

การศึกษาปริมาตรและมวลของอากาศที่ส่งผลต่อระบบหมุนเวียน  
สารทำงานในแนวราบ

**A STUDY OF VOLUME AND AIR MASS THAT AFFECT THE WORKING  
FLUID CIRCULATING SYSTEM IN A HORIZONTAL PLANE**

พิชาญ มาศวรรณ<sup>1</sup> จิรวัดณ์ สิตรานนท์<sup>2</sup> