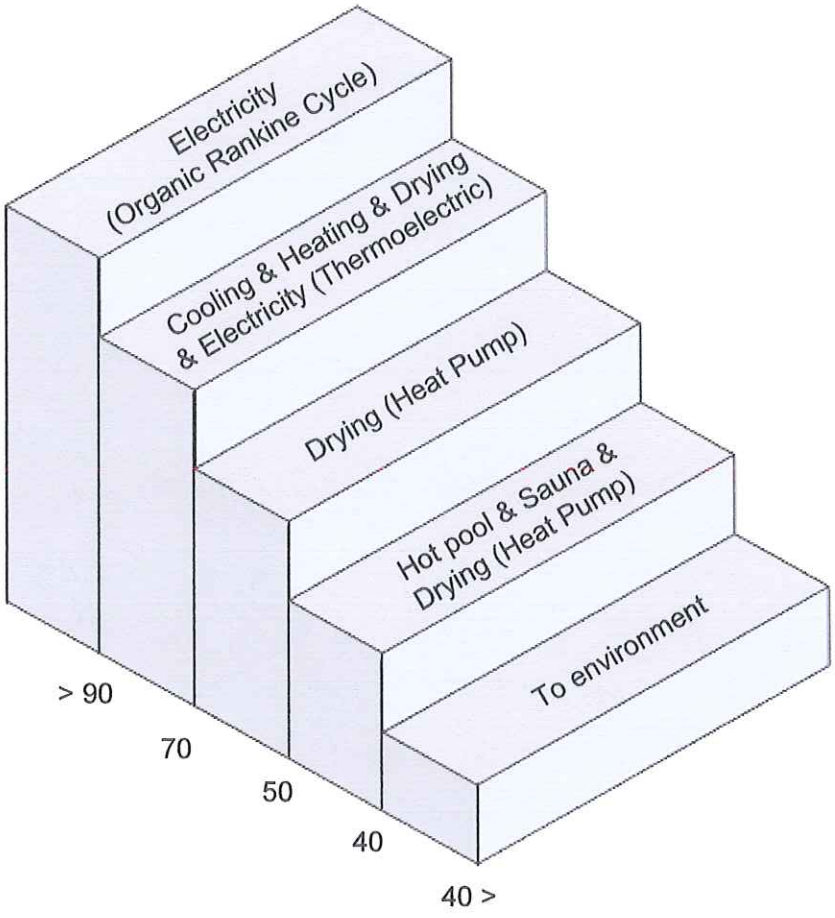
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	ตารางเมตร
C	ค่าความจุความร้อน	กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน
Cp	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	
d	มวลแห้งความชื้นร้อยละ 0	กิโลกรัม
E	พลังงาน	กิโลวัตต์
EER	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน	กิโลวัตต์ [ความร้อน] ต่อกิโลวัตต์ [ไฟฟ้า]
FR	อัตราส่วนการไหล	
h	เอนทัลปี	กิโลจูลต่อกิโลกรัม
M	มวล	กิโลกรัม
Mc	ปริมาณความชื้น	ร้อยละ
$\dot{m}$	อัตราการไหล	กิโลกรัมต่อวินาที
MPH	อัตราการไหลต่อปริมาณความร้อน	กรัมต่อกิโลจูล
P	ความดัน	บาร์ หรือกิโลปาสคาล
q	การถ่ายเทความร้อน	กิโลจูลต่อกิโลกรัมหรือวัตต์
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	กิโลวัตต์
R_C	อัตราการอบแห้ง	กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้งต่อนาที
s	เอนโทรปี	กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
t	เวลา	วินาที
v	ความเร็ว	เมตรต่อวินาที
V	ปริมาตร	ลูกบาศก์เมตร
w	พลังงาน	กิโลจูลต่อกิโลกรัม
W	พลังงานไฟฟ้า	กิโลวัตต์
X	ความเข้มข้น	ร้อยละ
ตัวกรีก	**ความหมาย**	**หน่วย**
η	ประสิทธิภาพ	ร้อยละ
ρ	ความหนาแน่น	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ν	ปริมาตรจำเพาะ	ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม

ตัวห้อย	ความหมาย
a	Actual
A	Absorber
AB	Absorption chiller
Ave	Average
B	Boiler
c	Cold
C	Condenser
CH	Chilled water
Comp	Compressor
CW	Cooling water
ds	Dry solid
e	Super heat/Electricity
E	Evaporator
f	Liquid fluid
F	Finish
fg	Liquid-gas fluid
g	Gas fluid
GS	Geothermal heat source
h	Hot
H	High
HS	Heat source
HSP	Hot spring
HW	Hot water
HX	Heat exchanger
i	Inlet
L	Low
max	Maximum
min	Minimum
o	Outlet
ORC	Organic Rankine Cycle
P	Pump

PHX	Plate heat exchanger
R	Rankine cycle
ref	Refrigerant
S	Start
Sat	Saturation
SHX	Solution heat exchanger
Sup	Supply
Sys	System
th	Thermal
Tur	Turbine
VCHP	Vapor Compression Heat Pump
W	Water
wb	Wet bulb

บทที่ 1
บทนำ

พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) หรือที่รู้จักกันในรูปแบบของน้ำพุร้อน (Hot spring) เป็นแหล่งพลังงานทดแทนประเภทหนึ่ง สามารถทดแทนพลังงานเชิงพาณิชย์ เช่น ไฟฟ้าและน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถพัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำพุร้อนเป็นสำคัญ การนำน้ำพุร้อนมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิผลสูงสุด คือ การใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบขั้นบันได [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552] โดยนำน้ำพุร้อนไปใช้งานในระบบที่ต้องการอุณหภูมิสูงก่อน เมื่อน้ำพุร้อนผ่านการใช้งานแล้วจะมีอุณหภูมิลดลง จากนั้นจึงนำน้ำพุร้อนไปใช้งานในระบบต่อไป เป็นลักษณะขั้นบันไดดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การใช้ประโยชน์น้ำพุร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552]

จากข้อมูลการใช้งานพลังงานความร้อนใต้พิภพดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รูปแบบการใช้งานน้ำพุร้อนอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การใช้งานแบบขั้นบันได ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. **น้ำพุร้อนอุณหภูมิมากกว่า 90 องศาเซลเซียส** สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้า (Electrical process) โดยวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า
2. **น้ำพุร้อนอุณหภูมิ 70-90 องศาเซลเซียส** เป็นช่วงอุณหภูมิที่สามารถนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ได้หลากหลาย ทั้งการผลิตความเย็น (Cooling process) โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) สำหรับห้องเย็นและระบบปรับอากาศ ใช้ในการอบแห้ง (Drying process) โดยระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์ (Centralized drying room) และการเพิ่มคุณภาพความร้อนให้สูงขึ้น (Heating process) โดยตัวแปลงความร้อน (Absorption Heat Transformer, AHT) เพื่อผลิตไฟฟ้าร่วมกับวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์
3. **น้ำพุร้อนอุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส** เทคโนโลยีที่เหมาะสม คือ การเพิ่มคุณภาพความร้อนโดยระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Vapor Compression Heat Pump, VCHP) สำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้ง (Drying process)
4. **น้ำพุร้อนอุณหภูมิน้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส** เป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมได้ค่อนข้างน้อย แต่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านนันทนาการ อาทิเช่น นำไปใช้ในห้องแช่หรือห้องอาบน้ำ และปล่อยกลับลงสู่แม่น้ำหรือแหล่งน้ำพุร้อนต่อไป

บทที่ 2
แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย

พลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานตามธรรมชาติชนิดหนึ่ง ที่มีโอกาสจะพัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ การมีแหล่งน้ำพุร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่บ่งบอกถึงการมีแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพของพื้นที่ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำพุร้อน (Hot spring) เป็นน้ำพุธรรมชาติที่ผุดขึ้นมาจากชั้นเปลือกโลก เนื่องจากความดันของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าของชั้นบรรยากาศ ระดับอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น เกิดจากการที่น้ำบาดาลไหลลงไปตามรอยแตกของหินชั้นเปลือกโลก แล้วได้รับความร้อนจากภายในโลกรวมกับการแพร่กระจายจากหินหลอมเหลว (Magma) ที่ระดับลึก ดังนั้นน้ำพุร้อนแต่ละแห่งอาจมีกลิ่นและรสแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างและปริมาณธาตุรวมทั้งก๊าซที่ละลายมาจากหิน

2.1 พลังงานความร้อนใต้พิภพ

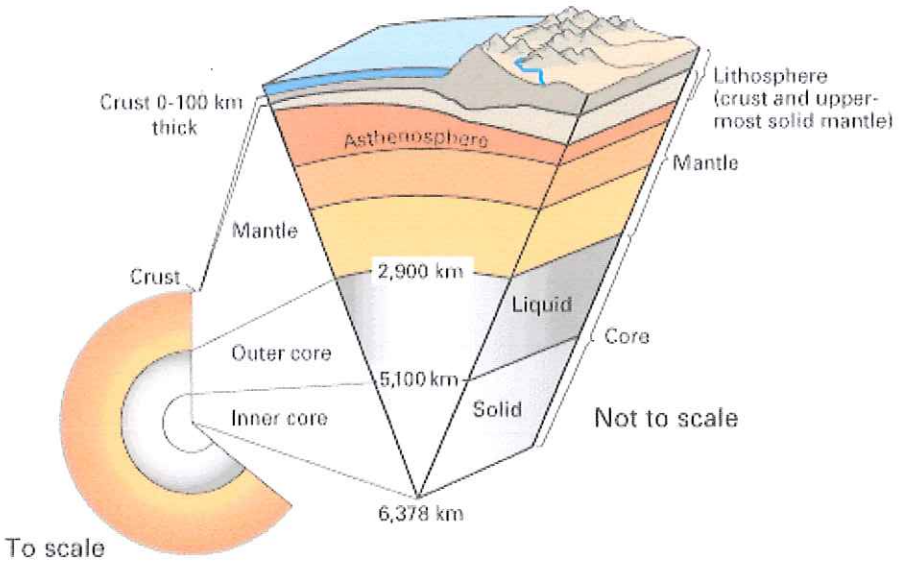
พลังงานความร้อนเป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากการกักเก็บความร้อนไว้ใต้ผิวโลก โดยโครงสร้างของโลกมีด้วยกัน 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อันประกอบไปด้วย

ชั้นเปลือกโลก (Crust) คือ ชั้นนอกสุดของโลกหรือชั้นผิวโลกมีความหนาประมาณ 0-100 กิโลเมตร ทั้งนี้ชั้นเปลือกโลกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกโลกส่วนบน (Upper crust) หรือเรียกว่า ชั้นไซอัล (Sial) เป็นชั้นผิวโลกที่มีความหนาแน่นต่ำ ประกอบด้วยแร่ธาตุจำพวกหินบะซอลต์ (Basalt) และซิลิเกต (Silicates) เป็นส่วนใหญ่ เปลือกโลกส่วนล่าง (Lower crust) หรือเรียกว่า ชั้นไซมา (Sima) เป็นชั้นที่มีความหนาของผิวโลกบาง แต่มีความหนาแน่นมากกว่าเปลือกโลกส่วนบน ชั้นนี้ประกอบด้วยแร่ธาตุจำพวก หินตะกอนและหินทรายเป็นส่วนใหญ่ รวมทั้งเป็นแหล่งสะสมน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นสำหรับผิวโลกที่เป็นภาคพื้นทวีปจะประกอบด้วยเปลือกโลกชั้นไซอัลและชั้นไซมา มีความหนามากกว่าส่วนผิวโลกที่อยู่ใต้มหาสมุทร ซึ่งมีเพียงเปลือกโลกชั้นไซมาเท่านั้น

ถัดจากชั้นเปลือกโลกจะเป็นชั้นแมนเทิล (Mantle) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างเปลือกโลกกับแกนโลก มีปริมาตรมากที่สุดหรือประมาณร้อยละ 80 ของปริมาตรโลก แร่ธาตุในชั้นนี้มีส่วนประกอบของแมกนีเซียม (Magnesium) และเหล็ก (Iron) เป็นส่วนใหญ่ โดยชั้นนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบน (Upper mantle) และส่วนล่าง (Lower mantle) หินในชั้นแมนเทิลส่วนบนมีอุณหภูมิต่ำและค่อนข้างเปราะแตกได้ง่าย เมื่อมีแรงมากระทำและก่อให้เกิดแผ่นดินไหวตามมา ในขณะที่หินในชั้นแมนเทิลส่วนล่างมีอุณหภูมิสูงและค่อนข้างอ่อน ชั้นแมนเทิลอยู่ลึกลงไปจากผิวโลกประมาณ 2,900 กิโลเมตร อุณหภูมิสูงกว่า 3,500 องศาเซลเซียส

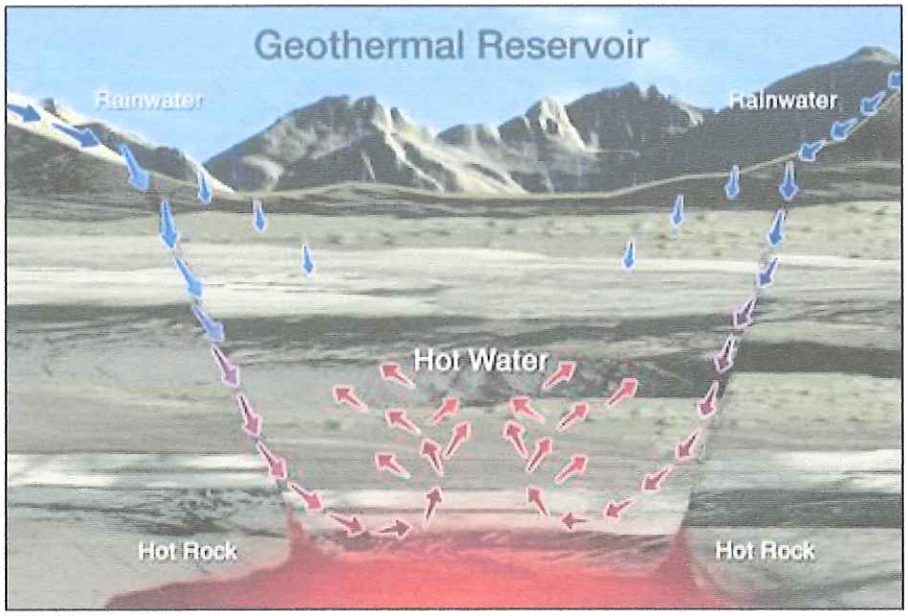
ชั้นในสุดของโลกเรียกว่า แกนโลก (Core) มีความหนาแน่นและอุณหภูมิสูงมาก ประกอบด้วยแร่ธาตุจำพวกโลหะของเหล็ก (Iron) และนิกเกิล (Nickel) เกือบทั้งหมด ในชั้นนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นย่อย ประกอบไปด้วย แกนโลกชั้นนอก (Outer core) มีสภาพเป็นหินเหลวหรือที่เรียกว่า แมกมา (Magma) มีความหนาประมาณ 2,100 กิโลเมตร มีอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของชั้นแกนโลกกับชั้นแมนเทิลอยู่ที่ประมาณ 4,000

องศาเซลเซียส และชั้นในสุดของโลกหรือแกนโลกชั้นใน (Inner core) มีสภาพเป็นโลหะแข็ง มีความหนาประมาณ 1,350 กิโลเมตร มีอุณหภูมิที่รอยต่อระหว่างชั้นนี้กับชั้นนอกสูงถึง 6,400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลก [U.S. Geological Survey, 2013]

น้ำพุร้อนที่เกิดขึ้นล้วนใช้ประโยชน์จากความร้อนใต้พื้นโลก โดยน้ำจากผิวดินที่เกิดจากฝนหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติต่าง ๆ จะไหลซึมลงสู่ชั้นผิวโลกตามรอยแตกของเปลือกโลก จากนั้นน้ำดังกล่าวเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนใต้ผิวโลก ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนในบางครั้งอาจเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำในที่สุด ซึ่งจากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) ของของไหลที่ว่า ของไหลอุณหภูมิสูงจะมีความดันสูงและความหนาแน่นต่ำ ทำให้น้ำร้อนหรือไอน้ำอุณหภูมิสูงที่ถูกกักเก็บไว้ใต้เปลือกโลก ดันตัวขึ้นมายังผิวโลกที่มีความดันต่ำกว่าแหล่งกักเก็บ โดยน้ำร้อนและไอน้ำดังกล่าวจะพุ่งออกจากผิวดินขึ้นสู่อากาศหรือที่เรียกว่า น้ำพุร้อน (Hot spring) โดยความสูงของน้ำพุร้อนที่พุ่งขึ้นสู่อากาศจะขึ้นกับความดันของแหล่งกักเก็บน้ำร้อนใต้พิภพโดยตรง จากนั้นจะทำให้เกิดที่ว่างในแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพ ส่งผลให้น้ำผิวดินที่มีอุณหภูมิต่ำและมีความหนาแน่นของของไหลสูงกว่า สามารถไหลลงไปยังแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพและเกิดเป็นน้ำพุร้อนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดแหล่งกักเก็บน้ำร้อน [U.S. Geological Survey, 2013]

การใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพนิยมใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ถ่ายเทความร้อนจากน้ำพุร้อนไปยังระบบต่าง ๆ เช่น ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ปั๊มความร้อน เป็นต้น หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำพุร้อนจะลดลง และถูกส่งกลับลงไปยังแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้ผิวดินเพื่อรับพลังงานความร้อนอีกครั้ง จึงถือเป็นการจบกระบวนการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพ

2.2 ลักษณะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ

พลังงานความร้อนใต้พิภพจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับภูเขาไฟ โดยพื้นที่ที่ภูเขาไฟยังคงระอุอยู่จะมีศักยภาพพลังงานความร้อนใต้พิภพสูงตามไปด้วย ซึ่งสามารถแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 3 ประเภท [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2557] ดังต่อไปนี้

2.2.1 แหล่งที่เป็นไอน้ำ

เป็นแหล่งกักเก็บความร้อนที่ประกอบด้วยไอน้ำเป็นส่วนมาก (มากกว่าร้อยละ 95) หรือเรียกว่า Steam/Vapor dominated โดยทั่วไปมักจะเป็นแหล่งที่อยู่ใกล้กับหินหลอมเหลวร้อนที่อยู่ในระดับตื้น ๆ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนจะสูงมากกว่า 240 องศาเซลเซียส แหล่งที่กักเก็บความร้อนใต้พิภพประเภทนี้ค่อนข้างจะพบน้อย เนื่องจากจะเกิดใกล้กับแหล่งภูเขาไฟที่ยังคงมีศักยภาพด้านความร้อนอยู่ (ภูเขาไฟยังคงระอุ) แต่มีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง เพราะสามารถนำเข้าสู่ระบบได้โดยตรง รวมถึงมีอุณหภูมิที่สูงอีกด้วย ตัวอย่างของแหล่งกักเก็บแบบไอน้ำ ได้แก่ The Geyser Field ในมลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และ Larderello ในประเทศอิตาลี เป็นต้น

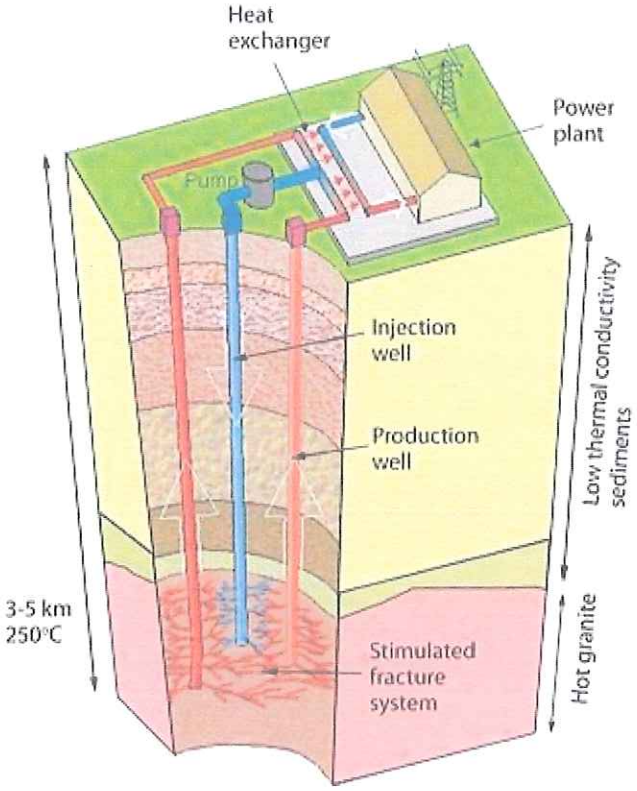
2.2.2 แหล่งที่เป็นน้ำ

เป็นแหล่งกักเก็บสะสมความร้อนที่ประกอบไปด้วย น้ำร้อนหรือของเหลวเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 95) หรือเรียกว่า Water/Liquid dominated อุณหภูมิน้ำร้อนจะขึ้นอยู่กับระดับความลึกของแหล่งกักเก็บ ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพประเภทนี้มักจะพบมากในพื้นที่ที่ภูเขาไฟสงบแล้วหรือภูเขาไฟเก่า ซึ่งเป็นลักษณะของแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพของประเทศไทย

2.2.3 แหล่งหินร้อนแห้ง

เป็นแหล่งสะสมความร้อนที่เป็นหินเนื้อแน่น ไม่มีน้ำร้อนหรือไอน้ำไหลหมุนเวียนอยู่ หรือเรียกว่า Hot dry rock ดังนั้นการนำมาใช้ประโยชน์จำเป็นต้องอัดน้ำเย็นลงไปทางหลุมเจาะ (Injection well) ให้น้ำได้รับความร้อนจากหินร้อน โดยไหล หมุนเวียนภายในรอยแตกที่กระทำขึ้น (Stimulated fracture system) จากนั้นก็ทำการสูบน้ำร้อนขึ้นมาทางหลุมเจาะอีกหลุมหนึ่ง (Production well) ซึ่งเจาะลงไปให้ตัดกับรอยแตกของแหล่งหินร้อนแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตัวอย่างของแหล่งพลังงานความร้อนประเภทนี้ ได้แก่ มลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และ Oita Prefecture ประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น อนึ่งแหล่งหินร้อนแห้งนี้มักเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ภูเขาไฟยังคงมีศักยภาพอยู่

แต่อย่างไรก็ตามการนำความร้อนจากแหล่งหินร้อนแห้งมาใช้ประโยชน์ โดยกระบวนการทำรอยแตกใต้พิภพนี้ จะก่อให้เกิดแผ่นดินไหวตามมา ในบางครั้งอาจสูงถึง 5 Richter scale ซึ่งยังเป็นข้อถกเถียงกันในวงการวิชาการอยู่ในขณะนี้



รูปที่ 2.3 แหล่งหินร้อนแห้ง [Geothermal Resource, 2013]

2.3 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ระบุว่า แหล่งน้ำพุร้อนของประเทศไทยมีจำนวน 112 แหล่ง [สุจิตร และพินิจ, 2522] ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549] ที่ทำการสำรวจแหล่งน้ำพุร้อนทั่วประเทศไทยในปี พ.ศ. 2549 โดยพบแหล่งน้ำพุร้อนทั่วประเทศทั้งหมด 97 แหล่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี เนื่องจากในปัจจุบันสภาวะอากาศทั่วโลกเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงอุณหภูมิอากาศสูงขึ้น ทำให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติบางแห่งแห้งขอด ซึ่งหมายรวมถึงแหล่งน้ำพุร้อนด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549]

ลำดับที่	แหล่งน้ำพุร้อน	จังหวัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
1	โป่งนาคำ	เชียงราย	65.9	0.52
2	ห้วยหมากเหลี่ยม	เชียงราย	56.6	7.00
3	บ่อน้ำพุร้อนผาเสริฐ	เชียงราย	66.2	2.38
4	แม่จัน	เชียงราย	93.0	1.10
5	แม่จัน	เชียงราย	93.0	5.55
6	โป่งน้ำร้อนปู่เฟือง	เชียงราย	73.3	4.50
7	สบโป่ง	เชียงราย	79.3	0.44
8	ห้วยทรายขาว	เชียงราย	56.5	1.96
9	บ่อน้ำร้อนโป่งพระบาท	เชียงราย	73.1	3.80
10	นาโป่ง	เชียงราย	47.7	0.23
11	สันกำแพง	เชียงใหม่	88.5	0
12	บ่อน้ำพุร้อนดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	96.3	0.26
13	บ่อน้ำพุร้อนฝาง	เชียงใหม่	98.1	1.56
14	บ่อน้ำพุร้อนโป่งเดือด	เชียงใหม่	95.0	0
15	บ่อน้ำพุร้อนเทพพนม	เชียงใหม่	98.9	1.65
16	บ่อน้ำพุร้อนโป่งอ่าง	เชียงใหม่	52.3	0.78
17	บ่อน้ำพุร้อนยางปู่โต๊ะ	เชียงใหม่	51.7	0.20
18	บ่อน้ำพุร้อน	เชียงใหม่	42.0	0.65
19	บ่อน้ำพุร้อนบ้านทุ่งโป่ง	เชียงใหม่	75.0	1.19

ลำดับที่	แหล่งน้ำพุร้อน	จังหวัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
20	บ่อน้ำพุร้อน	เชียงใหม่	68.8	3.50
21	บ่อน้ำพุร้อนบ้านห้วยงู	เชียงใหม่	45.4	1.40
22	บ่อน้ำพุร้อน	เชียงใหม่	40.9	0.16
23	บ่อน้ำพุร้อน	เชียงใหม่	55.8	0.81
24	บ่อน้ำพุร้อนมะลิกา	เชียงใหม่	68.1	0.25
25	บ่อน้ำพุร้อนบ้านใหม่หนองบัว	เชียงใหม่	68.1	0
26	บ่อน้ำพุร้อนบ้านแม่แทน	เชียงใหม่	43.3	0.60
27	ผาบ่อง	แม่ฮ่องสอน	65.5	0.67
28	บ่อน้ำพุร้อนโป่งสัก	แม่ฮ่องสอน	53.7	0
29	บ่อน้ำพุร้อนท่าปาย	แม่ฮ่องสอน	78.9	1.44
30	บ่อน้ำพุร้อนโป่งปะ	แม่ฮ่องสอน	87.4	0.23
31	เมืองแปง	แม่ฮ่องสอน	96.0	0
32	แม่ฮี้	แม่ฮ่องสอน	37.4	0
33	แม่ฮุ	แม่ฮ่องสอน	46.8	0.03
34	แม่อุมลองหลวง	แม่ฮ่องสอน	78.8	0.19
35	หนองแห้ง	แม่ฮ่องสอน	81.1	3.00
36	หนองหล่ม	ลำพูน	42.5	1.20
37	บ่อน้ำร้อนแจ้ซ้อน	ลำปาง	83.7	1.10
38	เวียงเหนือ	ลำปาง	61.2	0.94
39	บ้านโป่งน้ำร้อน	ลำปาง	56.2	1.12
40	โป่งน้ำร้อน	ลำปาง	78.0	0
41	โป่งเหม็น	ลำปาง	38.8	0
42	บ่อน้ำพุร้อนบ้านปันเจน	แพร่	53.8	0.23
43	บ่อน้ำพุร้อนแม่จอก	แพร่	80.7	0.05
44	บ่อน้ำร้อนวัดสะแลง	แพร่	65.7	0.80
45	บ่อบ้านโป่งลำปาง	สุโขทัย	55.6	0.16
46	บ่อน้ำร้อนห้วยน้ำร้อน	สุโขทัย	49.8	0.05
47	โพธิ์ทอง	ตาก	74.8	0.10
48	หม่องวา	ตาก	40.8	0.45

ลำดับที่	แหล่งน้ำพุร้อน	จังหวัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
49	บ่อน้ำร้อนพาเจริญ	ตาก	60.0	0.36
50	บ่อน้ำพุร้อนพระร่วง	กำแพงเพชร	50.2	0
51	สำนักสงฆ์โป่งน้ำร้อน	กำแพงเพชร	39.6	0.24
52	อุทยานแห่งชาติแม่วงศ์	กำแพงเพชร	34.3	0.13
53	ลานน้ำแร่ร้อน	เพชรบูรณ์	48.8	0.09
54	บ่อน้ำร้อนวังขาม	เพชรบูรณ์	48.1	0
55	บ้านพุขาม	เพชรบูรณ์	49.5	0
56	บ้านพุเตย	เพชรบูรณ์	37.3	0
57	บ้านสมอทอง	อุทัยธานี	64.5	0
58	บ่อน้ำพุร้อน	ลพบุรี	34.8	0
59	บ่อน้ำร้อนบ้านพุน้ำร้อน	สุพรรณบุรี	40.4	0.24
60	ท้องช้าง	กาญจนบุรี	47.3	0.50
61	หินดาด	กาญจนบุรี	42.6	0
62	บ้านน้ำพุร้อน	กาญจนบุรี	55.7	0
63	วังกระแจะ	กาญจนบุรี	46.6	0
64	บ้านโป่งข้าม	กาญจนบุรี	35.0	2.40
65	บ้านพุน้ำร้อน	กาญจนบุรี	33.4	0
66	ศาลเจ้าพ่อพุน้ำร้อน	กาญจนบุรี	45.0	0.48
67	ธารน้ำร้อนบ่อคลึง	ราชบุรี	57.3	5.00
68	บ่อน้ำพุร้อนโป่งกระทิง	ราชบุรี	46.2	0
69	บ้านพุร้อน	เพชรบุรี	47.6	13.00
70	วัดตโปทาราม	ระนอง	61.7	0
71	บ้านทุ่งยอ	ระนอง	41.6	0
72	บ้านพรรั้ง	ระนอง	56.2	0.26
73	บ่อน้ำร้อนบ้านหาดยาย	ระนอง	45.0	0
74	บ้านน้ำพุร้อน	สุราษฎร์ธานี	37.2	0.75
75	เขานางฮี	สุราษฎร์ธานี	45.9	6.20
76	วัดธารน้ำร้อน	สุราษฎร์ธานี	42.0	0
77	บ้านบ่อน้ำร้อน	สุราษฎร์ธานี	41.8	3.25

ลำดับที่	แหล่งน้ำพุร้อน	จังหวัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
78	บ้านวังหิน	สุราษฎร์ธานี	52.6	0
79	บ้านเขาน้อย	สุราษฎร์ธานี	52.1	1.53
80	รัตนโกศัย	สุราษฎร์ธานี	61.0	2.38
81	บ้านเขาพลู	สุราษฎร์ธานี	61.3	0
82	บ้านเขาตอก	สุราษฎร์ธานี	65.1	0.30
83	อุทยานบ่อน้ำร้อน	นครศรีธรรมราช	55.1	0.54
84	ละแม	ชุมพร	48.8	0
85	คลองปลายพู่	พังงา	74.8	0.48
86	รมณีย์	พังงา	62.3	2.00
87	บ้านบ่อดาน	พังงา	46.8	2.84
88	คลองบ่อน้ำร้อน	กระบี่	43.2	0.19
89	บางผึ้ง	กระบี่	47.5	0.11
90	บ้านน้ำร้อน	กระบี่	47.9	1.23
91	อุทยานบ่อน้ำร้อน	ตรัง	50.8	1.10
92	บ้านควนสระ	ตรัง	41.0	0.01
93	เขาชัยสน	พัทลุง	53.0	0
94	บ้านโล๊ะจังกะ	พัทลุง	47.3	1.50
95	บ้านนาทุ่งโพธิ์	พัทลุง	50.2	0.82
96	บ้านระหว่างควน	พัทลุง	41.3	0.83
97	บ้านโตนปาหนัน	สตูล	52.0	1.67

2.4 อุณหภูมิแหล่งกักเก็บ

ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำพุร้อน ผลการวิเคราะห์ทางเคมีสามารถนำมาประเมินอุณหภูมิของแหล่งกักเก็บน้ำร้อน ซึ่งค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายธาตุในสภาวะสมดุลของน้ำพุร้อน และการสูญเสียพลังงานความร้อนในแหล่งกักเก็บ โดย Antonio (2009) นำเสนอสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิของแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.4 ต่อไปนี้

1. Quartz (No steam loss)

$$T_{GS} = \frac{1{,}309}{5.19 - \log(SiO_2)} - 273.15 \qquad \text{สมการที่ 2.1}$$

2. Quartz (Maximum steam loss)

$$T_{GS} = \frac{1{,}522}{5.75 - \log(SiO_2)} - 273.15 \qquad \text{สมการที่ 2.2}$$

3. Sodium potassium ratio system

$$T_{GS} = \frac{1{,}217}{\log(Na/K) + 1.483} - 273.15 \qquad \text{สมการที่ 2.3}$$

4. Sodium potassium calcium ratio system

$$T_{GS} = \frac{1{,}647}{\log(Na/K) + \beta(\log(\sqrt{Ca}/Na) + 2.06) + 2.47} - 273.15 \qquad \text{สมการที่ 2.4}$$

โดยที่

β	มีค่าเท่ากับ 1/3 เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินน้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส
Na	ค่าความเข้มข้นของโซเดียมที่ละลายอยู่ในน้ำพุร้อน (ส่วนในล้านส่วน)
K	ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำพุร้อน (ส่วนในล้านส่วน)
Ca	ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำพุร้อน (ส่วนในล้านส่วน)
SiO_2	ค่าความเข้มข้นของควอตซ์ที่ละลายอยู่ในน้ำพุร้อน (ส่วนในล้านส่วน)

ในการศึกษาแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย การรายงานนิยมใช้ Quartz (No steam loss), Quartz (Maximum steam loss) และ Sodium potassium calcium ratio system ที่ใช้ค่า β = 1/3 ในการประเมินอุณหภูมิแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพ แต่ถ้าแหล่งกักเก็บระดับตื้นการใช้ Sodium potassium calcium ratio system ที่ใช้ค่า β = 4/3 จะให้ค่าใกล้เคียงกับความจริง ผลการคำนวณได้ค่าแตกต่างกันชี้ให้เห็นว่าถ้าไม่ใช่เป็นผลจากการเจือจาง ก็น่าจะเป็นผลจากการที่น้ำพุร้อนได้สูญเสียความร้อนให้กับหินหรือดินรอบข้างขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นมาสู่ผิวดิน อุณหภูมิที่คำนวณได้จึงแตกต่างกัน

บทที่ 3
การสำรวจพื้นที่และขุดเจาะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ

การขุดเจาะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นแนวทางใหม่เพื่อนำแหล่งพลังงานทดแทนมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้เหตุผลสำคัญของการขุดเจาะน้ำพุร้อนขึ้นมาใช้นั้น เนื่องมาจากแหล่งน้ำพุร้อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทางกายภาพ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งยากในการคมนาคมขนส่ง ระยะทางจากระบบสายส่งไฟฟ้า เป็นต้น และมีศักยภาพไม่เพียงพอในการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง ด้วยเหตุผลดังกล่าว การสำรวจและขุดเจาะแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เพื่อนำน้ำพุร้อนมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีพลังงานต่าง ๆ ต่อไป โดยขั้นตอนการสำรวจและขุดเจาะน้ำพุร้อนมีดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการคัดเลือกพื้นที่

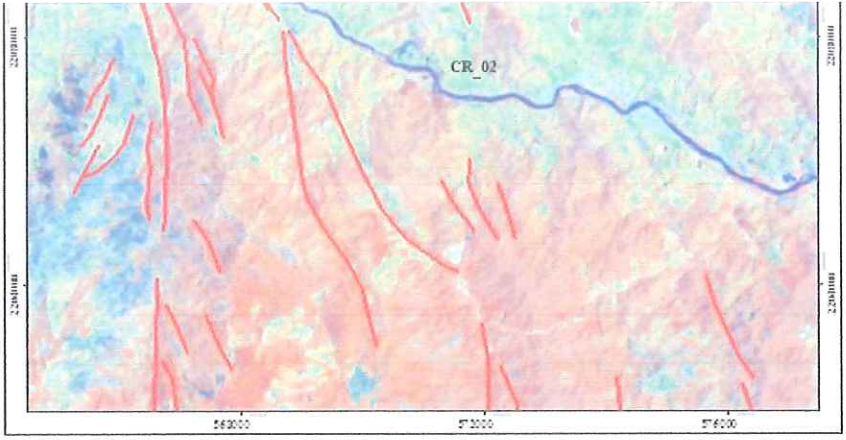
การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมเบื้องต้นเพื่อนำมาผลิตไฟฟ้า ความเย็น หรือการอบแห้ง เป็นการพิจารณาข้อมูลในภาพรวมของแหล่งน้ำพุร้อน อาทิ เส้นทางการคมนาคม อุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำร้อน รวมทั้งการพัฒนาในด้านต่าง ๆ ของบริเวณที่ตั้งแหล่งน้ำพุร้อน ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากฐานข้อมูลที่มีอยู่มากน้อยเพียงใด โดยข้อมูลที่นิยมใช้ในการคัดเลือกพื้นที่ประกอบไปด้วย

3.1.1 สภาพทางธรณีวิทยาและโครงสร้างแนวเส้น

ข้อมูลทางธรณีวิทยาและโครงสร้างของแนวเส้น คือ ข้อมูลชนิดของแหล่งน้ำพุร้อน เช่น เกิดจากการแทรกตัวของหินแกรนิต อายุของแหล่งกักเก็บพลังงานใต้เปลือกโลก ครอบคลุมพื้นที่ที่มีแร่ธาตุประเภทใดบ้าง มีแหล่งน้ำตามธรรมชาติหรือไม่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างแนวเส้นวางตัวของแม่น้ำที่มีลักษณะการวางตัวขนานกันต่อเนื่องเป็นแนวยาว รอบแหล่งน้ำพุร้อน

3.1.2 อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวดินและอัตราการไหลของน้ำพุร้อน

อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวดินและอัตราการไหลของน้ำพุร้อน เป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับงานวิศวกรรม เนื่องจากอุณหภูมิน้ำร้อนเป็นตัวกำหนดเทคโนโลยีที่สามารถประยุกต์ได้ และอัตราการไหลเป็นตัวบ่งชี้ถึงขนาดความสามารถของเทคโนโลยีต่าง ๆ อีกด้วย ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.1



สัญลักษณ์

แหล่งน้ำพุร้อน

โครงสร้างแนวเส้น

รูปที่ 3.1 ลักษณะแผนที่โครงสร้างแนวเส้น [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำพุร้อนผิวดิน [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

แหล่งน้ำพุร้อน	อุณหภูมิที่ผิวดิน (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
ห้วยหมากเหลี่ยม	56.6	7.00
ผาเสริฐ	66.2	2.38
โป่งลำปาง	55.6	0.16
ห้วยน้ำร้อน	49.8	0.05
หนองครก	68.8	3.50




563000
570000
576000
2212000
2212000

3.1.3 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น

คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของแหล่งน้ำพุร้อน เป็นข้อมูลที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น เช่น ค่า pH ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายเจือปนอยู่ในน้ำ (Total Dissolved Solid, TDS) และค่าซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของแหล่งน้ำพุร้อน [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

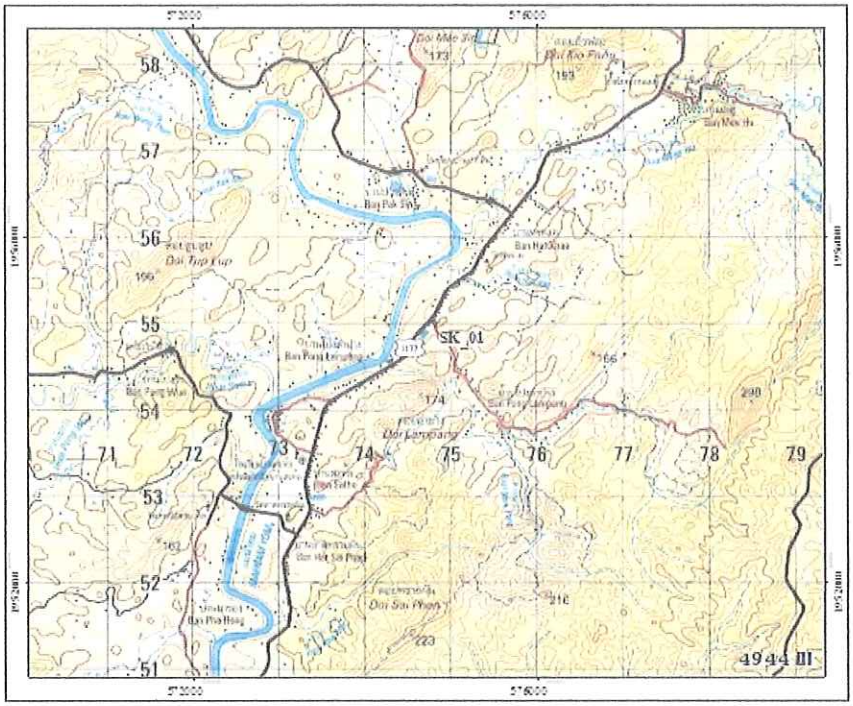
แหล่งน้ำพุร้อน / ดัชนีคุณภาพน้ำ	ห้วยหมากเหลี่ยม	ผาเสริฐ	โป่งลำปาง	ห้วยน้ำร้อน	หนองตรก
pH	8.7	8.5	8.3	8.2	8.0
Cond	490	469	1,636	958	814
TDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	323.5	318.2	1,120.2	680.5	570
Cl (มิลลิกรัมต่อลิตร)	9.2	3.5	5.7	4.4	3.7
SO_4^{2-} (มิลลิกรัมต่อลิตร)	32.8	22.5	2.0	2.2	11.5

3.1.4 ลักษณะภูมิประเทศ

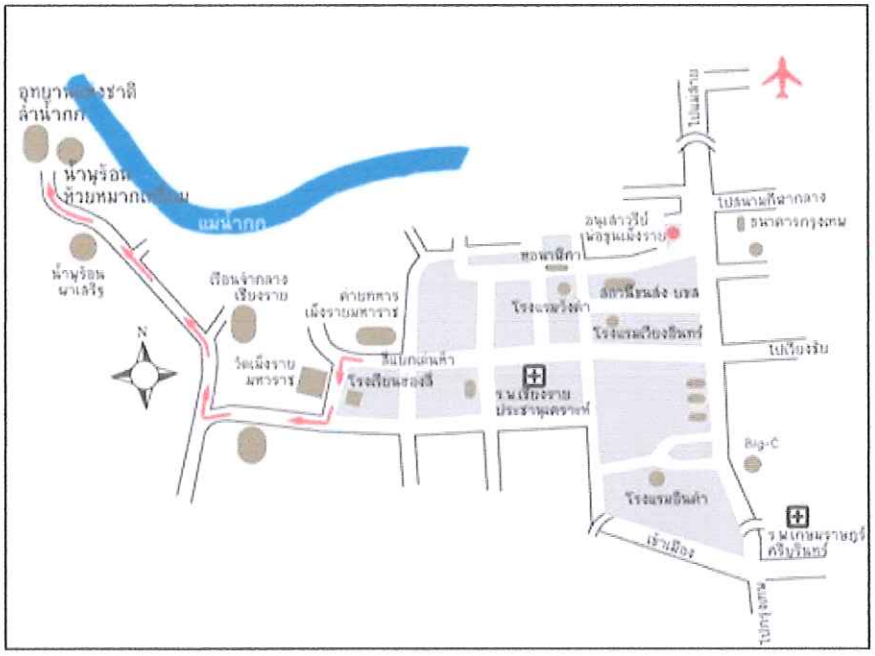
ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ คือ ข้อมูลที่ตั้ง อาทิเช่น ลักษณะเป็นเชิงเขา อยู่ติดกับแม่น้ำ ความสูงจากระดับน้ำทะเล พื้นที่รอบข้าง ลักษณะความลาดเอียงไปทางทิศเหนือ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศจะเป็นตัวแปรสำคัญในการประกอบการตัดสินใจ เนื่องจากหากกำหนดหลุมเจาะจะเป็นการกำหนดเส้นทางคมนาคมและค่าใช้จ่ายของระบบไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต่อไป

3.1.5 เส้นทางคมนาคม

ข้อมูลเส้นทางคมนาคม คือ ข้อมูลเส้นทางการเข้าถึงแหล่งน้ำพุร้อน เช่น ระยะทางจากตัวอำเภอเมือง ลักษณะเส้นทางบางช่วง ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 ทั้งนี้เส้นทางคมนาคมที่ดี จะทำให้การเข้าถึงและใช้ประโยชน์น้ำพุร้อนมีมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้น้ำพุร้อนในการอบแห้ง ที่มีการขนย้ายวัตถุดิบทางการเกษตรเข้าและออกห้องอบแห้งตลอดเวลา เนื่องจากกระบวนการอบแห้งใช้ระยะเวลาในการอบไม่นาน จึงต้องขนถ่ายวัตถุดิบเข้าออกห้องอบค่อนข้างบ่อย ดังนั้นการคมนาคมขนส่งจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับห้องอบแห้ง



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางภูมิประเทศ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]



รูปที่ 3.3 ลักษณะเส้นทางคมนาคม [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

3.1.6 ลักษณะพื้นที่

ข้อมูลลักษณะพื้นที่ เช่น พื้นที่ดังกล่าวเป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานหรือเป็นของบุคคลใด มีเนื้อที่ครอบคลุมกี่ไร่ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.4 ซึ่งโดยปกติแนวรอยเลื่อนของเปลือกโลกที่มีศักยภาพการขุดเจาะน้ำพุร้อนมาใช้ประโยชน์ได้นั้น มักจะมีตำแหน่งที่ตั้งในเขตป่า เขตอุทยาน และพื้นที่สาธารณะเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นก่อนการขุดเจาะจึงควรติดต่อประสานงานกับหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ เพื่อสอบถามถึงแนวทางการจัดการของพื้นที่บริเวณดังกล่าวเสียก่อน ทั้งนี้ในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยด้านพลังงานความร้อนใต้พิภพประสบปัญหาเรื่องการจัดการบริหารเทคโนโลยีค่อนข้างมาก ไม่ว่าจะเป็นโครงการศึกษาการนำน้ำพุร้อนมาใช้สำหรับห้องอบแห้งหรือห้องเย็นเก็บผลิตผลทางการเกษตร โดยเมื่อโครงการแล้วเสร็จนักวิจัยและเจ้าของเงินทุนได้ยกกรรมสิทธิ์การบริหารจัดการ ให้แก่หน่วยงานเจ้าของพื้นที่ที่เข้าไปทำการขุดเจาะและติดตั้งเทคโนโลยีแล้วนั้น ทางหน่วยงานดังกล่าวมักไม่ให้ความสนใจในการดำเนินการจัดการใช้งานให้เกิดประโยชน์ต่อชุมชนต่อไป และท้ายสุดเทคโนโลยีต่าง ๆ จะเสื่อมสภาพและชำรุดในที่สุด ดังนั้นการเลือกพื้นที่ที่มีหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนในพื้นที่ให้ความสนใจและพร้อมร่วมมือบริหารจัดการ จะส่งผลให้การพัฒนาด้านพลังงานทดแทนของประเทศไทยเป็นไปอย่างยั่งยืน



รูปที่ 3.4 ลักษณะพื้นที่ของแหล่งน้ำพุร้อนห้วยหมากเหลี่ยม อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย
[ฟองสวาท และคณะ, 2551]

3.1.7 พืชผลทางการเกษตร

ประเภทของพืชผลทางการเกษตรของพื้นที่ หมายถึง ประเภทพืชผลทางการเกษตรในแต่ละฤดูกาล ปริมาณผลผลิตที่ได้ ช่วงเวลาการเก็บเกี่ยว ดังตัวอย่างเช่น

ช่วงฤดูฝน	เพาะปลูก ชา ลิ้นจี่
ช่วงฤดูร้อน	เพาะปลูก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ถั่วเหลือง
ช่วงฤดูหนาว	เพาะปลูก มะเขือเทศ ท้อ กาแฟ
ตลอดปี	เพาะปลูก พริก

การเลือกเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับชนิดของพืชผลทางการเกษตรในพื้นที่ จะทำให้เกษตรกรในพื้นที่สามารถนำผลิตผลทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์กับเทคโนโลยีได้ ไม่ว่าจะเป็นการแปรรูปผลิตผลโดยการอบแห้งหรือรักษาความสดโดยการแช่ห้องเย็นก็ดี ล้วนเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่พืชผลทางการเกษตร ทำให้เกษตรกรผู้ใช้เทคโนโลยีเล็งเห็นความสำคัญของพลังงานทดแทน รวมทั้งส่งเสริมความยั่งยืนทางพลังงานและเกษตรกรรมไปพร้อมกันอีกด้วย

3.1.8 แนวทางการบริหารจัดการ

สอบถามข้อมูลและแนวทางการบริหารจัดการขององค์กรบริหารในพื้นที่ เช่น เมื่อมีการสร้างโรงไฟฟ้า ห้องเย็น หรือห้องอบแห้งในพื้นที่ องค์กรบริหารส่วนท้องถิ่นมีแนวทางใช้ประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างไร หรือการบริหารให้ประชาชนได้มีส่วนร่วม ในการจัดการและใช้งานห้องเย็นหรือห้องอบแห้งได้ตลอดทั้งปีอย่างไร ดังตัวอย่างในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แผนการนำพืชผลทางการเกษตรมาแช่เย็นหรืออบแห้ง [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินการ											
	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค
กาแฟ	←	—	→								←	—
ข้าวโพด						←	—	→				
พริก	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ถั่วเหลือง				←	—	→						
ชา				←	—	—	—	—	—	→		
มะเขือเทศ									←	—	—	→
พลับ									←	—	—	→

3.1.9 ผลการพิจารณาคัดเลือกพื้นที่

เมื่อนำปัจจัยต่าง ๆ มาพิจารณาเพื่อจัดอันดับคะแนนโดยภาพรวมดังแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าแหล่งน้ำพุร้อนแต่ละแห่งมีความเหมาะสมในการดำเนินโครงการฯ มากน้อยเพียงใด ทั้งนี้การจัดอันดับคะแนนในแต่ละหัวข้ออาจไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับผู้ทำการประเมินและแนวทางการวิเคราะห์ เช่น ต้องการสร้างโรงไฟฟ้า ดังนั้นลักษณะภูมิประเทศ อาทิเช่น ตำแหน่งเสาไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และระบบสาธารณูปโภคในชุมชนที่ต้องการนำไฟฟ้าไปใช้งาน จะเป็นปัจจัยหลักในการตัดสินใจ หรือต้องการสร้างห้องอบแห้งเพื่ออบแห้งพืชผลทางการเกษตร ดังนั้นน้ำหนักความสำคัญของหัวข้อ พืชผลทางการเกษตรและเส้นทางคมนาคมจึงควรมีมากกว่าหัวข้ออื่น เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 แบบประเมินความเหมาะสมโดยรวม [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

แหล่งน้ำพุร้อน	ลักษณะทางธรณีวิทยาและโครงสร้างแนวเส้น	อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวดินและอัตราการไหลของน้ำร้อน	คุณสมบัติทางเคมีของน้ำ	ลักษณะภูมิประเทศ	เส้นทางคมนาคม	ลักษณะพื้นที่	พืชผลทางการเกษตร	การบริหารจัดการ	คะแนนรวม
ห้วยหมากเหลี่ยม	4	4	4	3	3	4	5	5	32
ผาเสริฐ	4	5	4	3	3	3	4	3	29
โป่งลำปาง	5	4	2	5	4	5	2	2	29
ห้วยน้ำร้อน	3	3	3	2	3	2	2	1	18
หนองครก	4	5	3	3	3	3	4	3	28

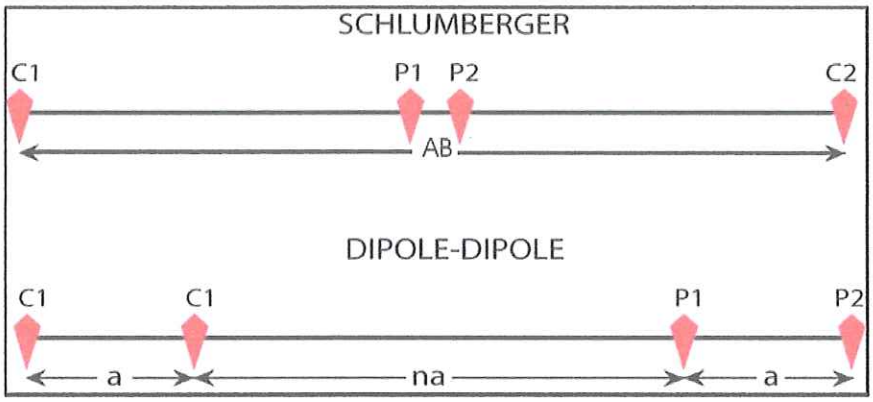
หมายเหตุ: ระดับคะแนน 5 = มากที่สุด, 4 = มาก, 3 = ปานกลาง, 2 = น้อย และ 1 = น้อยมาก

อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินโครงการฯ อาจจะทำการเลือกพื้นที่ที่มีความเหมาะสม ลำดับที่ 2 เป็นพื้นที่สำรอง ในกรณีเหตุสุดวิสัย ไม่สามารถดำเนินการในพื้นที่ที่เลือกไว้เป็นลำดับแรกได้

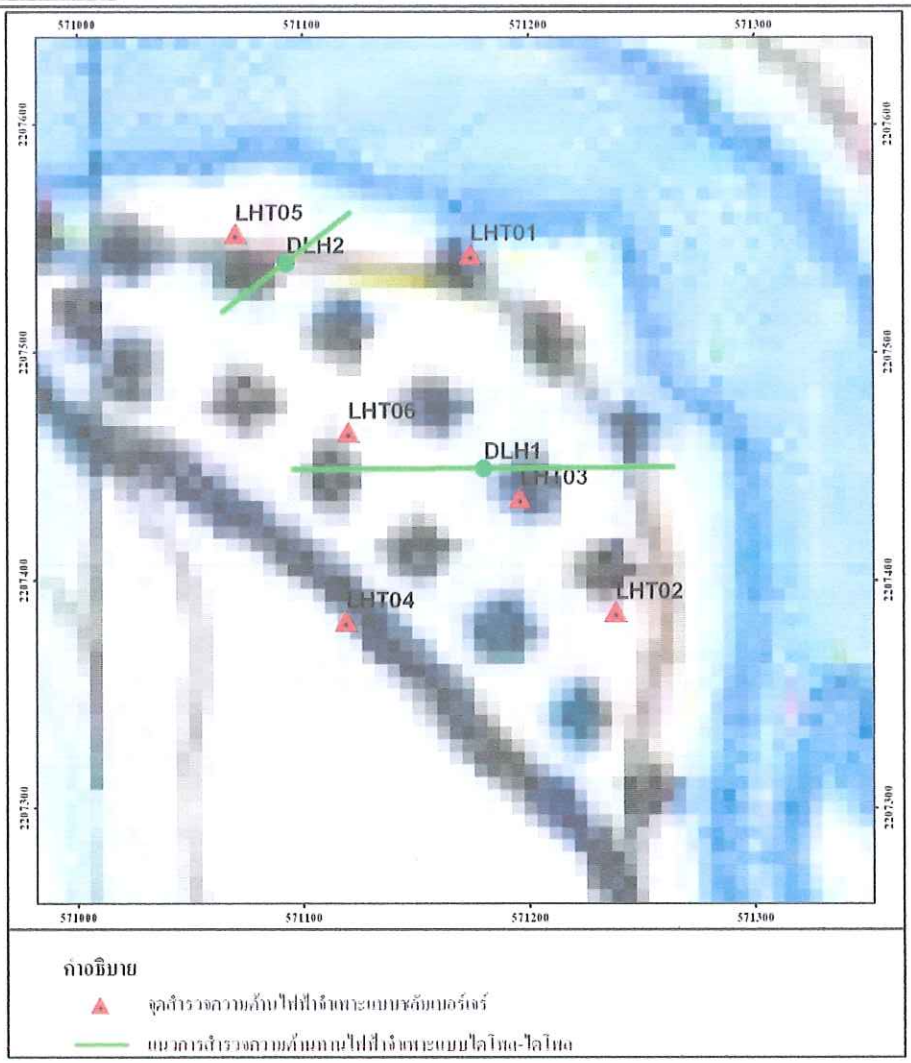
3.2 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการประเมินข้อมูลจากภาพรวมต่าง ๆ เพื่อเลือกพื้นที่เป้าหมายในการดำเนินการเจาะน้ำพุร้อน สำหรับขั้นตอนต่อไป คือ การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey) ของพื้นที่ที่ทำการคัดเลือก เพื่อใช้ประกอบการกำหนดตำแหน่งหลุมเจาะ โดยข้อมูลความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะประกอบด้วย

1. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบแนวดิ่ง (Vertical depth sounding) ใช้วิธีการจัดวางขั้วแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger configuration) ดังแสดงในรูปที่ 3.5
2. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบแนวราบ (Horizontal profiling) ใช้วิธีการจัดวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพล ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 การจัดวางขั้วแบบชลัมเบอร์เจอร์ และแบบไดโพล-ไดโพล [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

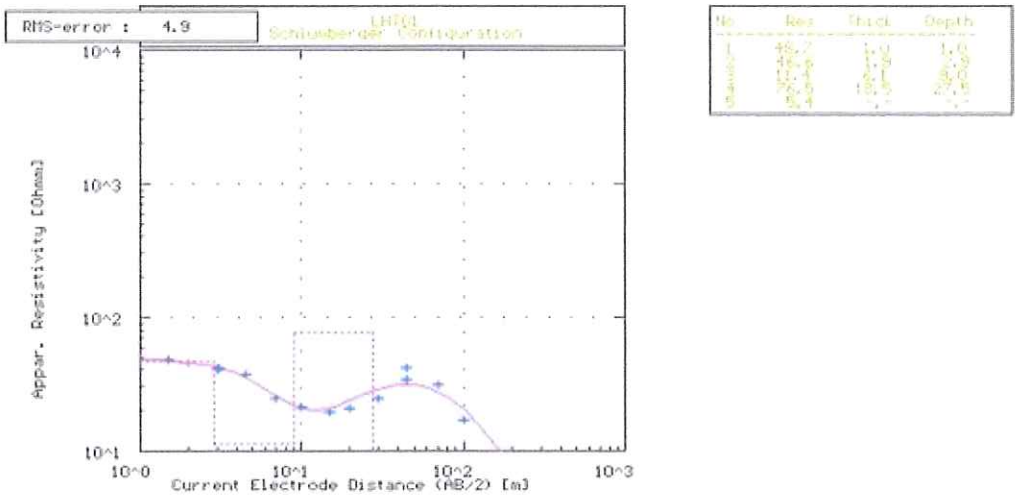


รูปที่ 3.6 แผนที่แสดงจุดสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]



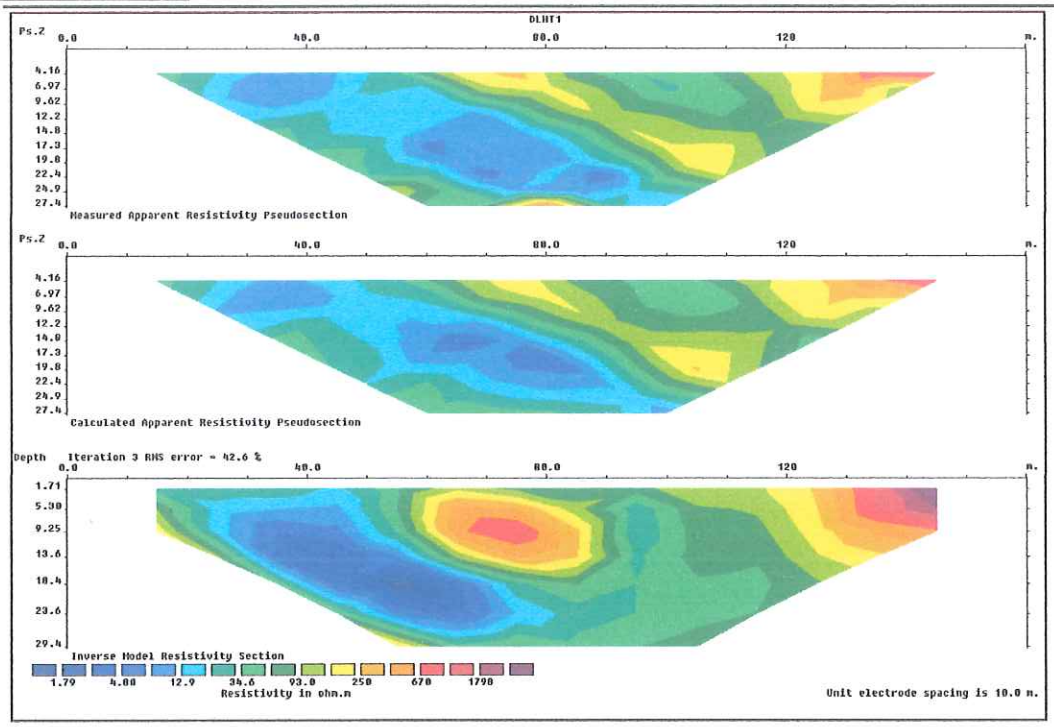
รูปที่ 3.7 ภาพการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบแนวดิ่ง สามารถบอกได้ว่าชั้นดิน ชั้นหินบริเวณนั้นแยกได้เป็นกี่ชั้น ตามความแตกต่างของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ อันเนื่องมาจากชนิดหิน ปริมาณน้ำที่แทรกอยู่ เช่น แบ่งออกได้เป็น 4 ชั้น คือ ชั้นหน้าดิน ชั้นตะกอนทางน้ำปัจจุบัน ชั้นหินผุ และชั้นแกรนิตสด ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบแนวดิ่ง
[ฟองสวาท และคณะ, 2551]

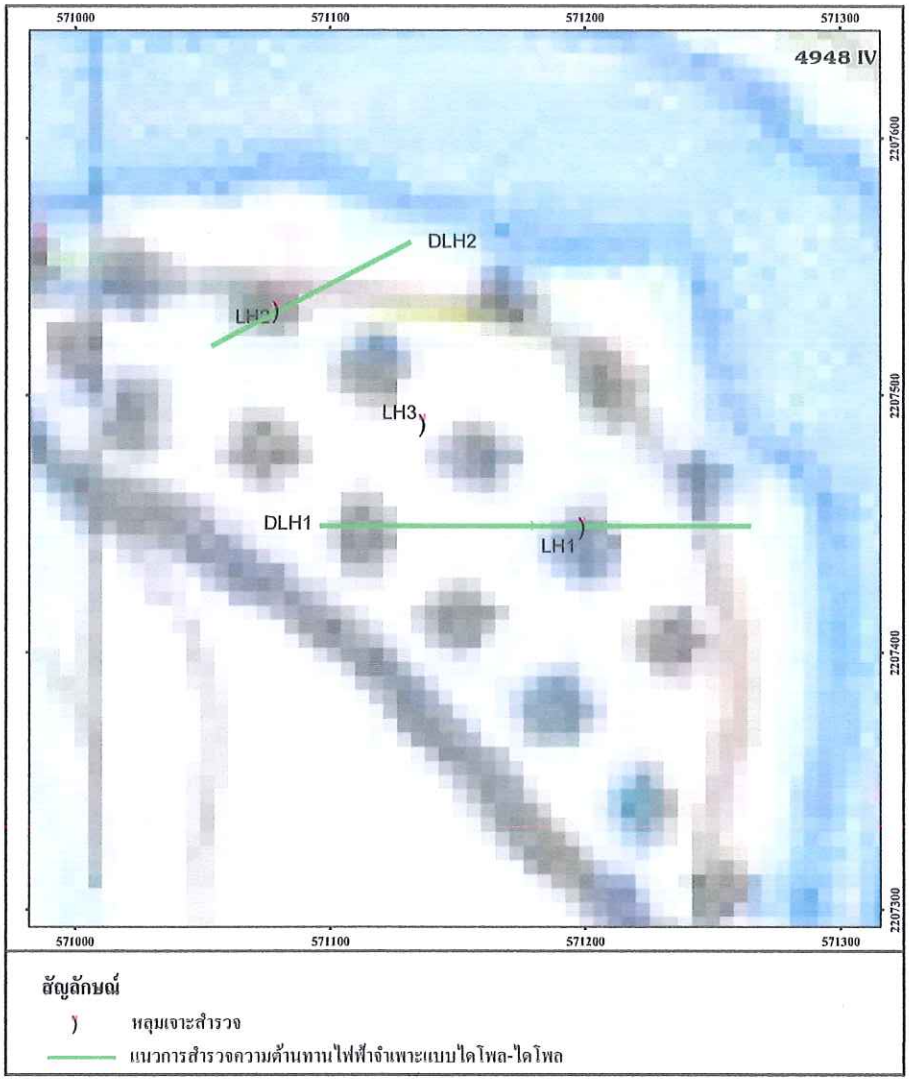
ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบไดโพล-ไดโพล จะแสดงออกมาเป็นภาพตัดขวางลงไปถึงความลึกดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจากผลการสำรวจสามารถบอกได้ว่ามีแนวแตกหรือแนวแยกอยู่กี่แนว วางตัวเอียงเทไปในด้านไหน และสามารถบอกได้ว่าแนวแตกหรือแนวแยกที่ได้ทำการสำรวจมีการปิดทับด้วยชั้นดิน ชั้นหินผุ หรือไม่ และถ้ามีการปิดกั้นมีความหนาเท่าไหร่



รูปที่ 3.9 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบไดโพล-ไดโพล [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

3.3 การเจาะพัฒนาหลุมผลิตน้ำร้อน

จากผลการศึกษาสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในบริเวณพื้นที่ศึกษา สามารถนำผลดังกล่าวมาทำการคัดเลือกตำแหน่งหลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขุดเจาะ

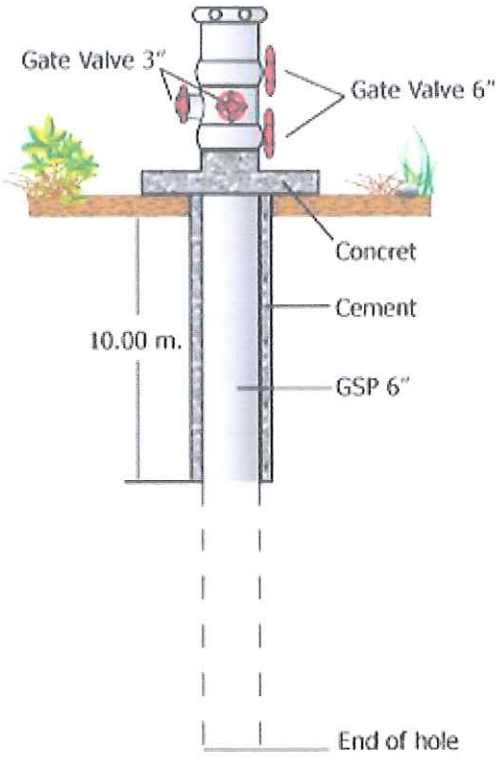
เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขุดเจาะน้ำพุร้อนโดยทั่วไปจะประกอบด้วย รถเจาะสำรวจแบบ Top head drive ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เครื่องปั๊มลมขนาด 20 บาร์ (300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หัวเจาะ Down the hole hammer ก้านเจาะยาว 6 เมตร ท่อกรุขนาด 6 นิ้ว ปูนซีเมนต์แบบแห้งเร็ว และประตูน้ำ (Gate valve)

3.3.2 รูปแบบทางเทคนิคของการเจาะหลุมสำรวจ

เทคนิคการเจาะในปัจจุบันส่วนมากเป็นแบบ Down the hole hammer โดยเริ่มจากการติดตั้งเครื่องปั๊มลมกับระบบเจาะ จากนั้นทำการเจาะหลุมดังตัวอย่างเช่น เจาะหลุมขนาด $7\,^{5}/_{8}$ นิ้ว จากผิวดินถึงความลึก 10 เมตร ลงท่อกรุ ขนาด 6 นิ้ว จนถึงก้นหลุม เพื่ออัดซีเมนต์รอบท่อกรุให้แน่นถึงปากหลุม รอให้ซีเมนต์แห้งประมาณ 2 วัน ติดตั้งประตูน้ำและเจาะหลุมขนาด $5\,^{3}/_{4}$ นิ้ว จากความลึก 10 เมตร ถึง ความลึก 85 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ขั้นตอนสุดท้าย คือ ปรับปรุงและพัฒนาบ่อตามมาตรฐานสากล



รูปที่ 3.11 รถเจาะสำรวจแบบ Top head drive [ฟองสวาท และคณะ, 2551]



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของหลุมเจาะ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

การเก็บข้อมูลเริ่มต้นในระหว่างการเจาะและภายหลังจากการเจาะ ซึ่งข้อมูลภาคสนามของการเจาะสำรวจประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิของน้ำในบ่อ ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำและข้อมูลทางด้านธรณี เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 การวัดอุณหภูมิของน้ำระหว่างการเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]



รูปที่ 3.14 เศษหินตัวอย่าง (Cutting) ที่ได้จากการเจาะสำรวจ [ฟองสวาท และคณะ, 2551]

3.3.3 ปัญหาของหลุมเจาะน้ำพุร้อนในประเทศไทย

ปัญหาของการนำน้ำพุร้อนมาใช้งานผ่านหลุมเจาะของประเทศไทย คือ การเกิดตะกรันภายในหลุมเจาะ ทำให้น้ำพุร้อนที่ออกจากหลุมเจาะมีปริมาณน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 3.15 รวมทั้งการเกิดตะกรันของวาล์วควบคุมการเปิดหรือปิดน้ำพุร้อนที่ปากหลุมเจาะอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 หากไม่ทำการดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้หลุมเจาะอุดตันและวาล์วควบคุมกระด่างไม่สามารถหมุนได้ในที่สุด



รูปที่ 3.15 การเกิดตะกรันที่บริเวณหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 3.16 การเกิดตะกรันที่วาล์วควบคุม [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 3.17 การเกิดตะกรันที่ปากหลุมเจาะและวาล์วควบคุม [นัฐพร, 2560]

3.3.4 การบำรุงรักษาหลุมเจาะน้ำพุร้อนและท่อน้ำพุร้อน

จากปัญหาการเกิดตะกรันดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้ต้องมีกระบวนการบำรุงรักษาหลุมเจาะน้ำพุร้อนและท่อน้ำพุร้อน โดยการกะเทาะหรือการคว้านหลุมเจาะให้ตะกรันหลุดออก ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการกะเทาะหรือคว้านทุก ๆ 6 เดือน และถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น วาล์ว ท่อน้ำพุร้อน ข้อต่อ และหน้าแปลน มาทำความสะอาด รวมทั้งเปลี่ยนประเก็นของหน้าแปลนเชื่อมท่อน้ำพุร้อนใหม่ทุกครั้ง

เทคนิคการกะเทาะหรือการคว้านหลุมเจาะของแต่ละแหล่ง จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของหลุมเจาะ อุปกรณ์ และความชำนาญของทีมบำรุงรักษา โดยวิธีการพื้นฐานของการบำรุงรักษาหลุมเจาะน้ำพุร้อนในประเทศไทยแบ่งได้เป็น 2 แนวทาง คือ การดับน้ำพุร้อน และการใช้น้ำเย็นอัดหลุมเจาะ ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีหลักการคล้ายกัน คือ การใช้น้ำเย็นอัดกลับไปในท่อน้ำพุร้อนและหลุมเจาะ สำหรับหลุมเจาะที่มีศักยภาพไม่สูงมากนักน้ำพุร้อนจะหยุดพุออกสู่บรรยากาศ แต่สำหรับหลุมเจาะที่มีศักยภาพสูง น้ำพุร้อนจะไม่สามารถหยุดพุ่งออกสู่บรรยากาศได้ การใช้น้ำเย็นอัดลงไปในหลุมเจาะ สามารถลดการพุออกสู่บรรยากาศได้เท่านั้น โดยตัวอย่างการดับน้ำพุร้อน (แหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง) แสดงในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19



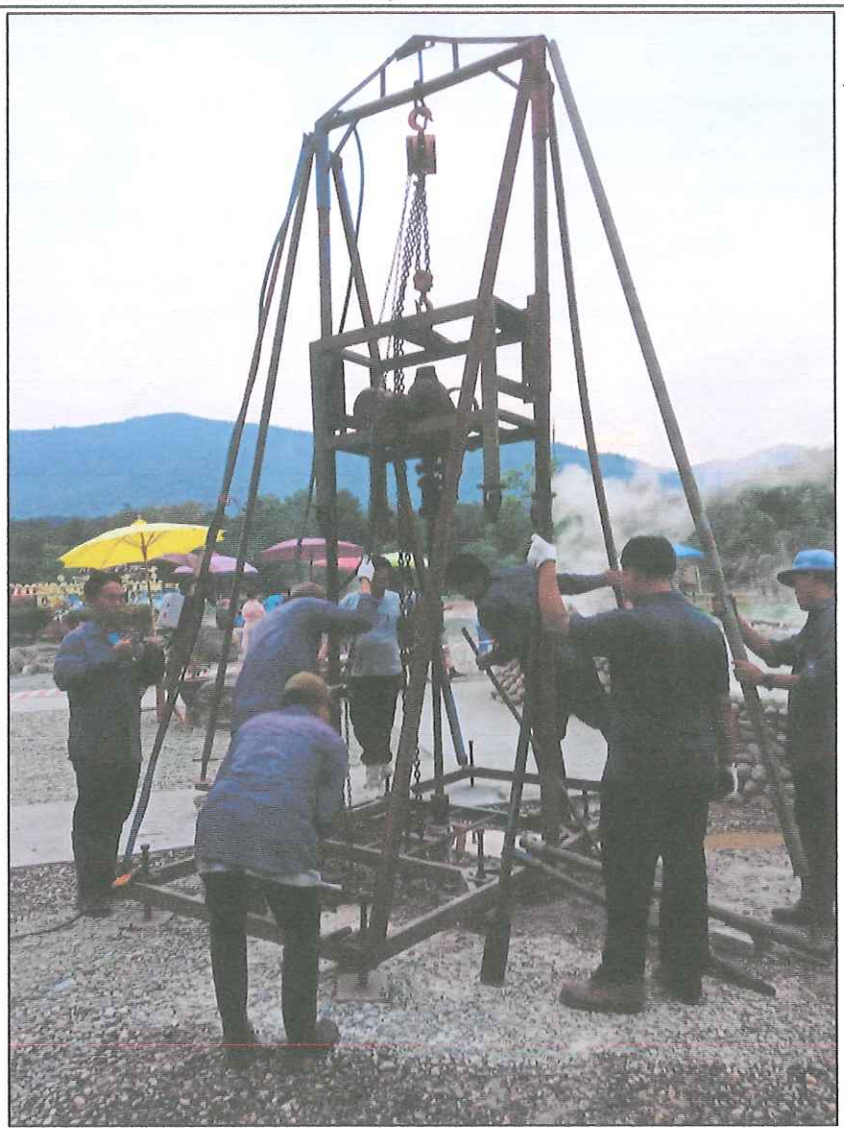
รูปที่ 3.18 การดับน้ำพุร้อนโดยการอัดน้ำเย็นลงไปในหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 3.19 สภาพหลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ดับแล้ว [นัฐพร, 2560]

เมื่อหลุมเจาะน้ำพุร้อนดับลงแล้ว จากนั้นจึงทำการนำเครื่องคว้านตะกรันที่มีขนาดตามพื้นที่หน้าตัดของหลุมเจาะมาติดตั้ง ทั้งนี้เครื่องคว้านหลุมเจาะมีลักษณะเป็นโลหะปลายแหลม มีท่อเหล็กต่อกับปลายหัวคว้านเพื่อส่งลงไปในหลุมเจาะ และปลายท่อจะถูกต่อเข้ากับมอเตอร์ ใช้ในการหมุนปลายหัวคว้าน สำหรับการกำจัดตะกรันภายในหลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.20

หลังจากทำการบำรุงรักษาหลุมเจาะน้ำพุร้อน และต่ออุปกรณ์ระบบท่อน้ำพุร้อนต่าง ๆ เป็นที่แล้วเสร็จขั้นตอนต่อไป คือ การจุดน้ำพุร้อน ซึ่งใช้เทคนิคกาลักน้ำ (Siphonage) โดยการนำไอเสียร้อนจากท่อไอเสียรถยนต์ อัดกลับเข้าไปยังท่อน้ำพุร้อนและหลุมเจาะน้ำพุร้อน เพื่อเพิ่มความดันให้แก่ท่อและหลุมเจาะ จากนั้นเมื่อความดันในท่อเท่ากับความดันของน้ำพุร้อนในแหล่งกักเก็บใต้พื้นพิภพ น้ำพุร้อนจะไหลย้อนออกมาทางหลุมเจาะและท่อตามลำดับ และพุออกสู่บรรยากาศในที่สุด จากนั้นน้ำพุร้อนจะไหลออกมาอย่างต่อเนื่อง ตามความแตกต่างของความดันสูงในแหล่งกักเก็บ และความดันต่ำของชั้นบรรยากาศโลก



รูปที่ 3.20 การคว้านหลุมเจาะน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560]

การบำรุงรักษาท่อน้ำพุร้อน ในกรณีที่ทำการดับน้ำพุร้อน คือ ทำการถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ของระบบท่อน้ำพุร้อนออกมา ตั้งแต่ปากหลุมเจาะเพื่อทำการล้างตะกรัน โดยใช้แปรงขัดสำหรับวาล์วและข้อต่อ ทำการเคาะผิวท่อสำหรับท่อที่มีลักษณะตรงยาว หรือเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วนหากมีการชำรุดมากเกินไป ในกรณีที่ใช้น้ำเย็นอัดหลุมเจาะ นิยมใช้การสลับท่อน้ำพุร้อนให้ไหลไปยังทิศทางอื่น เนื่องจากไม่สามารถปิดหลุมเจาะได้ เพื่อทำการถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบท่อน้ำพุร้อนออกมาทำความสะอาด

บทที่ 4
พลังงานความร้อนใต้พิภพเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสนใจในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งจากข้อมูลในปี ค.ศ. 2018 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า มี 26 ประเทศทั่วโลกที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ ที่กำลังการผลิตติดตั้งรวม 13,957.1 เมกะวัตต์ [ไฟฟ้า] โดยประเทศสหรัฐอเมริกามีกำลังการผลิตรวมสูงสุดอยู่ที่ 3,591 เมกะวัตต์ [ไฟฟ้า] และประเทศตุรกีมีการขยายกำลังการผลิตสูงสุดที่ร้อยละ 574.85 รองลงมา คือ ประเทศอินโดนีเซียที่ร้อยละ 35.71 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2013 ในขณะที่ประเทศไทยมีกำลังการผลิตเท่าเดิมที่ 300 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า]

โดยในแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan, PDP 2015) ปี พ.ศ. 2558-2579 [สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561] ต้องการส่งเสริมและพัฒนาการใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้าให้ได้ร้อยละ 20 ของกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2579 โดยในแผนพัฒนาดังกล่าวไม่ได้มุ่งเป้าในการนำพลังงานความร้อนใต้พิภพมาผลิตไฟฟ้า แต่ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan, AEDP 2015) พ.ศ. 2558-2579 ซึ่งกำหนดเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน ทั้งในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ ขึ้นเป็นสัดส่วนร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2579 โดยระบุแนวทางการผลิตความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ โดยจัดรวมอยู่ในหมวดพลังงานความร้อนทางเลือกอื่น ให้มีเป้าหมายการส่งเสริมและพัฒนาอยู่ที่ 10 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561]

ตารางที่ 4.1 การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพทั่วโลก [ThinkGeoEnergy, 2018]

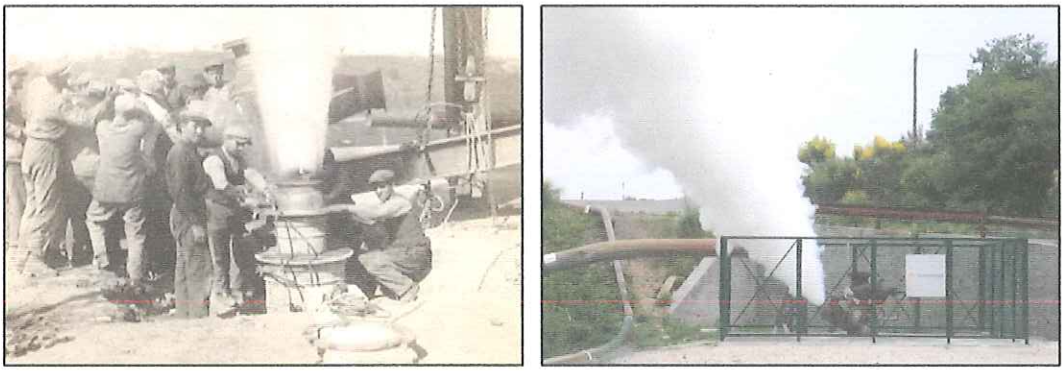
อันดับที่	ประเทศ	กำลังการผลิต (เมกะวัตต์ [ไฟฟ้า])	
		2013	2018
1	สหรัฐอเมริกา	3,389	3,591
2	ฟิลิปปินส์	1,894	1,868
3	อินโดนีเซีย	1,333	1,809
4	ตุรกี	163	1,100
5	นิวซีแลนด์	895	980
6	เม็กซิโก	980	951
7	อิตาลี	901	944
8	ไอซ์แลนด์	664	710
9	เคนย่า	215	676
10	ญี่ปุ่น	537	542

อันดับที่	ประเทศ	กำลังการผลิต (เมกะวัตต์ [ไฟฟ้า])	
		2013	2018
11	คอสตาริกา	208	207
12	เอลซัลวาดอร์	204	204
13	นิการากัว	97	82
14	ปาปัวนิวกินี	56	50
15	กัวเตมาลา	42	52
16	โปรตุเกส	28	29
17	รัสเซีย	82	82
18	จีน	27	27
19	เยอรมัน	13	27
20	ฝรั่งเศส	15	16
21	เอธิโอเปีย	8	7.3
22	ออสเตรีย	1	1.2
23	ออสเตรเลีย	1	1.1
24	ไทย	0.3	0.3
25	โรมาเนีย	-	0.1
26	ไต้หวัน	-	0.1
รวม		**11,753.3**	**13,957.1**

อนึ่งการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพในปัจจุบันสามารถทำได้ 3 วิธีการ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความลึก และลักษณะของพลังงานความร้อนที่ขึ้นมาว่า มีลักษณะเป็นไอน้ำหรือเป็นน้ำร้อน ทั้งนี้แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพบางแหล่ง อาจใช้วิธีการหรือเทคโนโลยีหลายอย่างมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว น้ำร้อนจะถูกอัดกลับลงไปใต้ดิน เพื่อเป็นการเติมน้ำให้กับแหล่งกักเก็บและนำกลับขึ้นมาใช้อีกครั้งหนึ่ง โดยวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธี มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

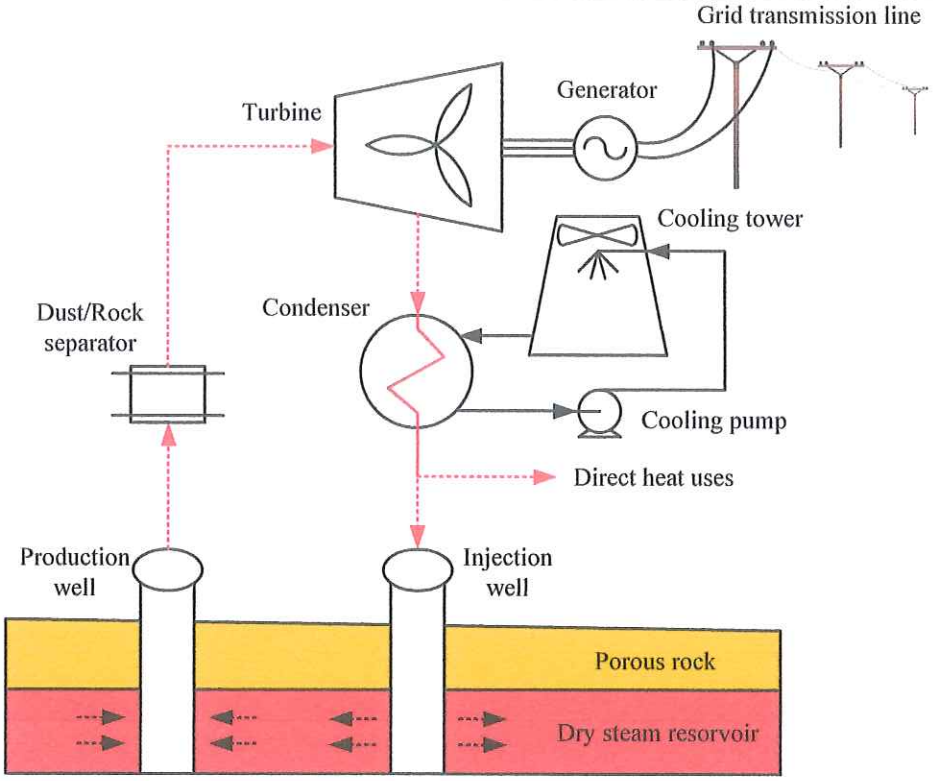
4.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง (Dry steam geothermal power plant) พบได้น้อยมาก เนื่องจากการได้มาซึ่งไอแห้งสมบูรณ์ แหล่งความร้อนใต้พิภพต้องมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง เช่น ชั้นหินร้อนหรือแมกมา เป็นต้น และทำให้ไอน้ำที่ได้จากหลุมเจาะ (Production well) มีอุณหภูมิสูงกว่า 235 องศาเซลเซียส ซึ่งไอน้ำดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะไอร้อนยิ่งยวด (Super heat vapor) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงนำมาส่งผ่านท่อไปหมุนกังหัน (Turbine) โดยตรง และขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการแยกไอน้ำ เนื่องจากสิ่งที่ขึ้นมากับหลุมเจาะ คือ ไอน้ำพุร้อนเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีน้ำพุร้อนในสถานะของเหลวผสมอยู่ แต่ในบางครั้งเพื่อเพิ่มความสะอาดให้แก่ไอน้ำมากขึ้น จะทำการติดตั้งเครื่องกรองฝุ่นและหิน (Dust and rock separator) เพิ่มเติม และโรงไฟฟ้าจะนำไอน้ำที่ออกจากกระบวนการผลิต ไปทำการควบแน่นให้กลายเป็นของเหลว (Condensate) ที่เครื่องควบแน่น (Condenser) ร่วมกับหอผึ่งระบายความร้อน (Cooling tower) จากนั้นจึงนำไปใช้ประโยชน์ด้านความร้อนโดยตรง (Direct uses) หรือป้อนน้ำพุร้อนกลับสู่หลุมป้อนกลับ (Injection well) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 อนึ่งในบางครั้งอาจปล่อยกลับคืนสู่ธรรมชาติ เช่น ปล่อยลงสู่แม่น้ำ เป็นต้น



รูปที่ 4.1 หลุมเจาะแบบไอแห้ง [REUK-Renewable Energy UK, 2018] [Mahmut, 2018]

ในกระบวนการระบายความร้อนหรือควบแน่นไอน้ำพุร้อน ให้กลายเป็นน้ำพุร้อนในสถานะของเหลวนั้น มักจะมีก๊าซบางชนิดที่ไม่สามารถควบแน่น (Non-Condensable Gases, NCG) เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตประมาณร้อยละ 0.5 จนถึงมากสุดที่ (Worst case) ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำพุร้อน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีเทน (CH_4) และก๊าซอื่น ๆ เป็นต้น ในบางประเทศ อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา และอิตาลี มีการกำหนดมาตรการป้องกันก๊าซบางชนิดเหล่านี้ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้นในโรงไฟฟ้าบางแห่งจึงมีการติดตั้งระบบดักจับก๊าซ (Gas evacuation system) เพิ่มเติม ร่วมกับระบบระบายความร้อนและหอผึ่งระบายความร้อนอีกด้วย



รูปที่ 4.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง [นัฐพร, 2560]

4.1.1 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้งสู่ชุมชน

ตัวอย่างของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง เช่น Geysers Geothermal Power Plants ในมลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพที่ใหญ่ที่สุดในโลก มีระบบผลิตไฟฟ้าย่อยภายในโรงไฟฟ้า 22 หน่วย ที่กำลังการผลิตไฟฟ้าติดตั้ง 1,517 เมกะวัตต์ ซึ่งดำเนินการผลิตจริงที่ 955 เมกะวัตต์ หรือร้อยละ 63 ของกำลังการผลิตติดตั้ง ดังแสดงตัวอย่าง 1 ในโรงไฟฟ้าย่อยของ Geysers Geothermal Power Plants ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โรงไฟฟ้าย่อย McCabe หน่วยที่ 5 และ 6 ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ The Geysers [California Energy Commission, 2018]

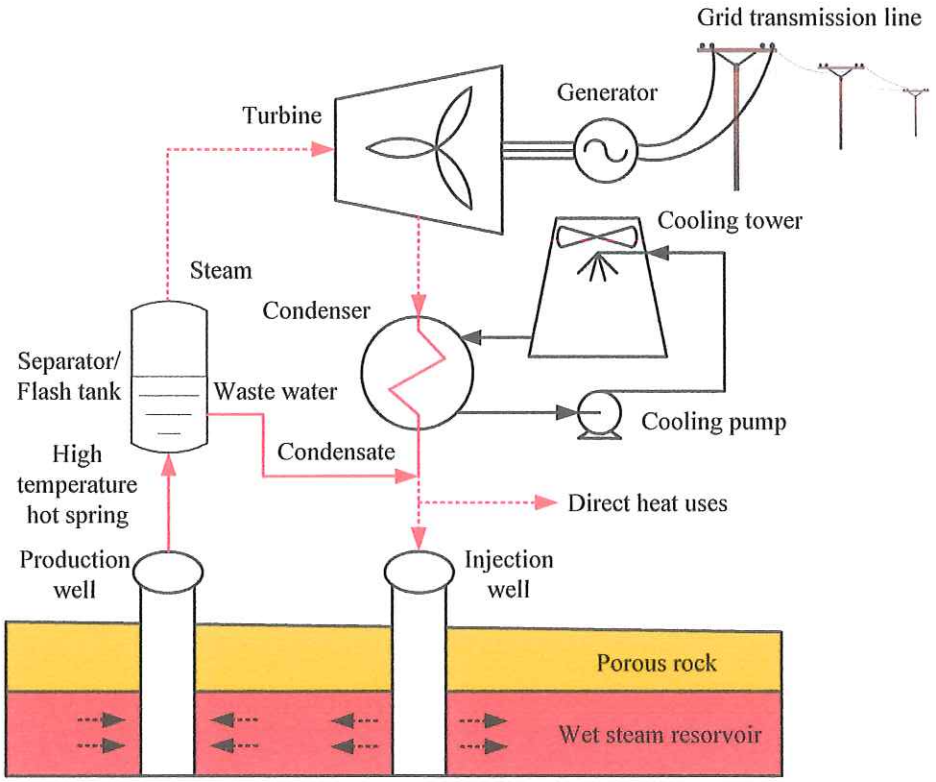
Larderello Geothermal Power Plants ในประเทศอิตาลี เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแห่งแรกของโลก สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1911 ปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าย่อย 34 หน่วย และมีกำลังการผลิตติดตั้งรวมอยู่ที่ 769 เมกะวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 Larderello Geothermal Complex, Italy [ClimateCare, 2018]

4.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่ (Flash steam geothermal power plant) เป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่พัฒนาต่อจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง เนื่องจากน้ำพุร้อนที่ได้จากหลุมเจาะมีลักษณะเป็นของเหลวอุณหภูมิสูง หรือในบางครั้งอาจมีลักษณะเป็นของผสม (Mixture) ที่มีทั้งไอน้ำและของเหลวผสมกันอยู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าโดยกังหันไอน้ำได้โดยตรง ต้องทำการลดความดันเพื่อแยกไอน้ำออกจากของเหลวก่อน ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพลักษณะนี้มักพบที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส การทำงานของโรงไฟฟ้าประเภทนี้เริ่มจากนำน้ำพุร้อนอุณหภูมิสูง (มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ) จากหลุมเจาะ มาลดความดันอย่างรวดเร็ว (Flashing) ผ่านเครื่องแยกไอน้ำและของเหลว (Separator/Flash tank) เมื่อของไหลร้อนดังกล่าวถูกลดความดัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของผสม (Mixture) ที่ประกอบไปด้วยไอน้ำพุร้อนและน้ำพุร้อนในสถานะของเหลว ไอน้ำพุร้อนจะนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยกังหันไอน้ำ จากนั้นไอน้ำความดันต่ำจะถูกนำไปควบแน่น ซึ่งโรงไฟฟ้าบางแห่งอาจมีการติดตั้งระบบดักจับก๊าซเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ของเหลวสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และนำไปรวมกับของเหลวที่ออกมาจากเครื่องแยกไอน้ำและของเหลว จากนั้นนำไปใช้ประโยชน์ในด้านความร้อน หรืออัดกลับลงสู่แหล่งกักเก็บผ่านหลุมเจาะป้อนกลับอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

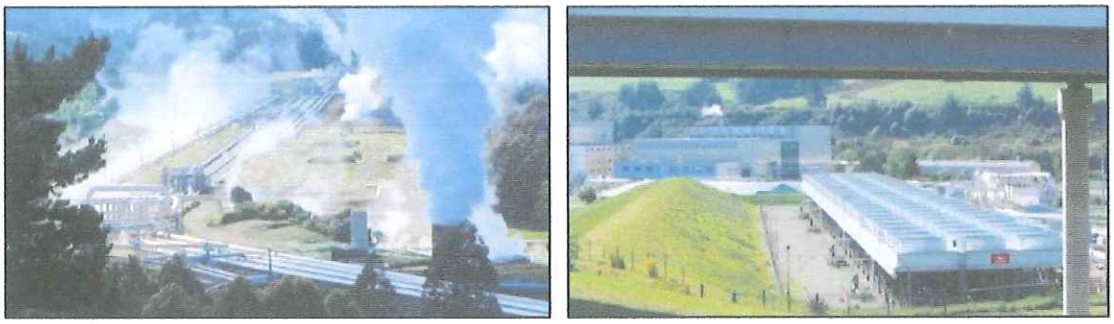


รูปที่ 4.5 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่ [นัฐพร, 2560]

4.2.1 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่สู่ชุมชน

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่ เป็นรูปแบบที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คิดเป็นร้อยละ 63 จากกำลังการผลิตติดตั้งทั้งหมดทั่วโลกในปัจจุบัน [Fardanch, 2018] โดยตัวอย่างโรงไฟฟ้าแบบแบบไอน้ำระเหยใหม่ มีดังต่อไปนี้

Wairakei Power Station ในประเทศนิวซีแลนด์ เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่แห่งแรกของโลกในปี ค.ศ. 1958 ปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าย่อยทั้งหมด 11 หน่วย โดย 10 หน่วยย่อย เป็นโรงไฟฟ้าแบบไอน้ำระเหยใหม่ และอีก 1 หน่วยเป็นโรงไฟฟ้าแบบสองวงจรสารทำงาน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป โดยมีกำลังการผลิตติดตั้งรวม 232 เมกะวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Wairakei Power Station [Christopher, 2015]

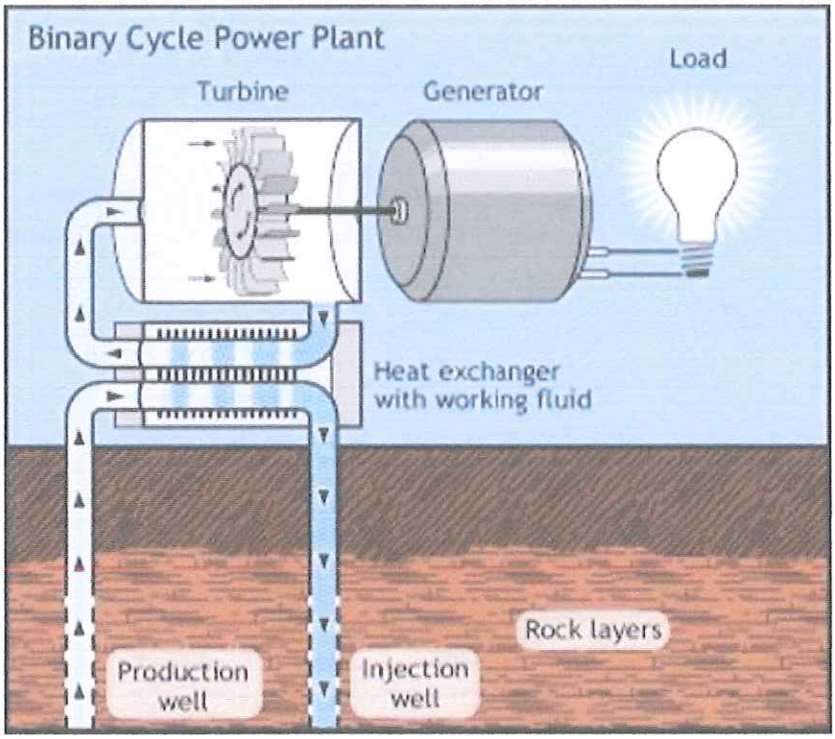
Sarulla Geothermal Power Plant ในประเทศอินโดนีเซีย ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าแบบไอน้ำระเหยใหม่ที่มีกำลังการผลิต 220 เมกะวัตต์ ประกอบไปด้วย 2 หน่วยการผลิตย่อย ซึ่งแต่ละหน่วยย่อยมีกำลังการผลิตติดตั้งอยู่ที่ 110 เมกะวัตต์ โดยเริ่มดำเนินการผลิตไฟฟ้าในปี ค.ศ. 2017



รูปที่ 4.7 Sarulla Geothermal Power Plant [Geothermal Resources Council, 2018]

4.3 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน (Binary cycle geothermal power plant) คือ การนำแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ (น้ำพุร้อน) ที่มีอุณหภูมิช่วงระหว่าง 90-150 องศาเซลเซียส ไปให้ความร้อนแก่สารทำงานที่มีจุดเดือดต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำพุร้อน เช่น สารทำความเย็น เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถผลิตไอสารทำงานความดันสูง สำหรับการขับเคลื่อนกังหันได้โดยใช้น้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบสองวงจรสารทำงาน จึงหมายถึง การใช้น้ำพุร้อนเป็นสารทำงานชนิดแรก และสารทำความเย็นจุดเดือดต่ำเป็นสารทำงานชนิดที่สอง โดยในส่วนระบบที่ใช้สารทำความเย็นนั้นนิยมนำวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) มาใช้ร่วมกับพลังงานความร้อนใต้พิภพ



รูปที่ 4.8 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองสารทำงาน [U.S. Department of Energy, 2013]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นวงจรการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในระบบกลุ่มอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูง สามารถเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในวัฏจักรแรงคินโดยทั่วไป ทำให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถผลิตสารทำงานในสถานะไอ เพื่อใช้ขับเคลื่อนกังหันให้สร้างสนามไฟฟ้าตัดกับสนามแม่เหล็กและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

จากข้อมูลประเภทโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผันไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพสำหรับประเทศไทย คือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน ที่สามารถใช้น้ำพุร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส เป็นสารทำงานตัวที่หนึ่งจ่ายให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่มีสารทำงานตัวที่สองรับความร้อนจากน้ำพุร้อน โดยในปัจจุบันมีการใช้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย และประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ประมาณร้อยละ 8-14 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัชวาลย์ และนัฐพร (2549) และฟองสวาท และคณะ (2549) ที่นำเสนอแนวทางการนำน้ำพุร้อนมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยผลการศึกษา พบว่า เทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้ คือ วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ดังแสดงรูปชุดสาธิตที่ได้ทำการศึกษาในรูปที่ 4.9

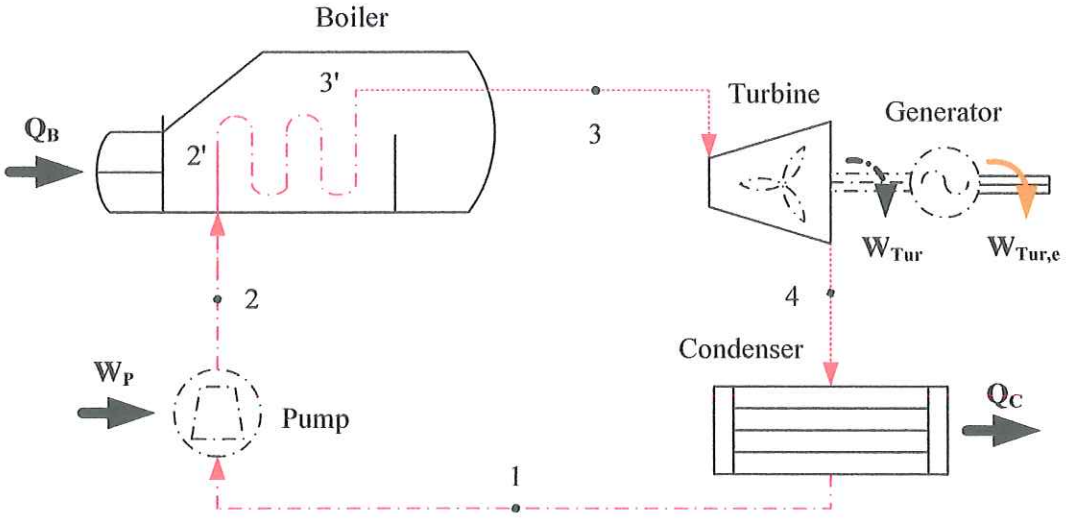


รูปที่ 4.9 ชุดสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549]

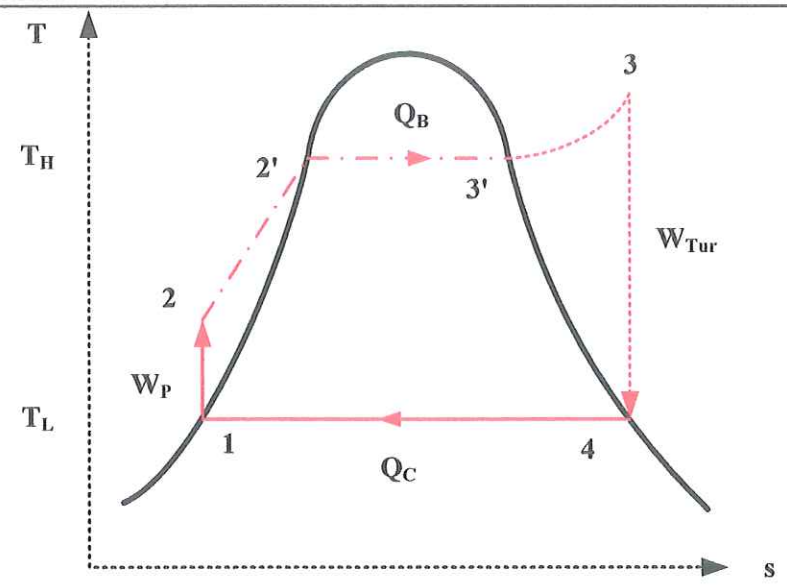
ทั้งนี้การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ต้องการอุณหภูมิน้ำพุร้อนในการขับเคลื่อนระบบมากกว่า 90 องศาเซลเซียส [Thawonngamyingsaku and Kiatsiriroat, 2012] เพื่อทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) ที่ดี และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ร่วมกับพลังงานความร้อนใต้พิภพ และจากข้อมูลแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทยที่แสดงในตารางที่ 2.1 พบว่า มีแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทยจำนวน 9 แห่ง ที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยมีแหล่งน้ำพุร้อนจำนวน 7 แห่ง ที่มีอุณหภูมิเกิน 90 องศาเซลเซียส และอีก 2 แห่งมีอุณหภูมิใกล้เคียง 90 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งทั้งหมดตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือตอนบน อันประกอบไปด้วย จังหวัดเชียงใหม่ 5 แห่ง จังหวัดเชียงราย 2 แห่ง และจังหวัดแม่ฮ่องสอน 2 แห่ง

4.3.1 วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงดินเป็นวัฏจักรพื้นฐานทางอุดมคติดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงแผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปี (T-s diagram) ของกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรแรงดิน โดยของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น (Condenser) กลายสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ 1 และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิก จนกระทั่งมีความดันเท่ากับความดันในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของไหลจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ ($P_2 = P_2'$) จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ 2′ กลายเป็นไออิ่มตัวที่สภาวะ 3′ และเป็นไอร้อนยวดยิ่งที่สภาวะ 3 ในที่สุดไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการขับหมุนเพลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอของไหลลดลงที่สภาวะ 4 ณ บริเวณทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสภาวะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ ($P_4 = P_1$) กลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ 1 อีกครั้ง



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ในวัฏจักรแรงดิน [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 4.11 แผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปีแสดงกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรแรงคิน [นัฐพร, 2560]

จากรูปที่ 4.11 วัฏจักรแรงคินประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้ (กระบวนการทั้งหมดเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ทั้งสิ้น)

กระบวนการ 1-2	กระบวนการอัดตัวของของเหลวแบบไอเซนทรอปิกในปั๊ม
กระบวนการ 2-3	กระบวนการให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ในหม้อต้ม
กระบวนการ 3-4	กระบวนการขยายตัวของก๊าซแบบไอเซนทรอปิกในกังหัน
กระบวนการ 4-1	กระบวนการถ่ายความร้อนทิ้งออกจากก๊าซภายใต้ ความดันคงที่ในเครื่องควบแน่น

วัฏจักรแรงคินประกอบด้วยอุปกรณ์หลักทั้งหมด 5 ตัว อันประกอบไปด้วย ปั๊ม หม้อต้ม กังหัน เครื่องควบแน่น และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาภายใต้กระบวนการสภาวะคงตัว-การไหลคงตัว (Steady State Steady Flow, SSSF) ทั้งสิ้น ให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของงานและความร้อนจึงตัดทิ้งได้ พลังงานแต่ละเทอมพิจารณาเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล จากกฎข้อที่หนึ่งได้ว่า

$$q - w = \Delta h \qquad \text{สมการที่ 4.1}$$

ปั๊ม (กระบวนการ 1-2) ไม่มีความร้อน $q = 0$ และคิด w_P มีเครื่องหมายบวก จะได้ว่า

$$w_P = h_2 - h_1 \qquad \text{สมการที่ 4.2}$$

หม้อต้ม (กระบวนการ 2-3) ไม่มีงาน $w = 0$ จะได้ว่า

$$q_B = h_3 - h_2 \qquad \text{สมการที่ 4.3}$$

กังหัน (กระบวนการ 3-4) ไม่มีความร้อน $q = 0$ จะได้ว่า

$$w_{Tur} = h_3 - h_4 \qquad \text{สมการที่ 4.4}$$

เครื่องควบแน่น (กระบวนการ 4-1) ไม่มีงาน $w = 0$ และคิด q_o มีเครื่องหมายบวก จะได้ว่า

$$q_C = h_4 - h_1 \qquad \text{สมการที่ 4.5}$$

พิจารณาสารทำงานที่ปั๊มในสถานะของเหลว กำหนดให้ของเหลวเป็นของไหลยุบตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) กล่าวคือ ของไหลจะมีความหนาแน่นหรือปริมาตรจำเพาะเป็นค่าคงที่ตลอดกระบวนการ ซึ่งจะทำให้ของไหลมีพลังงานคงตัว ($\Delta h = 0$) ดังนั้นในกรณีการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิกจะใช้ผลของความดันที่แตกต่างในการคำนวณ ดังนี้

$$h_2 - h_1 = \nu_1 (P_H - P_L) \qquad \text{สมการที่ 4.6}$$

ดังนั้น $$w_P = \nu_1 (P_H - P_L) \qquad \text{สมการที่ 4.7}$$

โดยที่ P ความดัน (กิโลปาสคาล)

ν_1 ปริมาตรจำเพาะของของไหลในสภาพของเหลวอิ่มตัวที่จุดที่ 1 (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม)

งานสุทธิของวัฏจักร จะได้ว่า

$$w_{net} = q_i - q_o = w_{Tur} - w_P \qquad \text{สมการที่ 4.8}$$

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักร ดังนี้

ความสามารถในการให้ความร้อนสุทธิของน้ำพุร้อนแก่หม้อต้ม

$$Q_{HW} = \dot{m}_{HW}\, Cp_{bulk,HW} (T_{HW,i} - T_{HW,o}) \qquad \text{สมการที่ 4.9}$$

ความสามารถในการให้ความร้อนสุทธิของน้ำพุร้อนแก่หม้อต้ม

$$Q_B = \varepsilon_{HX} Q_{HW} \qquad \text{สมการที่ 4.10}$$

$$Q_B = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_2) \qquad \text{สมการที่ 4.11}$$

โดยที่ ε_{HX} ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness)

ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของเครื่องควบแน่น

$$Q_C = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_1) \qquad \text{สมการที่ 4.12}$$

งานที่ป้อนให้แก่ปั๊ม

$$W_P = \dot{m}_{ref} w_P \qquad \text{สมการที่ 4.13}$$

งานที่ได้รับจากกังหัน

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_4) \qquad \text{สมการที่ 4.14}$$

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$W_{Tur,e} = \eta_{Machine}\, \eta_{Generator}\, W_{Tur} \qquad \text{สมการที่ 4.15}$$

โดยที่ $\eta_{Machine}$ ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น ระบบเกียร์ทดรอบ เป็นต้น

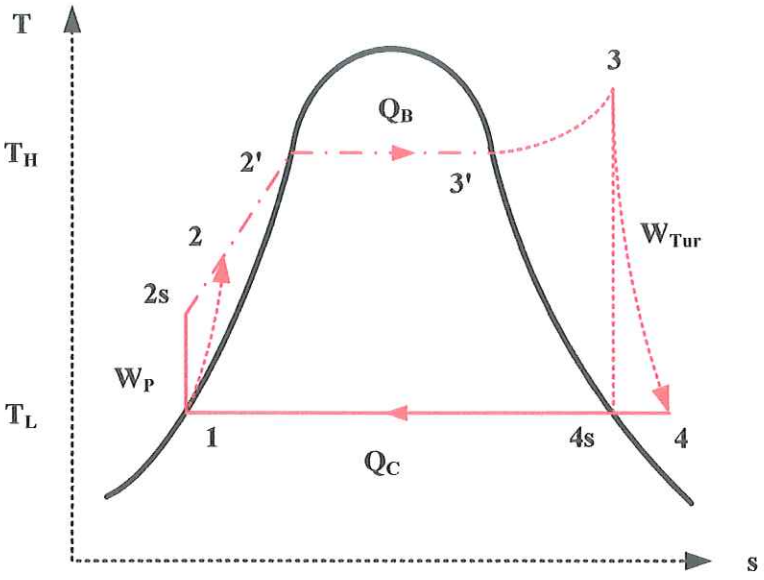
$\eta_{Generator}$ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงดัน

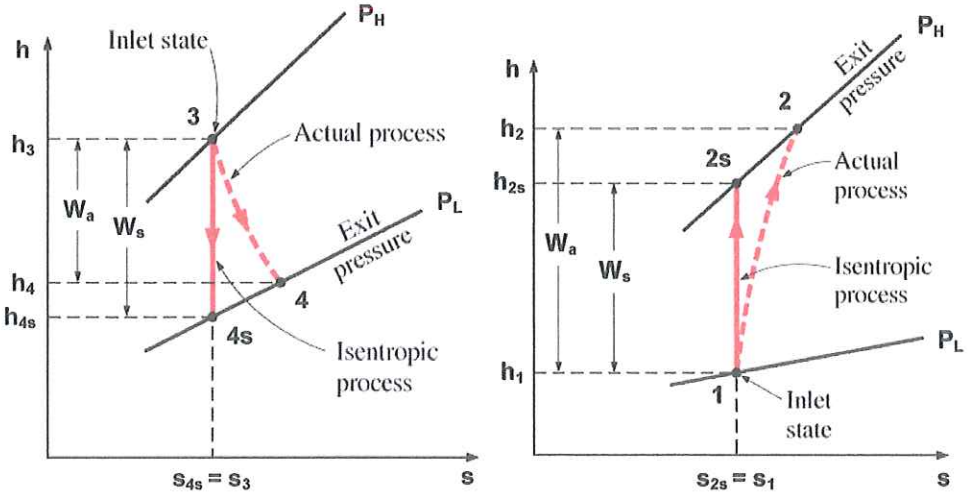
$\eta_{th,R}$ = งานสุทธิที่ได้รับของวัฏจักร / ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้หม้อต้ม สมการที่ 4.16

$\eta_{th,R} = (W_{Tur} - W_P) / Q_B$ สมการที่ 4.17

ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหันและปั๊มจะเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งได้แก่ กระบวนการ (3-4) และ (1-2) รูปที่ 4.12 ภายใต้กระบวนการจริงจะกำหนดด้วยประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก (Isentropic process, η_s) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การทำงานจริงของกังหัน (3-4) และปั๊ม (1-2) [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 4.13 กระบวนการไอเซนทรอปิกที่ปั๊มและกังหัน [นัฐพร, 2560]

สำหรับกังหัน

$\eta_{s,Tur}$ = งานส่งออกจริงของกังหัน / งานส่งออกไอเซนทรอปิก

$$\eta_{s,Tur} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$ สมการที่ 4.18

สำหรับปั๊ม

$\eta_{s,P}$ = งานป้อนไอเซนทรอปิกให้ปั๊ม / งานป้อนจริงให้ปั๊ม

$$\eta_{s,P} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$ สมการที่ 4.19

ดังนั้นสมการของงานที่ป้อนให้แก่ปั๊ม ได้ว่า

$$W_P = \dot{m}_{ref} v_1 (P_H - P_L) / \eta_{s,P}$$ สมการที่ 4.20

4.3.2 การประยุกต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงานสู่ชุมชน

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้การกำกับดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าป้อนให้แก่พื้นที่ภาคเหนือตอนบน โรงไฟฟ้าดังกล่าวเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน ที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นสารทำงานชนิดแรกจ่ายให้แก่วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ที่ใช้ Isopentane (C_5H_{12}) เป็นสารทำงานชนิดที่สอง ซึ่งรายละเอียดของโรงไฟฟ้าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ [การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2556]

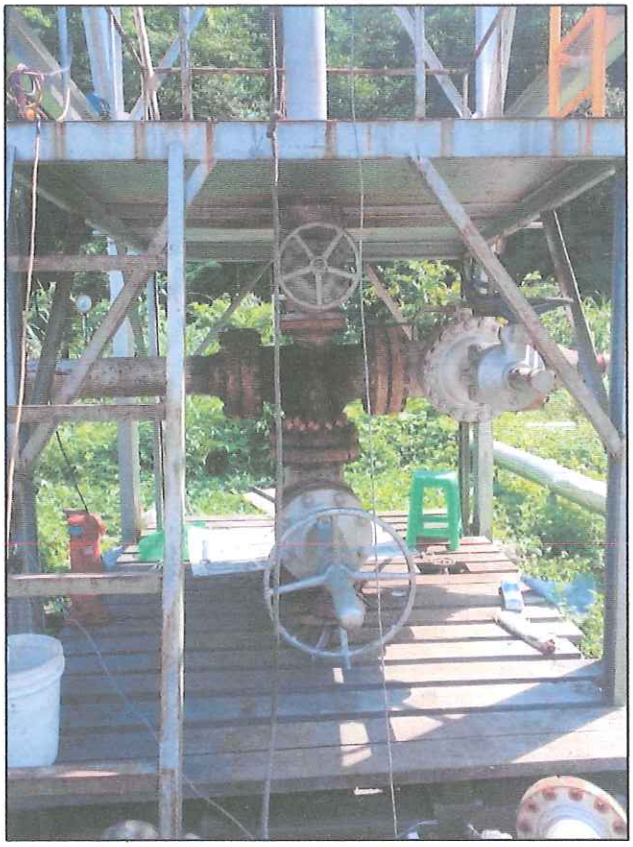
คุณสมบัติ	ปริมาณ
ระบบการทำงาน	วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์
สารทำงาน	R-601a (Isopentane)
อัตราการไหลน้ำพุร้อน (ลิตรต่อวินาที)	16.5 (ร้อยละ 75 ของอัตราการไหลสูงสุด)
อุณหภูมิน้ำพุร้อนเฉลี่ยเข้า (องศาเซลเซียส)	115
อุณหภูมิน้ำพุร้อนเฉลี่ยออก (องศาเซลเซียส)	77
อัตราการไหลน้ำเย็น (ลิตรต่อวินาที)	72.2
อุณหภูมิน้ำเย็นเฉลี่ยเข้า (องศาเซลเซียส)	20
กำลังการผลิตสูงสุด (กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า])	300
กำลังการผลิตสุทธิ (กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า])	200

Qing-Shui power plant ประเทศไต้หวัน มีการใช้ประโยชน์จากน้ำพุร้อนจากแหล่งกักเก็บความร้อนใต้ผิวดิน ที่ความลึกของหลุมเจาะ 1 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยน้ำพุร้อนที่ออกจากปากหลุมเจาะมีอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ประกอบไปด้วยของเหลวร้อยละ 90 และไอน้ำร้อยละ 10 น้ำพุร้อนดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ ขนาดกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์

ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ น้ำพุร้อนจากหลุมเจาะจึงถูกนำมาถ่ายเทความร้อนให้แก่ระบบน้ำสะอาด โดยแหล่งน้ำพุร้อน Qing-Shui มีตะกรันที่ติดมากับน้ำพุร้อนค่อนข้างน้อย ดังนั้นโรงไฟฟ้าแห่งนี้จึงมีการบำรุงรักษา และทำความสะอาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำพุร้อนประมาณ 2 ครั้งต่อปี น้ำสะอาดที่รับความร้อนจากน้ำพุร้อนจะมีอุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส และจ่ายให้แก่วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.15

สำหรับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ใช้สารทำงานในระบบ คือ R-245fa ที่มีความสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสารทำงานชนิดใหม่ที่ถูกพัฒนามาทดแทนสารทำงานแบบเก่า ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก

ในปัจจุบันมีการผลิตวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าน้อยกว่า 100 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] ออกมาแข่งขันกันในท้องตลาดอย่างแพร่หลาย ดังตัวอย่างของ Qing-Shui power plant ที่ใช้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แตกต่างกับในอดีตที่มีเฉพาะระบบขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากกว่า 100 กิโลวัตต์เท่านั้น ทำให้ต้นทุนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ลดลง ดังนั้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพของประเทศไทย จึงมีแนวโน้มที่จำนวนโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต



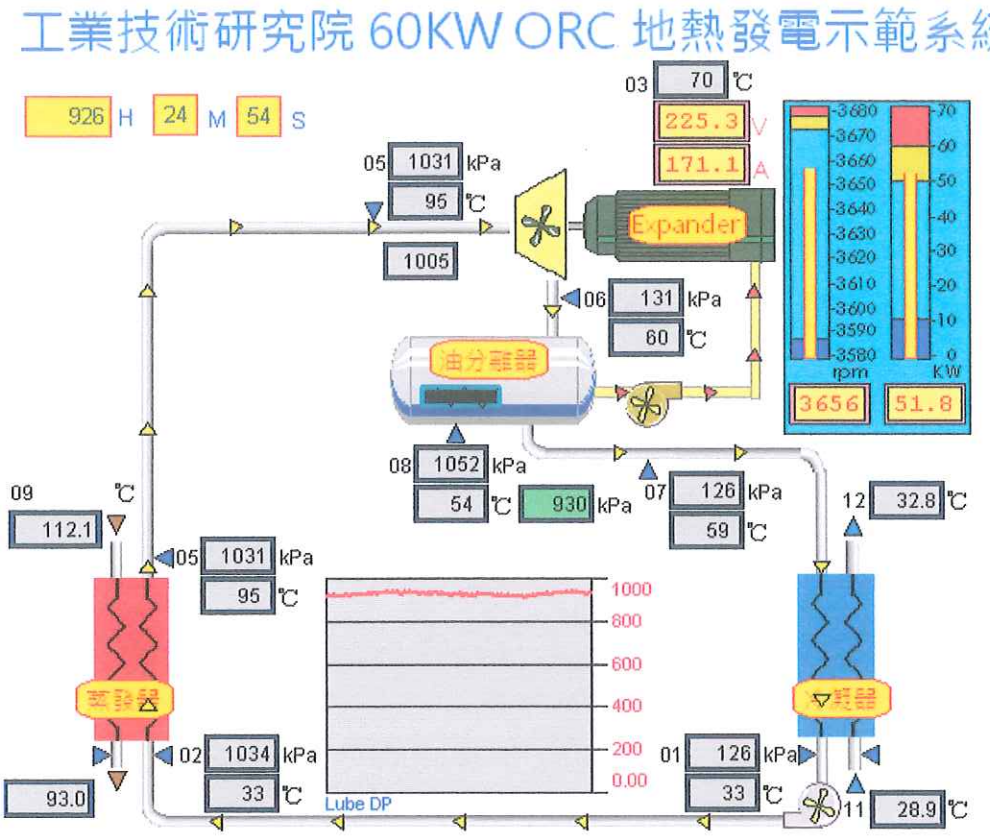
รูปที่ 4.14 หลุมเจาะน้ำพุร้อนลึก 1 กิโลเมตร ประกอบไปด้วยของเหลวร้อยละ 90 และไอน้ำร้อยละ 10 [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 4.15 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำพุร้อนและน้ำสะอาด [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 4.16 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดกำลังผลิต 60 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 4.17 สภาวะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ของ Qing-Shui power plant [นัฐพร, 2560]

4.3.3 กรณีศึกษา: การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชนแหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่

แหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้การกำกับและดูแลของกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพง อำเภอแม่ออน ตามพระราชดำริ จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จากการสำรวจและเก็บข้อมูลทางกายภาพของแหล่งน้ำพุร้อน พบว่า มีหลุมเจาะน้ำพุร้อนอยู่ทั้งหมด 6 หลุม ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 แหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง [นัฐพร และคณะ, 2560]

ผลการสำรวจโดยภาพรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.3 พบว่า ภายในกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพงฯ มีหลุมเจาะน้ำพุร้อนทั้งหมด 6 หลุม แต่มีเพียงหลุมเจาะน้ำพุร้อนเพียง 1 หลุม ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าได้ คือ หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 1 มีอุณหภูมิของน้ำพุร้อนผิวดินโดยประมาณอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลประมาณ 20 ลิตรต่อวินาที ซึ่งจากการสำรวจ พบว่า อุณหภูมิของน้ำพุร้อนจากหลุมเจาะดังกล่าว ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในลำธารแช่เท้า บ้านพัก ห้องอาบน้ำ และสระว่ายน้ำ ที่อุณหภูมิในช่วงประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส และจะเห็นได้ว่ามีการสูญเสียความร้อนโดยเปล่าประโยชน์ประมาณ 50 องศาเซลเซียส จากที่ขุดเจาะน้ำพุร้อนได้ 105 องศาเซลเซียส รวมถึงระบบท่อน้ำพุร้อนมีระยะทางค่อนข้างยาว สามารถทำการตัดท่อและใส่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อดึงความร้อนที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์กลับมาใช้งาน ส่วนหลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 2 และ 3 ถูกใช้ประโยชน์ด้านการท่องเที่ยวเพียงอย่างเดียว รวมทั้งหลุมเจาะไม่มีการออกแบบสำหรับนำน้ำพุร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในระบบผลิตพลังงานร่วม ส่วนหลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 4-6 ไม่มีการเปิดใช้งาน จึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้



ก) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 1



ข) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 2



ค) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 3



ง) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 4



จ) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 5



ฉ) หลุมเจาะน้ำพุร้อนที่ 6

รูปที่ 4.19 หลุมเจาะน้ำพุร้อนทั้ง 6 หลุม [นัฐพร และคณะ, 2560]

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลทางกายภาพของแหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง [นัฐพร และคณะ, 2560]

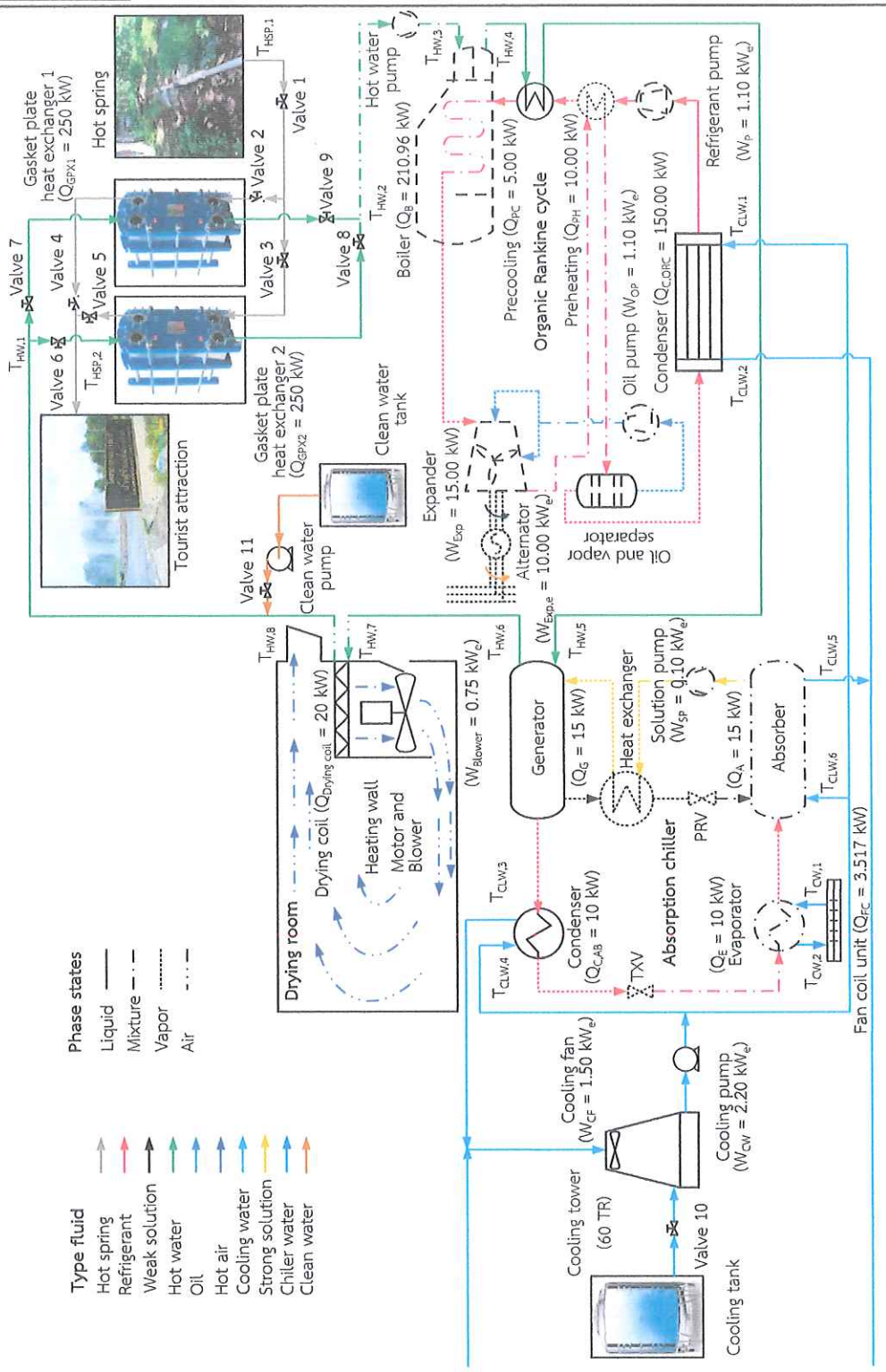
หลุมเจาะน้ำพุร้อน	1	2	3	4	5	6
ข้อมูลทางกายภาพ						
ขนาดท่อหลุมเจาะน้ำพุร้อน (นิ้ว)	6	4	4	3	6	6
ความลึกหลุมเจาะน้ำพุร้อน (เมตร)	283	70	60	50	100	100
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดิน (องศาเซลเซียส)	105	105	95	105	105	95
อัตราการไหลโดยประมาณ (ลิตรต่อวินาที)	20	10	0.5	2	20	0
การใช้ประโยชน์						
การท่องเที่ยวโดยปล่อยพุสู่บรรยากาศ (องศาเซลเซียส)	105	105	-	-	-	-
อุณหภูมิน้ำร้อนที่บ่อต้มไข่ (องศาเซลเซียส)	105	-	95	-	-	-
อุณหภูมิน้ำร้อนที่บ่อต้มหน่อไม้	-	-	-	105	-	-
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ลำธารแช่เท้า (องศาเซลเซียส)	50	-	40	-	-	-
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ห้องอาบน้ำ (องศาเซลเซียส)	40	-	-	-	-	-
อุณหภูมิน้ำร้อนที่สระว่ายน้ำ (องศาเซลเซียส)	40	-	-	-	-	-

ดังนั้นในการดำเนินงานจึงเลือกใช้ท่อน้ำพุร้อนของหลุมเจาะที่ 1 บริเวณก่อนนำน้ำพุร้อนไปพักไว้ในถังเก็บน้ำขนาด 2,000 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.20 มาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า ความเย็น และความร้อน เนื่องจากมีศักยภาพสูงและในขณะนี้ยังใช้ประโยชน์จากแหล่งความร้อนดังกล่าวไม่เต็มประสิทธิภาพ

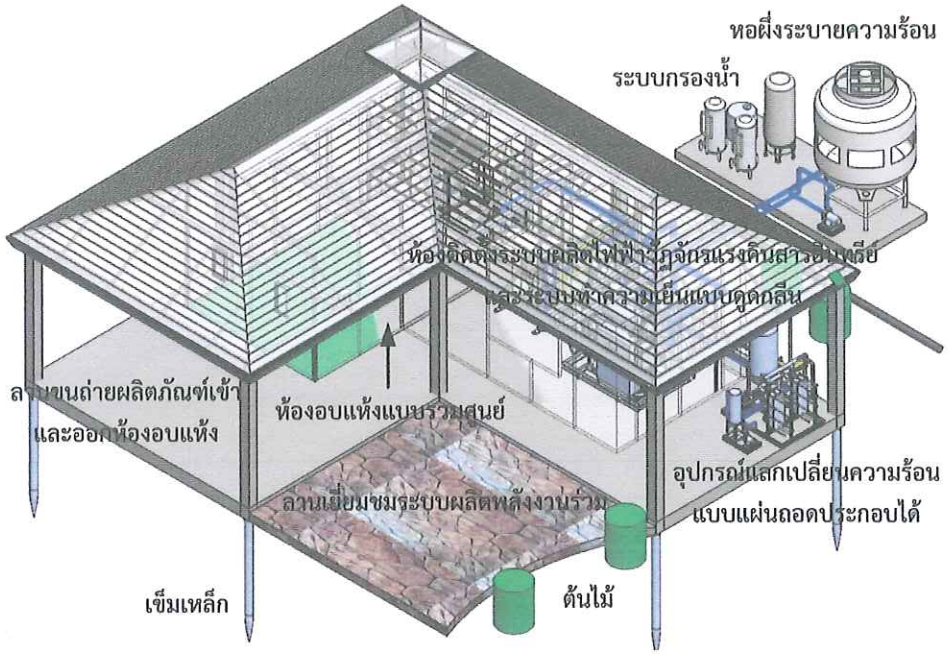


รูปที่ 4.20 ถังพักน้ำพุร้อนของหลุมเจาะที่ 1 ก่อนการนำไปใช้ประโยชน์ด้านนันทนาการและการท่องเที่ยว [นัฐพร และคณะ, 2560]

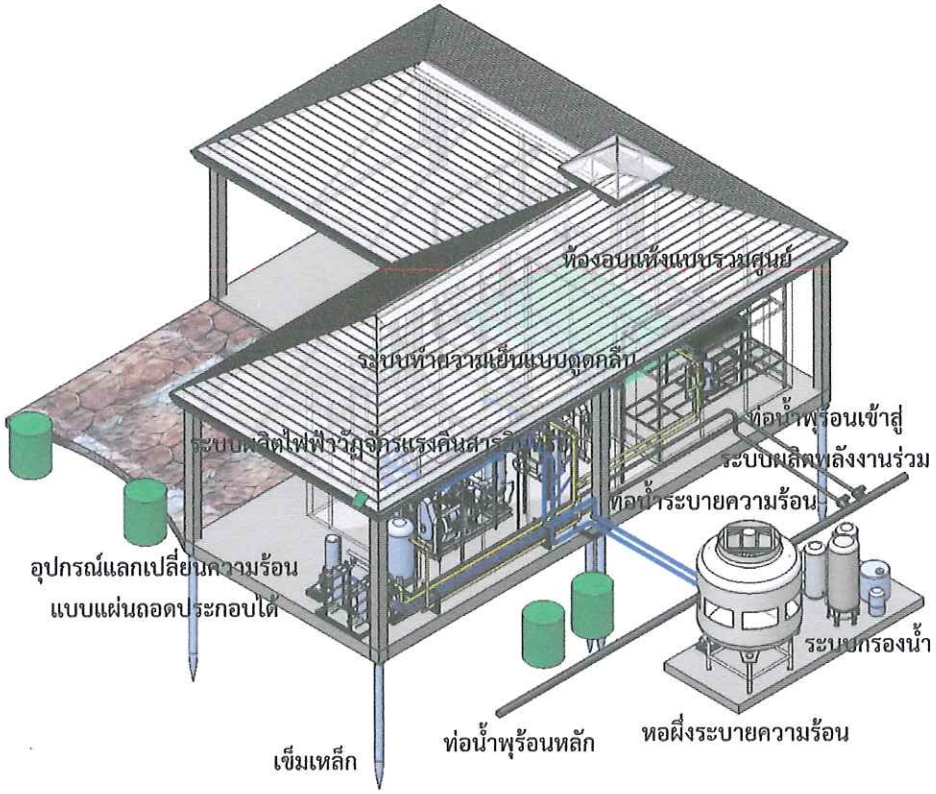
โครงการ การผลิตไฟฟ้าร่วมกับการทำความเย็นและความร้อนแบบขั้นบันไดจากพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย [นัฐพร และคณะ, 2560] จึงได้ทำการนำความร้อนจากน้ำพุร้อนหลุมที่ 1 มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 15 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] (kW_e) ร่วมกับการทำความเย็นจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาด 5 ตันความเย็น (รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงในบทที่ 6) และใช้ประโยชน์ด้านความร้อนโดยห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ขนาด 20 กิโลวัตต์ [ความร้อน] (kW_{th}) (รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงในบทที่ 5) ซึ่งทั้ง 3 ระบบเป็นการใช้ประโยชน์น้ำพุร้อนแบบขั้นบันได ดังแสดงแผนภาพการทำงานในรูปที่ 4.21 โดยมีแบบแปลนและลักษณะโดยรวมของโรงเรือนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.21 แผนภาพการใช้ประโยชน์ร่วมด้านการท่องเที่ยวและการผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อนสำหรับแหล่งน้ำพุร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และคณะ, 2560]



รูปที่ 4.22 แบบแปลนโรงเรือนติดตั้งระบบผลิตพลังงานร่วมแบบขั้นบันไดด้านหน้า [นัฐพร และคณะ, 2560]

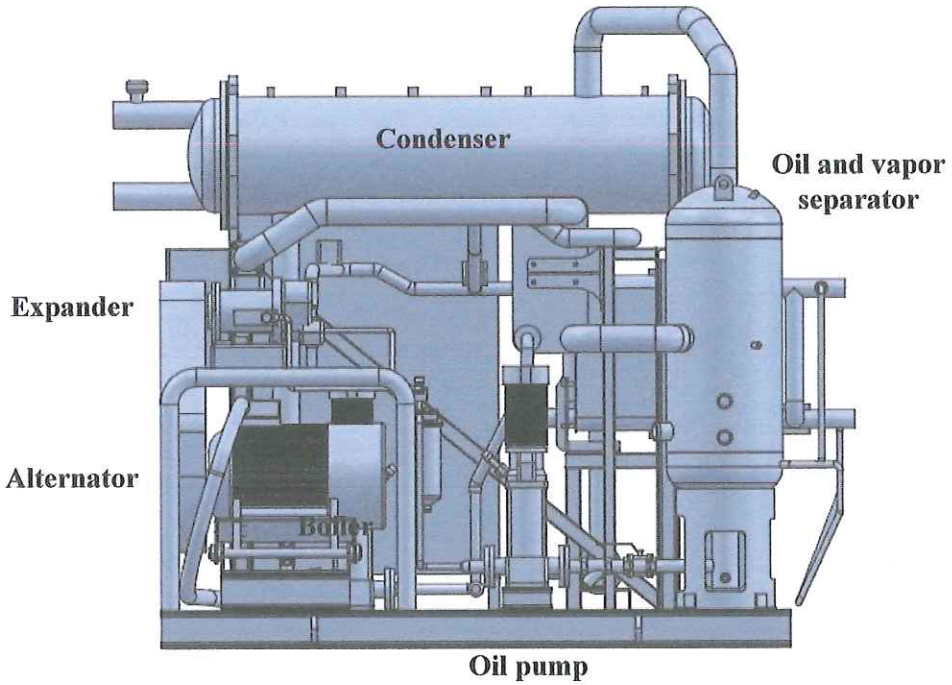


รูปที่ 4.23 แบบแปลนโรงเรือนติดตั้งระบบผลิตพลังงานร่วมแบบขั้นบันไดด้านหลัง [นัฐพร และคณะ, 2560]



รูปที่ 4.24 โรงเรือนระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อนแบบขั้นบันได [นัฐพร และคณะ, 2560]

ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ชั้นเดียวขนาด 15 กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] มีแบบแปลนและลักษณะโดยรวมของต้นแบบเมื่อสร้างแล้วเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ โดยสามารถใช้น้ำพุร้อนอุณหภูมิ 85-105 องศาเซลเซียส เป็นสารทำงานตัวที่หนึ่ง เพื่อจ่ายให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน R-245fa ในการรับความร้อนจากน้ำร้อนและใช้ในการผลิตไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 4.25 แบบแปลนระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ [นัฐพร และคณะ, 2560]



รูปที่ 4.26 ต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [นัฐพร และคณะ, 2560]

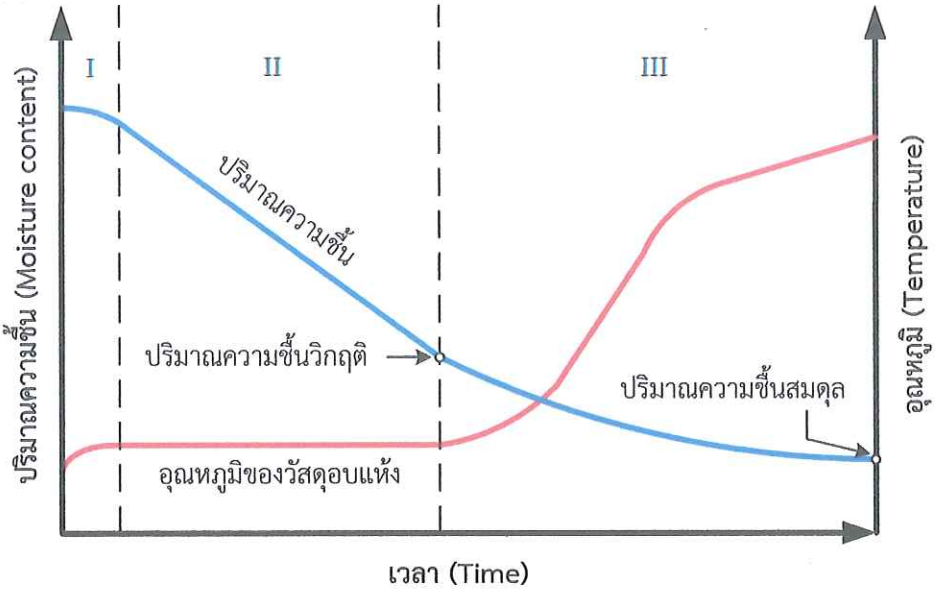
บทที่ 5
พลังงานความร้อนใต้พิภพเพื่อการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการดึงความชื้นออกจากวัสดุที่ทำการอบแห้ง โดยจ่ายลมร้อนให้แก่ห้องอบแห้ง ซึ่งระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์เป็นระบบที่ได้รับความนิยมกันแพร่หลาย โดยการใช้น้ำร้อนหรือไอน้ำเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งโดยใช้แหล่งพลังงานจากน้ำพุร้อนสำหรับประเทศไทยนั้น นัฐพร และชัชวาลย์ (2552) ได้สรุปแนวทางเป็น 2 รูปแบบ คือ การนำน้ำพุร้อนอุณหภูมิสูงมาจ่ายให้แก่ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์โดยตรง และการนำน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำมาเพิ่มคุณภาพความร้อนโดยระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ จากนั้นนำน้ำร้อนอุณหภูมิสูงที่ได้จ่ายให้แก่ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ต่อไป

ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้ง ไม่มีขนาดห้องอบแห้งและขนาดอุปกรณ์ที่แน่นอนขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ชนิดของผลิตผลทางการเกษตรที่ต้องการอบแห้ง และคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำพุร้อน ซึ่งทั้งสองปัจจัยเป็นตัวกำหนดขนาดของห้องอบแห้ง ระยะเวลาในการอบ รวมถึงความเร็วลมที่ต้องจ่ายให้แก่ห้องอบแห้งอีกด้วย

5.1 หลักการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่เป็นการพาความร้อนระหว่างอากาศและความชื้นที่ผิวของวัตถุดิบอบแห้ง ความร้อนถูกใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิว ซึ่งเมื่อวัดค่าปริมาณความชื้น (Moisture content, Mc) และอุณหภูมิของวัสดุที่อบแห้งกับเวลา จะได้กราฟการอบแห้ง (Drying curve) ที่สามารถแบ่งได้ 3 ช่วงดังแสดงในรูปที่ 5.1



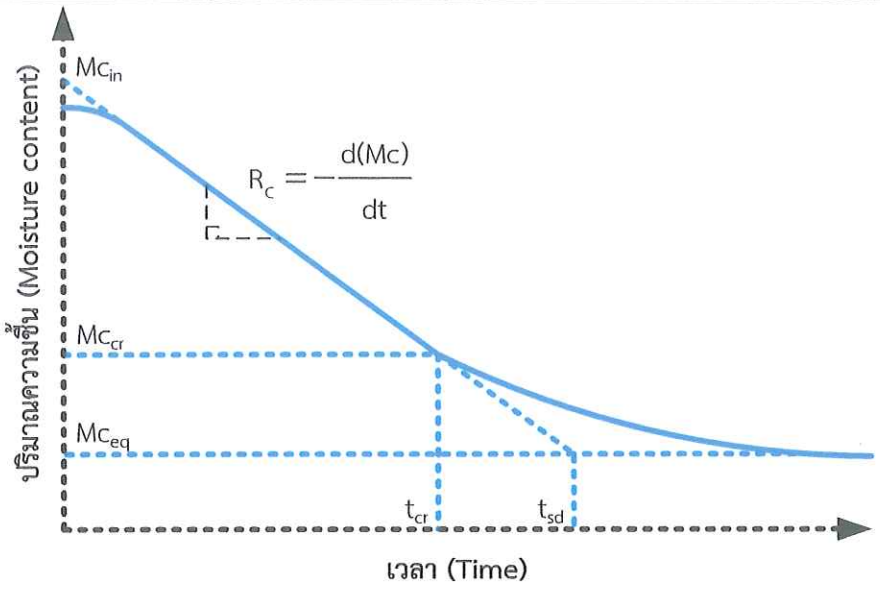
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและเวลาในการอบแห้ง (Drying curve) [นัฐพร, 2560]

จากรูปที่ 5.1 การอบแห้งในช่วงที่แรก (I) คือ ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat period) เป็นช่วงเริ่มให้ความร้อนแก่วัสดุเปียก เพื่อให้อุณหภูมิวัสดุและน้ำในวัสดุเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

ช่วงที่สอง (II) คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period) เป็นช่วงที่ต้องการให้อุณหภูมิภายในวัสดุและผิวของวัสดุคงที่ เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนตลอดช่วงการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับวัสดุจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิววัสดุเท่านั้น และปริมาณความชื้นจะลดลงด้วยอัตราคงที่เมื่อเทียบกับเวลา ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนแปลงจากคงที่เป็นลดลง ซึ่ง ณ จุดนี้เรียกว่า ค่าปริมาณความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของวัสดุ เช่น ขนาด รูปร่าง และสิ่งแวดล้อมในการอบแห้ง เป็นต้น

ช่วงที่สาม (III) คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period) ความชื้นของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นของน้ำจากภายในวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันการระเหยของน้ำออกจากผิวของวัสดุ ดังนั้นวัสดุจะอยู่ในสภาพแห้งและอุณหภูมิผิวสูงขึ้น และทำให้อัตราการอบแห้งลดลง เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้สภาวะอากาศคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน และเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งในที่สุด ส่วนปริมาณความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลง จนกระทั่งความชื้นในวัสดุมีค่าความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และเรียกค่าความชื้นดังกล่าวว่า ค่าปริมาณความชื้นสมดุล (Equivalent moisture content)

ระยะเวลาการอบแห้งสามารถหาได้จากข้อมูลการทดสอบกราฟการอบแห้ง (Drying curve) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 [Vanderschuren and Delvvosalle, 1982]



รูปที่ 5.2 การหาช่วงเวลาในการอบแห้ง [นัฐพร, 2560]

จากรูปที่ 5.2 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากกราฟการอบแห้งมีดังต่อไปนี้

$$Mc = \frac{M_w}{M_{ds}} 100 \qquad \text{สมการที่ 5.1}$$

$$R_C = -\frac{d(Mc)}{dt} \qquad \text{สมการที่ 5.2}$$

$$t_{sd} = \frac{Mc_{in} - Mc_{eq}}{R_C} \qquad \text{สมการที่ 5.3}$$

$$t_{cr} = \frac{Mc_{in} - Mc_{cr}}{R_C} \qquad \text{สมการที่ 5.4}$$

เมื่อ M_W มวลของความชื้นในวัสดุ (กิโลกรัมน้ำ)

M_{ds} มวลของวัสดุแห้งที่ความชื้นร้อยละ 0 (กิโลกรัมมวลแห้ง)

R_C อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้งต่อนาที)

t_{sd} เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจำเพาะ (Specific drying time, นาที)

t_{cr} เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนถึงความชื้นวิกฤติ (นาที)

Mc_{in} อัตราส่วนความชื้นของวัสดุเริ่มต้นการอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ร้อยละ)

Mc_{eq} อัตราส่วนความชื้นสมดุล (ร้อยละ)

Mc_{cr} อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (ร้อยละ)

อนึ่งค่าปริมาณความชื้นข้างต้น สามารถบอกได้โดยค่ามาตรฐานในการอบแห้ง 2 มาตรฐาน คือ ค่าปริมาณความชื้นฐานแห้ง (% dry basis) และค่าปริมาณความชื้นฐานเปียก (% wet basis) เป็นหลักเกณฑ์ใน

การวัดค่าการอบแห้ง เพื่อให้สามารถกำหนดมาตรฐานการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรได้ โดยค่าความชื้นดังกล่าวแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\%\ \text{dry basis} = \frac{M - M_{F,0}}{M_{F,0}} 100 \qquad \text{สมการที่ 5.5}$$

$$\%\ \text{wet basis} = \frac{M - M_{F,0}}{M} 100 \qquad \text{สมการที่ 5.6}$$

เมื่อ M มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)

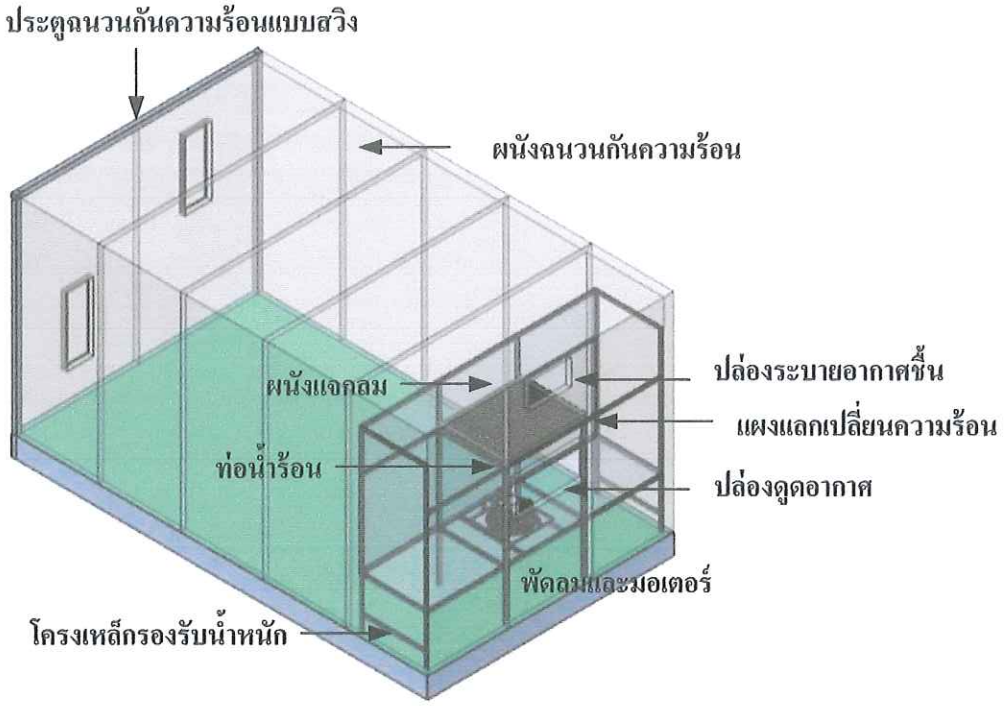
$M_{F,0}$ มวลแห้งความชื้นร้อยละ 0 (กิโลกรัม)

5.2 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

ระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์มีหลักการทำงาน คือ ใช้ไอน้ำหรือน้ำร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกส่งผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศภายในห้องอบแห้งให้มีอุณหภูมิสูง จากนั้นพัดลมและมอเตอร์จะทำหน้าที่ส่งลมร้อนให้หมุนเวียนภายในห้องอบแห้ง ผนังแจกลมทำหน้าที่แยกอากาศที่ใช้ในการอบแห้งออกจากอากาศชื้น ที่ต้องผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อนและอากาศแห้งก่อนเข้าทำการอบแห้ง โครงเหล็กภายในห้องทำหน้าที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักของสิ่งที่ใช้ในการอบแห้ง ชุดควบคุมไฟฟ้าและอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าพร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ถ้าหากมีห้องอบแห้งหลายห้องระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์จะมีการใช้ไอน้ำหรือน้ำจากหม้อต้ม (Boiler) ร่วมกัน คือ มีท่อนำไอน้ำหรือน้ำร้อนเข้าแผงแลกเปลี่ยนความร้อนของแต่ละห้องมาจากหม้อต้มตัวเดียวกัน

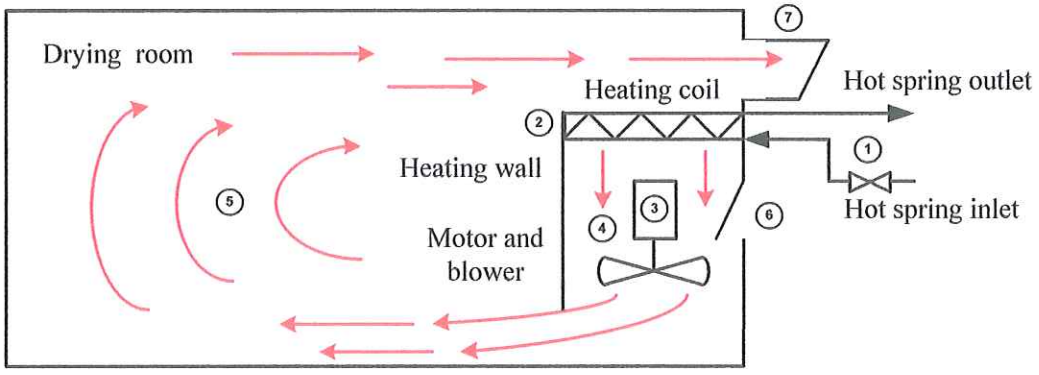
ในปัจจุบันระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดี นอกจากนั้นระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์มีความเหมาะสม ในการประยุกต์ใช้ร่วมกับพลังงานความร้อนใต้พิภพมากที่สุดอีกด้วย

การอบแห้งแบบรวมศูนย์นั้นหลักการสำคัญ คือ การระบายลมเข้าออกภายในห้องอบแห้ง ดังนั้นด้านหลังห้องอบแห้งจึงมีช่องรับลมจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องอบแห้งซึ่งจะอยู่บริเวณใบพัด และช่องระบายอากาศชื้นออกภายนอกห้องอบแห้งซึ่งจะอยู่เหนือแผงแลกเปลี่ยนความร้อน ช่องทั้งสองนี้สามารถเปิดและปิดได้ ในกรณีที่อากาศภายในห้องอบแห้งมีความชื้นมากจะทำการเปิดช่องทั้งสองนี้เอาไว้ เพื่อดูดอากาศภายนอกมาทดแทนอากาศภายในห้องที่มีความชื้นสูง และจะปิดในกรณีที่อากาศภายในห้องมีความชื้นและความร้อนที่พอเหมาะต่อการอบแห้ง จากนั้นพัดลมและมอเตอร์จะทำหน้าที่ส่งลมร้อนให้หมุนเวียนภายในห้องอบแห้ง ผนังแจกลมทำหน้าที่แยกลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งออกจากอากาศชื้น ลมร้อนจะผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อนและอากาศแห้งก่อนเข้าพื้นที่อบแห้ง โครงเหล็กภายในห้องทำหน้าที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักของพืชผลทางการเกษตร และชุดควบคุมไฟฟ้าและอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของห้องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์และส่วนประกอบ [นัฐพร, 2560]

รูปที่ 5.4 แสดงการไหลเวียนของลมร้อนภายในห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ โดยน้ำพุร้อนผ่านวาล์วควบคุม (1) เปิดให้น้ำร้อนผ่านเข้าแผงแลกเปลี่ยนความร้อน (2) แล้วไหลกลับออกไป ลมจากพัดลม (3) จะผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้อากาศร้อนขึ้น (4) จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่พื้นที่อบแห้ง (5) ผ่านพืชผลทางการเกษตรที่ต้องการอบ การระบายความชื้นในช่วงนี้มาจากการนำอากาศภายนอกที่มีความชื้นต่ำเข้ามาทางช่องปล่องพัดลม (6) และลมร้อนที่ผ่านแลกเปลี่ยนความร้อน (4) มาแทนที่อากาศภายในห้องที่มีความชื้นสูง ซึ่งจะถูกดันออกทางปล่องระบายอากาศขึ้น (7) ด้านบน โดยรายละเอียดของแต่อุปกรณ์มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.4 แสดงการหมุนเวียนลมภายในห้องอบแห้ง [Nattaporn et al., 2014]

5.2.1 ผนังห้องอบแห้ง

ผนังห้องอบแห้งสร้างจากวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งโดยส่วนมากนิยมใช้แผ่นฉนวนโพลีสไตรีน ที่มีผิวหน้าทั้งสองด้านเป็นแผ่นเหล็กอาบสังกะสีเคลือบขาว (Galvanized steel and white polystyrene coating food grade USDA) อัดติดกับโฟมด้วยกาวยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 5.5



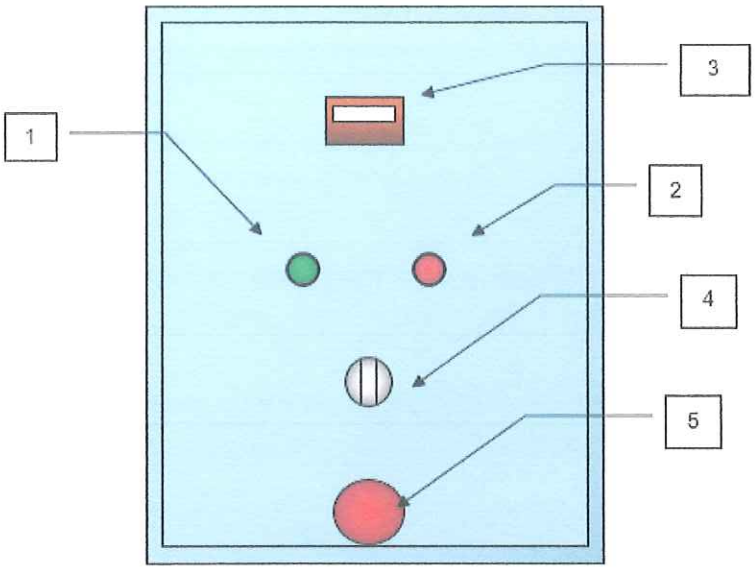
รูปที่ 5.5 ลักษณะแผ่นฉนวนการขึ้นฉนวนโพลีสไตรีน [นัฐพร, 2560]

5.2.2 ระบบไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิ

ระบบไฟฟ้าและควบคุมอุปกรณ์จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ประเภท คือ 1. ชุดเทอร์โมมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้ง (Thermometer) 2. อุปกรณ์การตัดต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า (Magnetic contractor) 3. อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการใช้พลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ป้องกันการทำงานเกินขีดจำกัดหรือช็อตนั้นเอง (Overload) 4. อุปกรณ์เปิดหรือปิดการส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าทั้งหมด (Circuit breaker)

ตู้ควบคุมการทำงานของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์โดยส่วนมาก จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของตู้ควบคุมประกอบไปด้วย หมายเลข 1 หลอดไฟแสดงสภาวะการทำงานของพัดลมถ้าหลอดไฟดวงนี้สว่าง จะหมายถึงพัดลมกำลังทำงาน หมายเลข 2 หลอดไฟแสดงภาระการกำลังไฟฟ้า จะสว่างเมื่อระบบไฟฟ้าของห้องอบแห้งมีปัญหาและระบบจะไม่ทำงาน ต้องทำการตรวจสอบและแก้ไขจุดบกพร่องก่อน หมายเลข 3 ตัวแสดงอุณหภูมิในห้องอบแห้ง (เทอร์โมมิเตอร์) หมายเลข 4 สวิตซ์ควบคุมพัดลม ทำหน้าที่

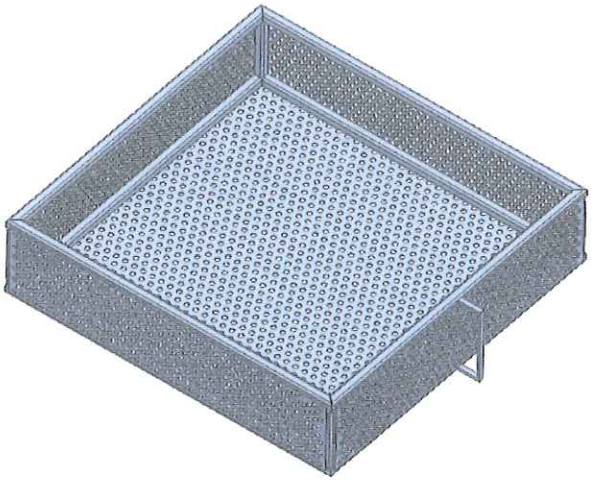
ควบคุมการทำงานของพัดลมภายในห้องอบ โดยสามารถเลือกการควบคุม คือ ปิดหรือเปิด หมายเลข 5 เป็นสวิตซ์หยุดการทำงานระบบไฟฟ้า เมื่อมีกรณีเหตุการณ์ฉุกเฉินเกิดขึ้น



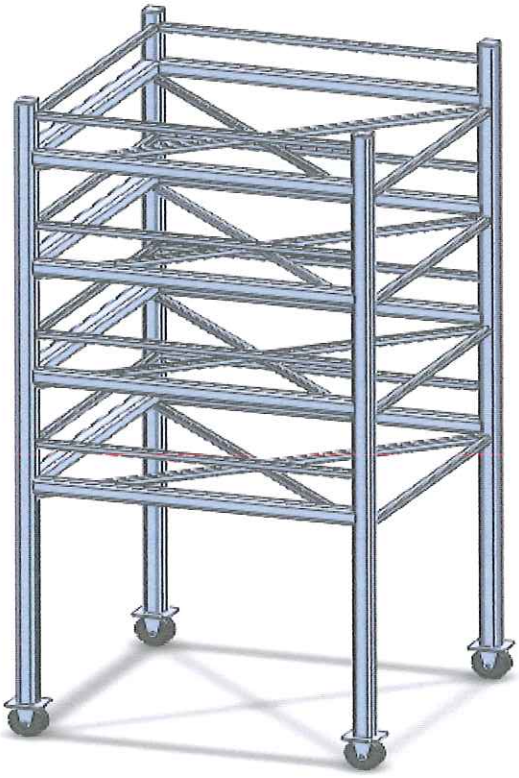
รูปที่ 5.6 ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าของห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560]

5.2.3 ตะแกรงภายในห้อง

ตะแกรงภายในห้องอบแห้ง คือ โครงเหล็กรองรับวัสดุทางการเกษตรที่จะนำมาอบแห้ง สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกต่อการใช้งาน ทั้งนี้การอบพืชผลทางการเกษตรแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปร่างตะแกรงเหล็กภายในห้องอบแห้งแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับรูปร่างและวิธีการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรแต่ละชนิด โดยตะแกรงจะมีชั้นสำหรับวางพืชผลทางการเกษตรดังแสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับพืชผลทางการเกษตรที่หลากหลาย ไม่เฉพาะเจาะจงสำหรับพืชผลทางการเกษตรชนิดใดชนิดหนึ่ง



รูปที่ 5.7 ชั้นวางตะแกรงเหล็กภายในห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 5.8 โครงสร้างตะแกรงเหล็กภายในห้องอบแห้ง [นัฐพร, 2560]

5.2.4 ผนังแจกลม

ผนังแจกลมทำด้วยแผ่นสังกะสีเรียบขนาดเท่ากับความกว้างของห้อง แต่ด้านบนและด้านหลังจะเป็นช่องให้อากาศสามารถหมุนเวียนได้ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ทั้งนี้ผนังแจกลมต้องมีขนาดที่เหมาะสม เพื่อให้ลมร้อนมีการกระจายอุณหภูมิและความเร็วลมที่สม่ำเสมอทั่วทั้งห้องอบ ป้องกันวัสดุทางการเกษตรบางส่วนเน่าหรือไม่แห้งภายในห้องอบแห้ง



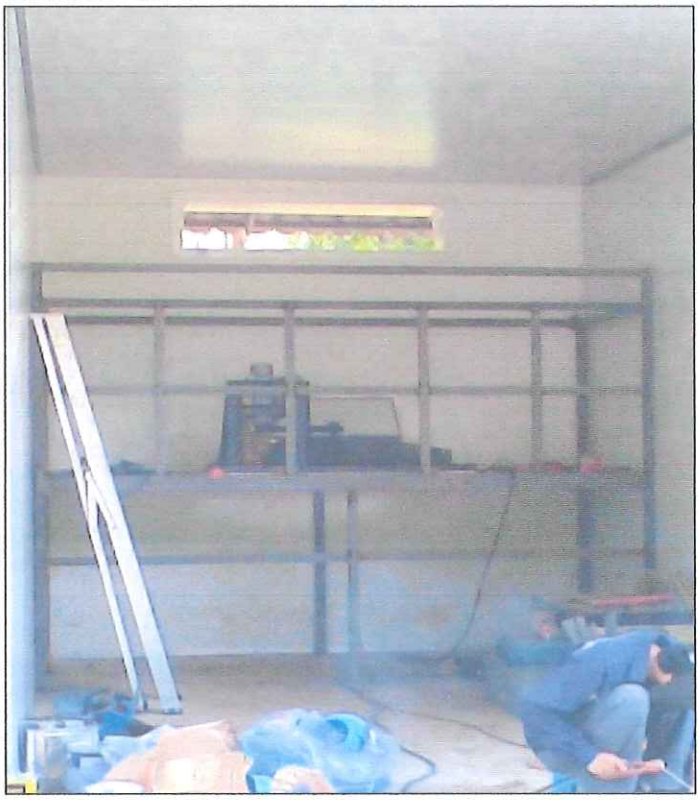
รูปที่ 5.9 ผนังแจกลม [นัฐพร, 2560]

5.2.5 พัดลมและมอเตอร์

พัดลมและมอเตอร์จะถูกติดตั้งบนโครงเหล็กรับน้ำหนัก หลังผนังแจกลมเพื่อนำอากาศที่ผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อน จ่ายเข้าสู่ภายในห้องอบแห้ง ทั้งนี้ใบพัดสำหรับงานอบแห้งนิยมเลือกใบพัดพลาสติกทนความร้อน และสามารถปรับมุมใบพัดได้ตามความต้องการอัตราการหมุนเวียนอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.10

5.2.6 แผงแลกเปลี่ยนความร้อน

แผงแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากน้ำพุร้อนให้แก่อากาศ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.11 โดยน้ำพุร้อนจะวิ่งในท่อทองแดงถ่ายเทความร้อนผ่านผิวท่อและครีบระบายความร้อน ให้แก่อากาศที่ผ่านแผงแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว



รูปที่ 5.10 โครงเหล็กรองรับน้ำหนักอุปกรณ์ระบบอบแห้ง ใบพัดและมอเตอร์ [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 5.11 แผงแลกเปลี่ยนความร้อนหรือคอยล์ร้อน (Drying coil) [นัฐพร, 2560]

5.2.7 ท่อนำน้ำร้อนเข้าสู่แผงแลกเปลี่ยนความร้อน

ท่อนำน้ำพุร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งเป็นท่อสาขาย่อย ที่ต่อมาจากท่อน้ำร้อนหลักซึ่งต่อมาจากปากหลุมเจาะ โดยส่วนมากจะเลือกใช้ท่อเหล็กดำ SCH.40 เช่นเดียวกับระบบท่อไอน้ำ แต่ต้องหุ้มฉนวนกันความร้อน โดยส่วนมากนิยมหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วและคลุมทับด้วยแผ่นอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ระบบท่อนำน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560]

5.2.8 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน

ชัชวาลย์ และนัฐพร (2548) และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2548) ได้ทำการศึกษาการนำน้ำพุร้อนมาใช้ประโยชน์กับห้องเย็นและห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งใช้ระบบอบแห้งแบบรวมศูนย์สำหรับอบพืชผลทางการเกษตร โดยน้ำพุร้อนที่นำมาใช้งานเกิดจากการขุดเจาะ ความลึกของหลุมเจาะลงไปในผิวดิน 56 เมตร อัตราการไหลของน้ำพุร้อนประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีอุณหภูมิน้ำพุร้อนที่ผิวดินประมาณ 98 องศาเซลเซียส ณ แหล่งน้ำพุร้อนป่าตึง ตำบลป่าตึง อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย ห้องอบแห้งที่ได้ทำการออกแบบและก่อสร้างมีขนาด 3.6 เมตร x 4.3 เมตร x 3.0 เมตร ขนาดความจุของห้องประมาณ 3 ตัน สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 93 องศาเซลเซียส ภายใน 5 นาที (ห้องเปล่า) และความเร็วลมภายในห้องที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 20,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ซึ่งสามารถอบแห้งพืชผลทางการเกษตรได้หลายชนิด รายละเอียดห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์แสดงดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อน [นัฐพร, 2560]



รูปที่ 5.14 ระบบท่อนำน้ำพุร้อน [นัฐพร, 2560]

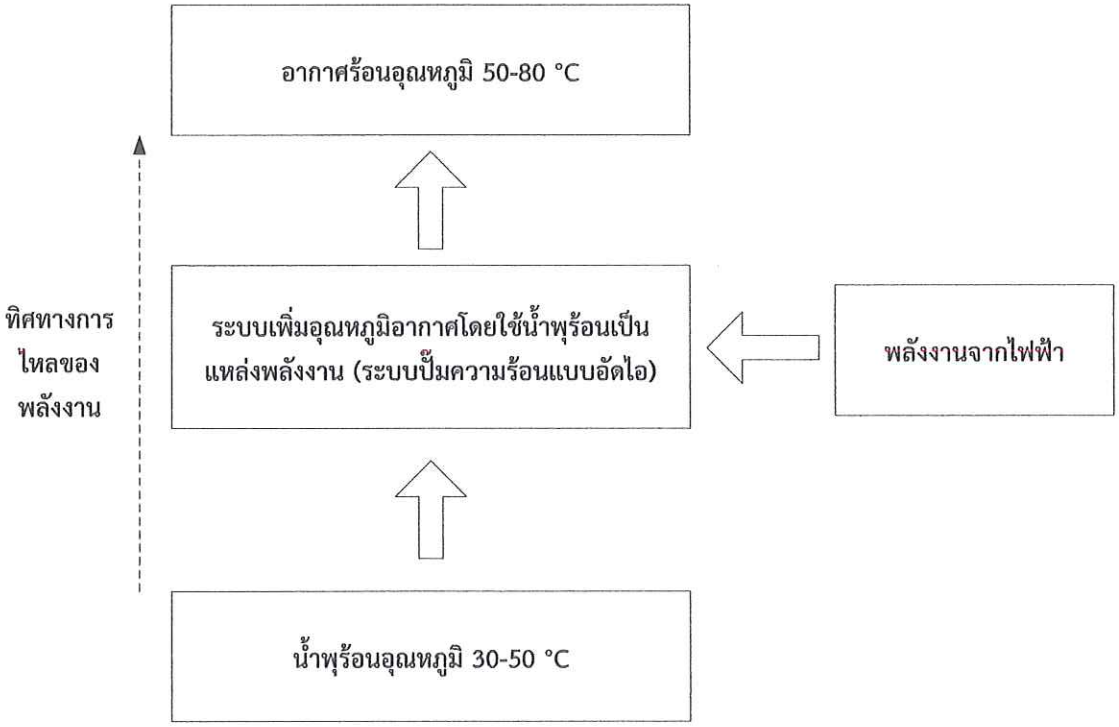


รูปที่ 5.15 ตะแกรงวางผลิตผลทางการเกษตรสำหรับอบแห้ง [นัฐพร, 2560]

5.3 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

จากข้อมูลแหล่งน้ำพุร้อนของประเทศไทยพบว่า น้ำพุร้อนส่วนมากจะเป็นแหล่งน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยมากใช้ในการนันทนาการ เช่น ห้องอาบน้ำแร่ เป็นต้น ดังนั้นหากสามารถนำแหล่งน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วนั้น จะเป็นการสร้างรายได้ให้แก่ชาวบ้านในท้องถิ่นเพิ่มมากขึ้น เทคนิคการใช้ระบบปั๊มความร้อนมาเพิ่มคุณภาพความร้อนของน้ำพุร้อนเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าสนใจ โดยระบบดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ [นัฐพร, 2560]

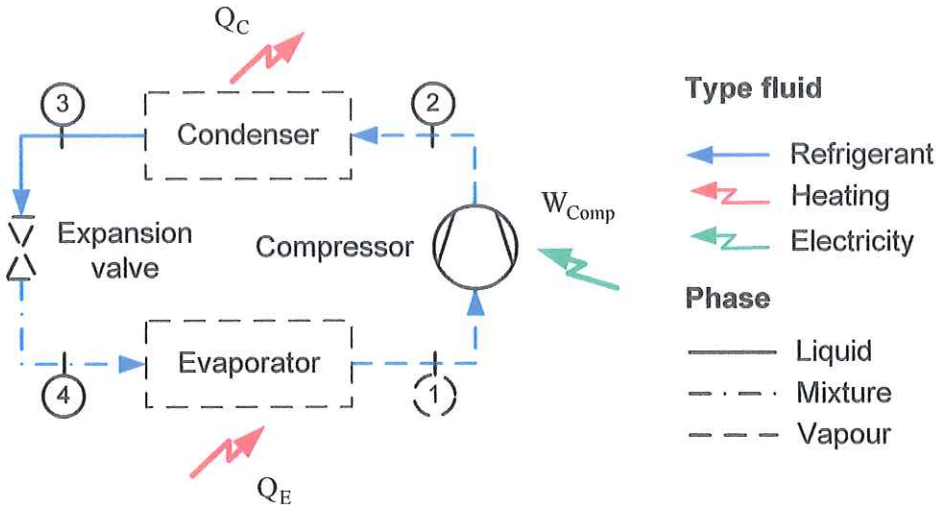
ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ คือ เทคโนโลยีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งให้สูงขึ้นในช่วงระหว่าง 50-80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ความร้อนจากน้ำพุร้อนอุณหภูมิในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส เป็นแหล่งพลังงานให้แก่ระบบปั๊มความร้อน ซึ่งจะทำให้พลังงานไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ (น้ำพุร้อน) ไปยังแหล่งอุณหภูมิสูง (อากาศร้อน) ได้ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามาเป็นตัวขับ ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แผนผังขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงาน [นัฐพร, 2560]

5.3.1 หลักการปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

กระบวนการต่าง ๆ ของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 อุปกรณ์ คือ เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องระเหย (Evaporator) และวาล์วลดความดัน (Expansion valve) ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ [Nattaporn and Tanongkiat, 2009]

จากรูปที่ 5.17 วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

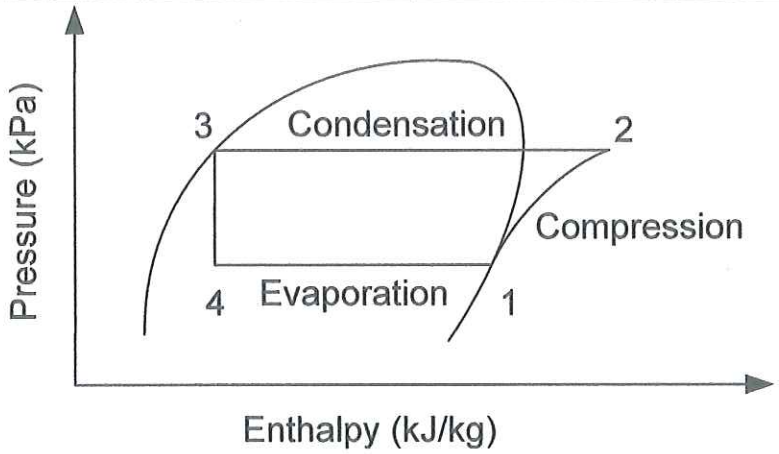
กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการที่ไอสารทำงานถูกอัดแบบไอเซนทรอปิก ด้วยเครื่องอัดไอให้ไอสารทำงานมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น (Isentropic process)

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการที่ไอสารทำงานกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวและคายความร้อนออกมาที่เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการที่มีความดันคงที่

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำงานมีสถานะเป็นของเหลวลดความดันด้วยวาล์วลดความดัน เป็นกระบวนการขยายตัวที่มีเอนทัลปีคงที่ (Throttling process)

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำงานสถานะของเหลวเดือดกลายเป็นไอ เนื่องจากรับความร้อนเข้าไปที่เครื่องระเหย เป็นกระบวนการความดันคงที่

ในวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ สามารถอธิบายการทำงานของวัฏจักรด้วยการทำงานของสารทำงานในวัฏจักร ซึ่งนิยมใช้แผนภาพในการบรรยายคุณสมบัติ โดยทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์มักใช้แผนภาพความดันและเอนทัลปี (P-h diagram) ดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แผนภาพความดันและเอนทัลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ [นัฐพร, 2560]

การวิเคราะห์วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไออาศัยสมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้ คือ วิเคราะห์ระบบตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ สภาวะต่าง ๆ ของระบบคงที่และไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์

เอนทัลปีเป็นคุณสมบัติของสารทำงานที่สำคัญและเหมาะสมสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนสถานะ จึงแสดงการวิเคราะห์ระบบด้วยแผนภาพความดันและเอนทัลปี ดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดสารทำงาน ตามกระบวนการไอเซนทรอปิก

$$q_{Comp} = h_2 - h_1 \qquad \text{สมการที่ 5.7}$$

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการระบายความร้อนออกจากสารทำงาน ตามกระบวนการความดันคงที่

$$q_C = h_2 - h_3 \qquad \text{สมการที่ 5.8}$$

หรือ

$$q_C = q_E + q_{Comp} \qquad \text{สมการที่ 5.9}$$

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการขยายตัวของสารทำงาน ตามกระบวนการเอนทัลปีคงที่

$$h_3 = h_4 \qquad \text{สมการที่ 5.10}$$

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการดูดความร้อนของสารทำงาน เพื่อเปลี่ยนสถานะตามกระบวนการความดันคงที่

$$q_E = h_1 - h_4 \qquad \text{สมการที่ 5.11}$$

นอกจากนี้กระบวนการทำงานของห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

ความสามารถในการให้ความร้อนสุทธิของน้ำพุร้อนแก่เครื่องระเหย

$$Q_{HW} = \dot{m}_{HW} Cp_{bulk,HW} (T_{HW,i} - T_{HW,o}) \qquad \text{สมการที่ 5.12}$$

ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องระเหย

$$Q_E = \varepsilon_{HX} Q_{HW}$$ สมการที่ 5.13

$$Q_E = \dot{m}_{ref} q_E$$ สมการที่ 5.14

ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของเครื่องควบแน่น

$$Q_C = \dot{m}_{ref} q_C$$ สมการที่ 5.15

งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ

$$W_{Comp} = \dot{m}_{ref} q_{Comp}$$ สมการที่ 5.16

ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องอัดไอ

$$\eta_{s,Comp} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1)$$ สมการที่ 5.17

ปริมาณสารทำงานที่ไหลในวัฏจักร (Vapor volume)

$$V_{ref} = \dot{m}_{ref} v_1$$ สมการที่ 5.18

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ หรือ Coefficient of Performance (COP) คือ ตัวแปรที่ใช้แสดงสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็น นิยามจากสัดส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Output) หารด้วยพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ (Input) คล้ายกับนิยามของประสิทธิภาพ (Efficiency) ในระบบอื่น ๆ แต่มีข้อแตกต่าง คือ ในระบบทั่วไปนิยมบอกค่าประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพร้อยละ 10 เป็นต้น แต่สำหรับระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Vapor Compression Heat Pump, VCHP) มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 100 ดังนั้นค่า COP จึงถูกนิยามขึ้นมาเพื่อบอกสมรรถนะการทำงานของระบบทั้งสอง โดยเป็นสัดส่วนของค่าพลังงานที่ได้รับจากระบบหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] ส่วนด้วยพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] (kW_{th}) ดังนั้นค่า COP เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบทำความเย็น

$$COP_{Cooling} = Q_E / W_{Comp}$$ สมการที่ 5.19

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบปั๊มความร้อน

$$COP_{Heating} = Q_C / W_{Comp}$$ สมการที่ 5.20

และ

$$COP_{Heating} = COP_{Cooling} + 1$$ สมการที่ 5.21

เมื่อนำวัฏจักรแบบอัดไอมาแสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบจะได้ว่า

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

$$COP_{Cooling} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1)$$ สมการที่ 5.22

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน

$$COP_{Heating} = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1)$$ สมการที่ 5.23

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน หรือ Energy Efficiency Ratio (EER) คือ ตัวแปรที่ใช้แสดงสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นเช่นเดียวกับ COP รวมทั้งมีนิยามเหมือนกัน แต่ค่า EER จะคิด

พลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ (Input) เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น ไม่นำพลังงานความร้อนมาคิดรวมด้วย อนึ่ง พลังงานไฟฟ้าถือเป็นพลังงานคุณภาพสูง ต้องผ่านกระบวนการผลิตและผ่านระบบจ่ายไฟฟ้าหลายขั้นตอน ก่อนจะกลายมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการนำพลังงานความร้อนที่ออกจากระบบ (Output) ที่มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] มาส่วนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] (kW_e) จะทำให้ EER มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] ต่อกิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] (kW_{th}/kW_e) เพื่อบ่งบอกถึงระดับคุณภาพพลังงานที่ต่างกัน

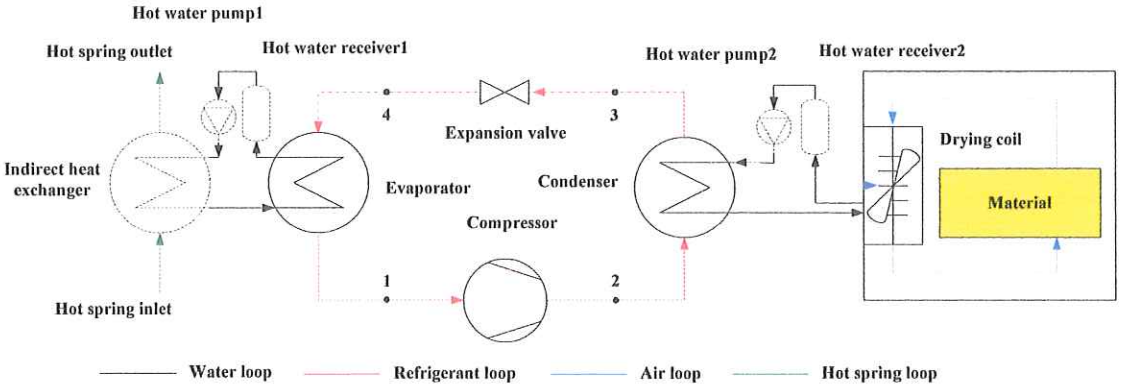
ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานระบบทำความเย็น

$$EER_{Cooling} = Q_E / W_{Comp}$$ สมการที่ 5.24

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานระบบระบบปั๊มความร้อน

$$EER_{Heating} = Q_C / W_{Comp}$$ สมการที่ 5.25

การเพิ่มคุณภาพน้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำโดยเทคโนโลยีปั๊มความร้อนแบบอัดไอหรือ Geothermal Heat Pump (GHP) สำหรับห้องอบแห้งเป็นกระบวนการผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิเหมาะสมสำหรับการอบแห้งในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิลมร้อนที่ผลิตได้นี้ จะเป็นผลโดยตรงจากการเลือกสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ดังนั้นการจำลองการทำงานของระบบโดยการอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ จึงเป็นกระบวนการแก้ปัญหาที่รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด



รูปที่ 5.19 แผนภาพห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ [Nattaporn et al., 2014]

5.3.2 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน

รูปที่ 5.20 แสดงระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอชั้นเดียว [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552] ที่ใช้สารทำงานในระบบ คือ R-123 โดยระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอรับพลังงานความร้อนจากน้ำพุร้อนอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส จากแหล่งน้ำพุร้อนห้วยหมากเหลี่ยม อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย มาผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส และจ่ายให้แก่ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ขนาด 3.3 เมตร x 4.8 เมตร x 3.2 เมตร ที่มีความจุประมาณ 3 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยผลการทดสอบพบว่า ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอสามารถจ่ายลมร้อนให้แก่ห้องอบได้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของห้องอบแห้งประมาณ 2.68 กิโลวัตต์ [ความร้อน] ต่อกิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] และมีความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์สามารถคืนทุนภายใน 16 เดือน



รูปที่ 5.20 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอชั้นเดียว [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552]

รูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 แสดงห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ระบบระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอสองชั้น [ฟองสวาท และคณะ, 2552] ณ แหล่งน้ำพุร้อนโป่งลำปาง อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย โดยใช้น้ำพุร้อนอุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส มาเพิ่มคุณภาพน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และจ่ายลมร้อนอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส ให้แก่ห้องอบขนาด 2.4 เมตร x 4.8 เมตร x 2.3 เมตร ความจุ 2 ตัน จากผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของห้องอบมีค่า 2.93 กิโลวัตต์ [ความร้อน] ต่อกิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] โดยห้องอบดังกล่าวมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 78 เดือน



รูปที่ 5.21 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอชั้นเดียว [นัฐพร และชัชวาลย์, 2552]



รูปที่ 5.22 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอสองชั้น [ฟองสวาท และคณะ, 2552]



รูปที่ 5.23 ห้องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอสองชั้น [ฟองสวาท และคณะ, 2552]

บทที่ 6
พลังงานความร้อนใต้พิภพในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นมีหลายประเภท เช่น ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor compression system) ระบบทำความเย็นแบบกักเก็บน้ำแข็ง (Ice storage system) และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) เป็นต้น ในปัจจุบันระบบทำความเย็นแบบอัดไอเป็นระบบที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ซึ่งพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานสิ้นเปลือง มีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคตอันใกล้ ทำให้ระบบทำความเย็นที่ใช้พลังงานทางเลือกได้รับความสนใจมากขึ้น โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นเทคโนโลยีการนำพลังงานทางเลือกในรูปแบบความร้อนมาใช้ขับเคลื่อนระบบ รวมทั้งลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการดูดกลืนระหว่างของไหล 2 ชนิด คือ ของไหลในสถานะก๊าซหรือตัวถูกดูดกลืน (Absorbate) และของไหลในสถานะของเหลวหรือตัวดูดกลืน (Absorbent) กระบวนการดูดกลืน (Absorption process) เกิดขึ้นโดยสารละลายดูดกลืนตัวถูกดูดกลืนในสถานะของเหลว และมีการคายความร้อนส่วนหนึ่งออกสู่สิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีแบบดูดกลืนเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปั๊มความร้อนแบบดูดกลืน (Absorption Heat Pump, AHP) ซึ่งปั๊มความร้อนแบบดูดกลืนมี 2 ประเภท คือ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Type I Absorption refrigerator/Absorption chiller) และตัวแปลงความร้อน (Type II Absorption Heat Transformer, AHT) [นัฐพร, 2560]

6.1 หลักการของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

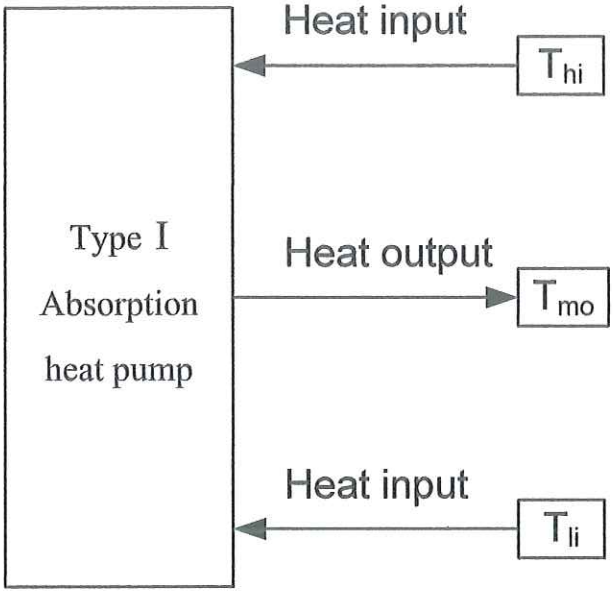
ระบบปั๊มความร้อนแบบดูดกลืนมีลักษณะคล้ายกับระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ คือ มีเครื่องควบแน่น เครื่องระเหย และมีสารทำงานที่สามารถกลายเป็นไอได้ที่ความดันต่ำภายในตัวเครื่องระเหย

ข้อแตกต่างหลักระหว่างปั๊มความร้อนแบบดูดกลืนกับปั๊มความร้อนแบบอัดไอมีอยู่ 2 ประการ คือ

ก. ใช้เจนเนอเรเตอร์และเครื่องระเหยทำหน้าที่ให้สารทำงานกลายเป็นไอ ไหลในวัฏจักรแทนการใช้เครื่องอัดไอของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ข. พลังงานที่ใช้ในเจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ต่างจากเครื่องอัดไอที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานกลในระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ปั๊มความร้อนแบบดูดกลืนประเภทที่ 1 หรือระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มีหลักการขับเคลื่อนด้านความร้อนดังแสดงในรูปที่ 6.1 คือ ความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าสู่ระบบ และทำให้เกิดการดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Cooling) พร้อมทั้งการคายความร้อนออกสู่ภายนอกที่อุณหภูมิปานกลาง (Condensing) ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งด้านความเย็นและด้านความร้อน การใช้ประโยชน์ด้านความเย็น เช่น ห้องเย็น ห้องปรับอากาศ เป็นต้น ส่วนการใช้ประโยชน์ด้านความร้อนนั้นไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก เนื่องจากความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงทำให้ใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก



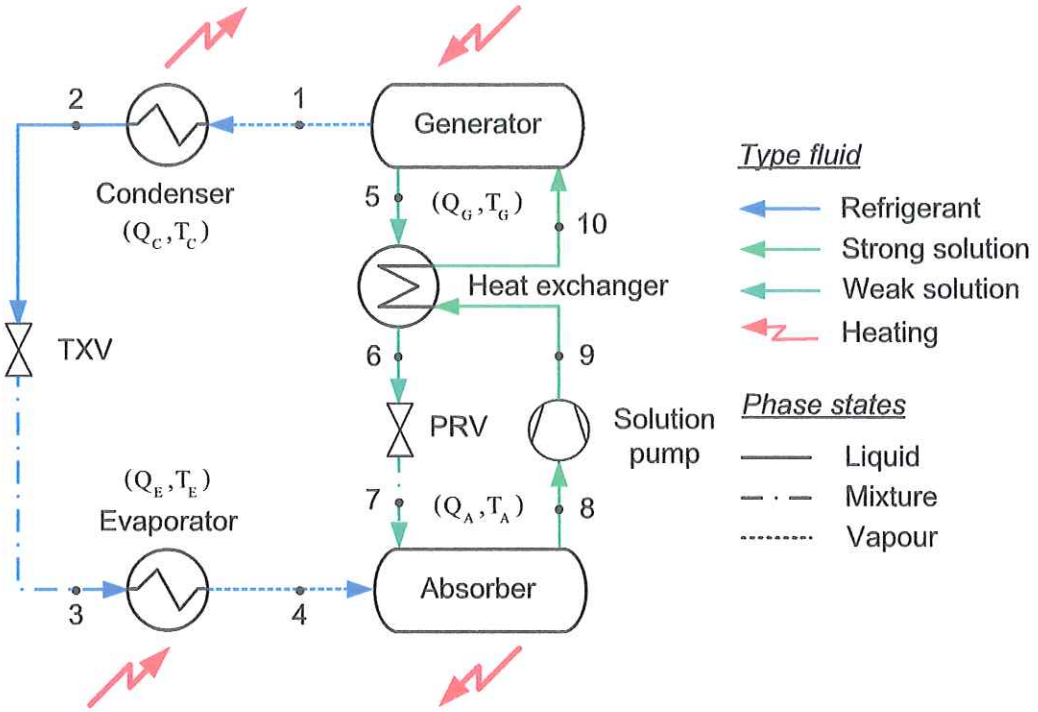
รูปที่ 6.1 การขับเคลื่อนด้านความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร, 2560]

กระบวนการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแสดงในรูปที่ 6.2 คือ ความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลาย สารทำงานหรือตัวถูกดูดกลืนที่มีจุดเดือดต่ำกว่าตัวดูดกลืนจะระเหยกลายเป็นไอ และไหลออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสารทำงานดังกล่าวที่ระเหยออกไปนั้น ระบบที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย-น้ำจะมีความเข้มข้นสารทำงานไม่บริสุทธิ์ (น้ำระเหยปะปนไปกับไอแอมโมเนีย) ซึ่งปั๊มความร้อนแบบดูดกลืนต้องการสารทำงานความเข้มข้นสูงผ่านเข้าสู่เครื่องระเหย ดังนั้นในระบบทำความเย็นที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นจากระบบทั่วไป คือ อนาไลเซอร์ (Analyzer) และเรคติไฟเออร์ (Rectifier) ทำหน้าที่ดักไอน้ำที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ โดยทำให้ไอน้ำดังกล่าวควบแน่นแล้วไหลกลับเข้ามายังเจนเนอเรเตอร์

ไอสารทำงานที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1) ไหลเข้าไปยังเครื่องควบแน่น แล้วควบแน่นกลายเป็นสารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2) ที่ความดันสูง จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดันเพื่อลดความดันและอุณหภูมิ (Thermostatic Expansion Valve, TXV) (จุดที่ 3) เข้าไปในเครื่องระเหยเพื่อรับภาระความร้อน ทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหยกลายเป็นไอ (จุดที่ 4) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์ ซึ่งสารทำงานสถานะไอดังกล่าวจะถูกดูดกลืนรวมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง สารละลายดังกล่าว (จุดที่ 8) จะถูกส่งไปยังเจนเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลายผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 9) อนึ่งภายในเจนเนอเรเตอร์ สารทำงานในสารละลายระเหยกลายเป็นไอทำให้เหลือสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายังแอบซอร์พเบอร์ (จุดที่ 5) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลายเข้มข้นสูงใน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 6) จากนั้นจะผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure release valve, PRV) (จุดที่ 7) แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบ่งเป็น 2 ช่วงความดัน คือ แอบซอร์พเบอร์และเครื่องระเหยจะทำงานที่ความดันต่ำ ส่วนเจนเนอเรเตอร์และเครื่องควบแน่นทำงานที่ความดันสูง ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่เครื่องระเหย (T_E) อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่เจนเนอเรเตอร์ (T_G) และมีอุณหภูมิรองลงมาอยู่ที่แอบซอร์พเบอร์ (T_A) และเครื่องควบแน่น (T_C)



รูปที่ 6.2 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร, 2560]

สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พิจารณาจากสมการสมดุลพลังงาน สมดุลมวลและสมดุลความเข้มข้น ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

- เจนเนอเรเตอร์ (Generator)

$$Q_G = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_{10} h_{10} \qquad \text{สมการที่ 6.1}$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_1 + \dot{m}_5 \qquad \text{สมการที่ 6.2}$$

น้ำ-ลิเธียมโบรไมด์

$$\dot{m}_{10} X_{10} = \dot{m}_5 X_5, (X_1 = 0)\ X = \%LiBr \qquad \text{สมการที่ 6.3}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_1 X_{10} / (X_5 - X_{10}), (X_5 > X_{10}) \qquad \text{สมการที่ 6.4}$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_1 X_5 / (X_5 - X_{10}), (X_5 > X_{10}) \qquad \text{สมการที่ 6.5}$$

แอมโมเนีย-น้ำ

$$\dot{m}_{10} X_{10} = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_5 X_5,\ X = \%\text{Ammonia} \qquad \text{สมการที่ 6.6}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_1 (X_1 - X_{10}) / (X_{10} - X_5),\ (X_1 > X_{10} > X_5) \qquad \text{สมการที่ 6.7}$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_1 (X_1 - X_5) / (X_{10} - X_5),\ (X_1 > X_{10} > X_5) \qquad \text{สมการที่ 6.8}$$

- เครื่องควบแน่น (Condenser)

$$Q_C = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_2) \qquad \text{สมการที่ 6.9}$$

$$\dot{m}_{ref} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \qquad \text{สมการที่ 6.10}$$

- ปั๊มสารละลาย (Solution pump)

$$W_{SP} = (P_H - P_L) v_8 \dot{m}_8 / \eta_{SP} \qquad \text{สมการที่ 6.11}$$

ทั้งนี้ความดัน (P) ในสมการดังกล่าวมีหน่วยเป็น kPa

$$s_8 = s_9 \qquad \text{สมการที่ 6.12}$$

- เครื่องระเหย (Evaporator)

$$Q_E = \dot{m}_{ref}(h_4 - h_3) \qquad \text{สมการที่ 6.13}$$

- แอบซอร์พเบอร์ (Absorber)

$$Q_A = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8 \qquad \text{สมการที่ 6.14}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \qquad \text{สมการที่ 6.15}$$

น้ำ-ลิเธียมโบรไมด์

$$\dot{m}_8 X_8 = \dot{m}_7 X_7 \qquad \text{สมการที่ 6.16}$$

แอมโมเนีย-น้ำ

$$\dot{m}_8 X_8 = \dot{m}_4 X_4 + \dot{m}_7 X_7 \qquad \text{สมการที่ 6.17}$$

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

$$Q_{HX,max} = (\dot{m}Cp)_{min}(T_5 - T_9) = (\dot{m}Cp)_{min} \Delta T_i \qquad \text{สมการที่ 6.18}$$

$$\varepsilon_{HX} = Q_{HX,actual} / Q_{HX,max} \qquad \text{สมการที่ 6.19}$$

$$Q_{HX,actual} = \dot{m}_5 Cp_5 (T_5 - T_6) = \dot{m}_9 Cp_9 (T_{10} - T_9) \qquad \text{สมการที่ 6.20}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \qquad \text{สมการที่ 6.21}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 \qquad \text{สมการที่ 6.22}$$

- วาล์วลดความดัน (Expansion valve)

$$h_7 = h_6 \text{ (Assumed to be throttling process)} \qquad \text{สมการที่ 6.23}$$

$$h_2 = h_3 \text{ (Assumed to be throttling process)} \qquad \text{สมการที่ 6.24}$$

- อัตราส่วนการไหล (Flow Ratio, FR)

อัตราส่วนการไหล หรือ ค่า FR คือ ตัวแปรที่ใช้กำหนดอัตราการไหลของของไหลในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยค่าอัตราส่วนการไหลสูง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่เจน

เนอเรเตอร์ (Q_G) มีปริมาณน้อยหรือมีอุณหภูมิต่ำ ($T_{G,i}$) ระบบไม่สามารถผลิตไอสารทำงาน ($\dot{m}_{ref}$) เพื่อทำความเย็นที่เครื่องระเหยได้ ทั้งนี้ค่า FR มักใช้เป็นตัวแปรในการเลือกจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบ ร่วมกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่จ่ายให้แก่เจนเนอเรเตอร์ สำหรับการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$FR = \dot{m}_g / \dot{m}_{ref} \qquad \text{สมการที่ 6.25}$$

- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP)

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ หรือ ค่า COP คือ ตัวแปรที่ใช้แสดงสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็น ซึ่งระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Vapor compression heat pump) มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 100 ดังนั้นค่า COP จึงถูกนิยามขึ้นมาเพื่อบอกสมรรถนะการทำงานของระบบทั้งสอง โดยเป็นสัดส่วนค่าพลังงานที่ได้จากระบบหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] ส่วนด้วยพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] ดังนั้นค่า COP เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วย

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การนิยามค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน จึงใช้นิยามเดียวกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนใช้ประโยชน์จากการดึงความร้อนออกจากอากาศภายในห้องหรือน้ำเย็นที่เครื่องระเหย (Q_E) และรับพลังงานความร้อนที่เจนเนอเรเตอร์ (Q_G) และต้องการพลังงานกลสำหรับขับเคลื่อนปั๊มสารละลาย (W_{SP}) โดยสามารถแสดงค่า COP ได้ดังสมการด้านล่าง ทั้งนี้ค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าไม่เกิน 1 แตกต่างจากระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่มีค่า COP มากกว่า 2 โดยประมาณ

$$COP_{AB} = Q_E / (Q_G + W_{SP}) \qquad \text{สมการที่ 6.26}$$

- ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER)

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน หรือ ค่า EER คือ ตัวแปรที่ใช้แสดงสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นเช่นเดียวกับ COP แต่ค่า EER จะคิดพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ (Input) เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น ไม่นำพลังงานความร้อนมาคิดรวม หารด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ระบบมีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] ดังนั้น EER จะมีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ [ความร้อน] ต่อกิโลวัตต์ [ไฟฟ้า] เพื่อบ่งบอกถึงระดับคุณภาพพลังงานที่ต่างกัน

$$EER_{AB} = Q_E / W_{SP} \qquad \text{สมการที่ 6.27}$$

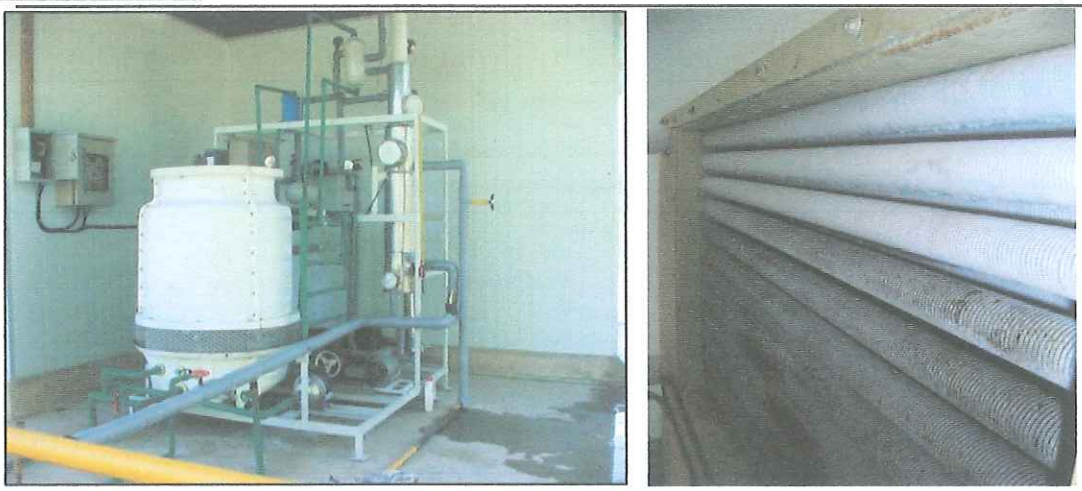
6.2 การประยุกต์เทคโนโลยีสู่ชุมชน

ชัชวาลย์ และนัฐพร (2548) และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2548) ได้ทำการศึกษาการนำน้ำพุร้อนมาใช้ประโยชน์กับห้องเย็นและห้องอบแห้ง ณ แหล่งน้ำพุร้อนป่าตึง ตำบลป่าตึง อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย โดยห้องเย็นใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสำหรับเก็บพืชผลทางการเกษตร ใช้น้ำพุร้อนที่ได้จากการขุดเจาะความลึกของหลุมเจาะลงไปในผิวดิน 56 เมตร อัตราการไหลของน้ำพุร้อนประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีอุณหภูมิน้ำพุร้อนที่ผิวดินประมาณ 98 องศาเซลเซียส

ห้องเย็นที่ได้ทำการออกแบบและก่อสร้างมีขนาด 3.6 เมตร x 3.6 เมตร x 3.0 เมตร ผนังและเพดานทำจากฉนวนกันความร้อนหนา 4 นิ้ว ขนาดความจุของห้อง 5 ตัน ความสามารถในการทำความเย็นอยู่ที่ประมาณ 2.5 ตันความเย็น ห้องเย็นใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้สารทำงานในระบบ คือ สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ และสามารถทำอุณหภูมิได้ต่ำสุดประมาณ -5 องศาเซลเซียส โดยห้องเย็นระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแสดงดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 ห้องเย็นระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนและห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ [นัฐพร, 2560]



ก) ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ข) คอยล์เย็นภายในห้องเย็น

รูปที่ 6.4 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ [นัฐพร และชัชวาลย์, 2548]

โครงการ การผลิตไฟฟ้าร่วมกับการทำความเย็นและความร้อนแบบขั้นบันไดจากพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย [นัฐพร และคณะ, 2560] นำความร้อนจากแหล่งน้ำพุร้อนสันกำแพง มาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความเย็นจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาด 5 ตันความเย็น ที่ใช้สารทำงานในระบบคือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (Water-LiBr) เพื่อผลิตน้ำเย็นอุณหภูมิในช่วง 10-15 องศาเซลเซียส ดังแสดงลักษณะโดยรวมของต้นแบบเมื่อสร้างแล้วเสร็จในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ต้นแบบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน [นัฐพร และคณะ, 2560]

บรรณานุกรม

กรมทรัพยากรธรณี. **แผนที่แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย**, ออนไลน์: www.dmr.go.th, เข้าถึงเมื่อ: 1 สิงหาคม 2556.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. **แผนปฏิบัติการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579**, ออนไลน์: http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan_Final.pdf, เข้าถึงเมื่อ: 13 เมษายน 2561.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. **โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ**, ออนไลน์: www.egat.co.th, เข้าถึงเมื่อ: 1 สิงหาคม 2556.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. **โครงการเอนกประสงค์พลังงานความร้อนใต้พิภพ อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่**, 2531.

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **อัตราค่าไฟฟ้า**, ออนไลน์: http://www.pea.co.th/, เข้าถึงเมื่อ: 1 สิงหาคม 2556.

คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. **การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา,** 2556.

ชัชวาลย์ ชัยชนะ และนัฐพร ไชยญาติ. การนำน้ำพุร้อนมาประยุกต์ใช้กับห้องเย็นและห้องอบแห้ง, **วารสารโลกพลังงาน, ฉบับที่ 31,** หน้า 36-40, 2548.

ชัชวาลย์ ชัยชนะ และนัฐพร ไชยญาติ. การผันพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า, **วารสารโลกพลังงาน, ฉบับที่ 33**, 2549.

ชัชวาลย์ ชัยชนะ และนัฐพร ไชยญาติ. สารทำงานสำหรับปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งความร้อน (Working Fluid Selection for Geothermal Heat Pump), **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ฉบับที่ 13**, 2549.

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, นัฐพร ไชยญาติ และวาสนา คำโอภาส. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการเพิ่มคุณภาพความร้อนแสงอาทิตย์อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ปั๊มความร้อนแบบอัดไอและแบบดูดกลืนในรูปแบบคาสเคด (Upgrading of Low Temperature Solar Heat with Cascade Vapor Compression and Absorption Heat Pumps)**, เสนอต่อ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2555, 2555.

ธนาคารกรุงไทย. **อัตราดอกเบี้ยเงินกู้**, ออนไลน์: http://www.ktb.co.th, เข้าถึงเมื่อ: 1 สิงหาคม 2556.

นัฐพร ไชยญาติ. **การออกแบบและสร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้ไอเสียจากเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ (Design and Construction of an Absorption Chiller Powered by Exhaust gas from Biogas Electricity Generator)**, วิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.

นัฐพร ไชยญาติ. **เทคโนโลยีพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy Technology)**, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2560, 386 หน้า.

นัฐพร ไชยญาติ และชัชวาลย์ ชัยชนะ. การออกแบบและสร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้ไอเสียจากเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ (Design and Construction of an Absorption Chiller Powered Using Exhaust from Biogas Electricity Generator). **บทความวิจัยใน Proceedings สืบเนื่องจากการประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1**, หน้า 109-116, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 15-16 ธันวาคม 2551.

นัฐพร ไชยญาติ และชัชวาลย์ ชัยชนะ. ห้องอบแห้งพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Drying Room from Geothermal Energy), **บทความวิจัยใน Proceedings สืบเนื่องจากการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 8**, เชียงราย, ประเทศไทย, 12-13 มีนาคม 2552.

นัฐพร ไชยญาติ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และณัฐพล ไชยแก้ว. การศึกษาระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบกักเก็บน้ำแข็ง (Study of an Absorption Chiller Using Solar Energy Combined with Ice Storage System), **บทความวิจัยใน Proceedings สืบเนื่องจากการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 12**, หน้า 68-75, เชียงราย, ประเทศไทย, 14-15 มีนาคม 2556.

นัฐพร ไชยญาติ, ชวโรจน์ ใจสิน, วรรษมล เลิศจตุรานนท์ และอัญชลี สายเขียว. **โครงการ การผลิตไฟฟ้าร่วมกับการทำความเย็นและความร้อนแบบขั้นบันไดจากพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย**, 2560.

ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวราพันธ์, ชัชวาล ชัยชนะ, สราวุธ จันทรประเสริฐ, ศตวรรษ แสนทน, อมรินทร์ บุญตัน, นัฐพร ไชยญาติ, เอกจำเริญ จันทร์ดี, บุญญสิทธิ์ คิ้วดวงตา, ปิยนุช โพธิเกิด และศุภรัตน์ ศรีล. **รายงานฉบับสมบูรณ์ งานพัฒนาแหล่งน้ำพุร้อนกลุ่มที่มีศักยภาพต่ำโดยใช้เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อทำห้องอบแห้งสำหรับพืชผลทางการเกษตร**, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551.

ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวราพันธ์, สราวุธ จันทรประเสริฐ, วีระพันธ์ ศรีจันทร์, ศตวรรษ แสนทน, สัมพันธ์ สิงหราชวราพันธ์, วงษ์เทพ ตั้งศิริกุล, ชัชวาล ชัยชนะ, พิเชษฐ์ แก้วสมวาง, บุญญสิทธิ์ คิ้วดวงตา, อมรินทร์ บุญตัน, นัฐพร ไชยญาติ, ปิยนุช โพธิเกิด, ศุภรัตน์ ศรีล และดรุณี คุณยศยิ่ง. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาเพื่อการอนุรักษ์และพัฒนาแหล่งน้ำพุร้อนเพื่อการใช้ประโยชน์อเนกประสงค์สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล**, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เสนอต่อ สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2552.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาแหล่งน้ำพุร้อนแม่จัน จังหวัดเชียงราย**, เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการประเมินติดตามโครงการพัฒนาแหล่งน้ำพุร้อนแม่จัน จังหวัดเชียงราย**, เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย**, เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบริษัทเทคนิคคอล เอ็นเนอจิ คอนซัลแท็นท์ จำกัด. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาศักยภาพพลังงานรูปแบบใหม่ของประเทศ**, เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **ทฤษฎีพลังงานความร้อนใต้พิภพ**, ออนไลน์: http://teenet.cmu.ac.th/sci/intro01.php#03, เข้าถึงเมื่อ: 14 เมษายน 2557.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. **บทเรียนบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต เรื่องการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม หัวข้อ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง**, ออนไลน์: http://mte.kmutt.ac.th/elearning, เข้าถึงเมื่อ: 14 เมษายน 2557.

รักชาติ ไตรผล. **เทอร์โมไดนามิกส์เคมี (Chemical Thermodynamics)**, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, ออนไลน์: http://www.atom.rmutphysics.com/physics/oldfront/86/Thermo1/index.htm, เข้าถึงเมื่อ: 1 กันยายน 2557.

สุจิตร พิตรากูล และพินิจ กุลสิงห์. **รายงานวิจัย การเกิดน้ำพุร้อนและความน่าจะมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ณ บ้านโป่งกุ่ม ตำบลป่าเมี่ยง, อำเภอดอยสะเก็ดและบ้านโป่งฮ่อม ตำบลบ้านสหกรณ์ อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่**, เสนอต่อสำนักสภาวิจัยแห่งชาติ, 2522.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **เทคโนโลยีการบ่มใบยาสูบแบบประหยัดพลังงาน**, ออนไลน์: http://www.erdi.cmu.ac.th/index.php/article/124?category=15, เข้าถึงเมื่อ: 29 กรกฎาคม 2558.

สำนักงานวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ จังหวัดแม่ฮ่องสอน**, เสนอต่อสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2546.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. **มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมธรรมชาติประเภทโป่งพุร้อน**, กองอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมธรรมชาติและศิลปกรรม, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. **แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579**, ออนไลน์: http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/PDP_TH.pdf, เข้าถึงเมื่อ: 30 พฤษภาคม 2561.

อดิศักดิ์ คงคำ และ นัฐพร ไชยญาติ. การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กรณีศึกษา กิจการของน้ำพุร้อนสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ (Study of Potential Electricity Generation by Organic Rankine Cycle Case Study of Sankampaeng Hot Springs, Chiang Mai Province). **บทความวิจัยใน Proceedings สืบเนื่องจากการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12**, หน้า 1194-1201, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 8-10 มิถุนายน 2559.

อนิรุทธ์ กันทะวัง, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ, นัฐพร ไชยญาติ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การศึกษาสมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล (Performance Study of an Absorption Chiller Using Solar Energy Combined with Biomass Energy), **บทความวิจัยใน Proceedings สืบเนื่องจากการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 11**, หน้า 235-239, จันทบุรี, ประเทศไทย, 8-9 มีนาคม 2555.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). **Refrigerants**, Atlanta, America, 2009.

Antonio Yock. Geothermometers, **In: Proceeding of Seminar on Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources**, El Salvador, 17-30 October 2009.

California Energy Commission. **Geysers**, Online: http://www.energy.ca.gov/tour/geysers/, Accessed: 11 April 2018.

Christopher Bromley. Sustainable and Environmentally-Sound Development Strategies Addressed Through International Collaboration, **World Geothermal Congress**, 2015.

Christoph Clauser. **Geothermal Energy**, Online: https://www.researchgate.net/publication/313164879_Geothermal_Energy, Accessed: 12 April 2018.

ClimateCare. **The World's 10 Biggest Geothermal Energy Plants**, Online: https://www.researchgate.net/publication/313164879_Geothermal_Energy, Accessed: 12 April 2018.

Fardaneh Ravazdezh. **A Study on Operation and Maintenance of Flash Steam Geothermal Power Plants: Reykjanes Power Plant**, Online: https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2015-31.pdf, Accessed: 13 April 2018.

Feuerecker, G. Scharfe, J. Greiter, I. Frank, C. and Alfeld, G. Measurement of thermophysical properties of LiBr-solutions at high temperatures and concentrations, **In: Proceeding of Seminar on International Absorption Heat Pump Conference ASME**, Vol.31, pp.493-499, 1993.

Graham Walker. **Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide Hardcover**, Hemisphere Pub L. Corp. Washington Dc, 1982.

Geotermica Italiana, **Final Report; Geothermal Reconnaissance Survey of Northern Thailand**, Pisa, Italy, 104 pp, 1984.

Geothermal Resources. **Hot dry rock geothermal energy**, Online: http://www.geothermal-resources.com.au/exploration.html, Accessed: 1 August 2013.

Geothermal Resources Council. **Indonesia: 110 MW Sarulla Geothermal Power Plant Unit I Starts Operations**, Online: http://geothermalresourcescouncil.blogspot.com/2017/03/indonesia-sarulla-geothermal_22.html, Accessed: 13 April 2018.

Gershon Grossman and Elizabeth Michelson. **Absorption heat pump simulation and studies**, U.S. Department of Energy, America, 1986.

Industrial Technology Research Institute. **ORC Design and Development in Taiwan**, Green Energy and Environment Research Lab Natural Resources Technology Division ORC Team, Taiwan, 2012.

Kaita, Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures, **International Journal of Refrigeration**, Vol.24, pp.374-390, 2000.

Keith, E. Herold, R.R. and Sanford, A.K. **Absorption Chillers and Heat Pumps**, America, 1996.

Khairulin, R.A. Gruzdev, V.A. Stankus, S.V. and Verba, O.I. Experimental study of the density of aqueous solutions of lithium bromide at temperature of up to 250 °C in the range of mass concentrations from 30 to 65 %. **Thermophysics and Aeromechanics**, Vol.13, pp.575-583, 2006.

Mahmut Parlaktuna. **Introduction to Geothermal Reservoir Engineering Electricity Generation**, Online: http://slideplayer.com/slide/5749617/, Accessed: 12 April 2018.

NIST (National Institute of Standards and Technology), Inc. (Refprop Version 10: Customer Number 40754). **Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Software**, America, 2018.

Nattaporn Chaiyat. Assessment Alternative Energy for Organic Rankine Cycle Power Plant in Thailand, **International Journal of Engineering and Technology**, Vol.7, Issue 1, pp.317-326. January 2015.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Improvement of an Absorption Heat Transformer Combined with Propane Vapor Compression Heat Pump in Industrial Process, **In: Proceeding of Seminar on International Conference on Green & Sustainable Innovation 1st**, Chiang Rai, Thailand, 2-4 December 2009.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Upgrading of Low Temperature Solar Heat for Medium Temperature Applications by a Solar-Absorption Heat Transformer Assisting with a Vapor Compression Heat Pump, **In: Proceeding of Seminar on International Symposium on Low Carbon & Renewable Energy Technology (ISLCT2010)**, pp.150, Korea, 15-18 November 2010.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Experimental Study and a Simplified Model of a 10 kW_{th} Solar-Absorption Heat Transformer, **In: Proceeding of Seminar on National Symposium on Heat Transformer, Heat and Mass Transfer in Thermal Equipments 10th**, Chiang Mai, Thailand, 10-11 March 2011.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Improvement of an Absorption Heat Transformer Performance for Upgrading Low Temperature Heat by Coupling with a Vapor Compression Heat Pump, **Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, Vol.10**, No.2, pp.314-333, 2011.

Nattaporn Chaiyat. **Performance Analysis of an Absorption Heat Transformer with Assisted Vapor Compression Heat Pump**, Doctor of Philosophy in Energy Engineering, Department of Engineering, Chiang Mai University, 2011.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Simulation and experimental study of solar-absorption heat transformer integrating with two-stage high temperature vapor compression heat pump, **Case Studies in Thermal Engineering**, Vol.4, pp.166-174, November 2014.

Nattaporn Chaiyat, Chatchawan Chaychana and Fongsaward S Singharajwarapan. Geothermal Energy Potentials and Technologies in Thailand, **Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications**, Vol.4, Issue.2 (139), 2014.

Nattaporn Chaiyat. Upgrading of Low Temperature Heat with Absorption Heat Transformer for Generating Electricity by Organic Rankine Cycle, **Global Advanced Research Journal of Engineering**, Technology and Innovation, Vol.3(9), pp. 235-247, November, 2014.

Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat Kiatsiriroat. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, **Energy**, Vol.91, pp.363-370. November 2015.

Pers. comm, Ormat Technologies, Inc. **ORC Power Plant**, 2013.

Ramingwong, T., Ratanasthien, B., Wattananikon, K., Tantisukit, C., Lerdthusanee, S., Thanasuthipitak, T., and Pitragool, S. **Phase I, Final Report on Geothermal Resources of Northern Thailand**, Submitted to Flectricity Generating Authority of Thailand, 244 pp, 1980.

Ramingwong, T., Ratanasthien, B., Tantisukrit, C., Thanasuthipitak, T., Lerdthusnee, S., and Wattananikorn, K. **1980-1981 Geochemical data of five highest potential geothermal systems in northern Thailand, Fang, San Kamphaeng, Mae Chan, Pa Pae and Mae Chaem**; Report submitted to EGAT, 88 p, 1985.

REUK-Renewable Energy UK. **Larderello Worlds First Geothermal Power Station**. Online: http://www.reuk.co.uk/wordpress/geothermal/larderello-worlds-first-geothermal-power-station/, Accessed: 12 April 2018.

Steem STEM. **Renewable energy : How Geothermal Energy Works**. Online: https://steemit.com/steemstem/@techlife/renewable-energy-how-geothermal-energy-works, Accessed: 12 April 2018

Sopitsuda Tongsopit and Chris Greacen. **Thailand's Renewable Energy Policy: FiTs and Opportunities for International Support**. WRI-ADB Workshop on Feed-in Tariffs, Manila, Phillippines, 2012.

Techno Service Commercial. **Phate Heat Exchanger**, Online: http://www.technoserviceco.com/index.htm, Accessed: 1 August 2013.

Thawonngamyingsaku, C. and Kiatsiriroat, T. Potential of a Solar Organic Rankine Cycle with Evacuated-Tube Solar Collectors as Heat Source for Power Generation in Thailand, Energy **Science and Technology**, Vol.4, No.2, pp.25-35, 2012.

The Engineering Toolbox. **Propylene Glycol based Heat-Transfer Fluids**, Online: http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html, Accessed: 1 August 2013.

Think Geoenergy. **Top 10 Geothermal Countries based on installed capacity – Year End 2017**, Online: http://www.thinkgeoenergy.com/top-10-geothermal-countries-based-on-installed-capacity-year-end-2017/, Accessed: 13 April 2018.

U.S. Geological Survey, **Inside the Earth**, Online: http://pubs.usgs.gov/publications/text/inside.html, Accessed: 1 May 2013.

U.S. Department of Energy, **Geothermal Technologies Office**, Online: http://www1.eere.energy.gov/geothermal/powerplants.html, Accessed: 1 September 2013.

Vanderschuren, J. and Delvvosalle, C. **Bed-to-Partical and Interparticle Heat Transfer in the Design of Fluidized Bed Dryers**, InDrying'82, Edited by Mujumdar, A.S., New York, International Science Publisher. pp 48-55, 1982.

บรรณานุกรมดัชนี

กระแสไฟฟ้า, 2
กังหัน, 35, 40, 42, 43, 44, 45, 46
ก๊าซธรรมชาติ, 3
การถ่ายเทความร้อน, 59
การพาความร้อน, 59
กาลักน้ำ, 31
กิจการน้ำพุร้อนสันกำแพง อำเภอแม่ออน ตาม พระราชดำริ จังหวัดเชียงใหม่, 51
แกนโลก, 3
แกรนิต, 13, 22
ขั้นบันได, 1, 2
คมนาคม, 13, 15, 19
ครีบระบายความร้อน, 68
ควอตซ์, 12
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ, 20, 22, 24
ค่าความชื้นฐานเปียก, 62
ค่าความชื้นฐานแห้ง, 62
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ, 76, 85
เครื่องกรองฝุ่นและหิน, 35
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, 35, 42, 43, 44
เครื่องควบแน่น, 42, 43, 44, 74, 76, 81, 83, 84
เครื่องแยกไอน้ำและของเหลว, 38
เครื่องระเหย, 74, 76, 81, 82, 84
เครื่องอัดไอ, 74, 76, 81
แคลเซียม, 12
จุดเดือด, 82
เจนเนอเรเตอร์, 82, 83, 85
ฉนวน, 65, 70
ชั้นเปลือกโลก, 3
ซัลเฟต, 15
ซิลิเกต, 3
ซีเมนต์, 25
โซเดียม, 12
ไซมา, 3
ไซอัล, 3
ตะแกรง, 66
ตัวดูดกลืน, 81, 82
ตัวถูกดูดกลืน, 81, 82
ตัวแปลงความร้อน, 2, 81
ท่อเหล็กดำ, 70
เทคโนโลยี, 73, 77
เทอร์โมไดนามิกส์, 4, 74, 75
เทอร์โมมิเตอร์, 65
น้ำพุร้อน, 1, 2, 4, 8, 13, 15, 19, 20, 44, 59, 68, 70, 71, 73, 77, 78, 86
นิกเกิล, 3
บะซอลต์, 3
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, 85
ใบพัด, 63, 68
ประสิทธิผล, 1, 44
ประสิทธิภาพ, 2
ปั๊ม, 42, 43, 44, 45, 46
ปั๊มความร้อนแบบดูดกลืน, 81, 82, 83
ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ, 2, 59, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 85
ปั๊มสารละลาย, 82, 84, 85
ผนังแจกลม, 63, 68
แผงแลกเปลี่ยนความร้อน, 63, 64, 68

พลังงานกล, 81, 85
พลังงานความร้อนใต้พิภพ, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 17, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 41, 47, 48, 63
พลังงานจลน์, 43, 75
พลังงานเชิงพาณิชย์, 1
พลังงานทดแทน, 1, 13, 17
พลังงานทางเลือก, 81
พลังงานศักย์, 43, 75
พืชผลทางการเกษตร, 18, 19, 63, 66, 71, 86, 90
โพแทสเซียม, 12
โพลีสไตรีน, 65
ฟอสซิล, 81
แมกนีเซียม, 3
แมกมา, 3
แมนเทิล, 3
แม่น้ำ, 2, 15
ยูรีเทน, 65
ระบบดักจับก๊าซ, 35, 38
ระบบทำความเย็นแบบกักเก็บน้ำแข็ง, 81
ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, 2, 81, 82, 85, 86, 87
ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ, 81, 85
ระยะเวลาคืนทุน, 79
เรคติไฟเออร์, 82
โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ, 38, 41, 47
โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบสองวงจรสารทำงาน, 40
โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอน้ำระเหยใหม่, 38, 39
โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพแบบไอแห้ง, 35, 36
วัฏจักรแรงคิน, 40, 42, 43, 45
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์, 2, 40, 41, 47, 48, 49, 50, 76
วาล์วลดความดัน, 74, 82, 83, 84
วิศวกรรม, 13
เศรษฐศาสตร์, 78
สนามไฟฟ้า, 40
สนามแม่เหล็ก, 40
สมการทางคณิตศาสตร์, 83
สมดุลความเข้มข้น, 83
สมดุลพลังงาน, 83
สมดุลมวล, 83
สารทำความเย็น, 40
สิ่งแวดล้อม, 48, 60, 81
หม้อต้ม, 42, 43, 44, 63
ห้องอบแห้ง, 18
ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์, 59, 64, 71, 73, 78
หอผึ่งระบายความร้อน, 35
หินตะกอน, 3
หินทราย, 3
เหล็ก, 3
แหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพ, 4, 12
อนาไลเซอร์, 82
อัตราการอบแห้ง, 60
อัตราส่วนการไหล, 85
อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ, 60
อัตราส่วนความชื้นสมดุล, 60
อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน, 77, 78, 79, 85
อินทรีย์, 40
อุณหภูมิกระเปาะเปียก, 60
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, 44, 47, 82, 84
เอนทัลปี, 74, 75
เอนโทรปี, 43

แอบซอร์พเบอร์, 82, 84
ไอเซนทรอปิก, 42, 43, 44, 45, 74, 75, 76

ผู้เรียบเรียง



รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2545 ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551 และได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2554 เข้ารับบรรจุในตำแหน่งอาจารย์ สังกัดวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในปี พ.ศ. 2556 ได้เข้าสู่ตำแหน่งทางวิชาการระดับ "ผู้ช่วยศาสตราจารย์" ในปี พ.ศ. 2557 และเข้าสู่ตำแหน่งทางวิชาการระดับ "รองศาสตราจารย์" ในปี พ.ศ. 2558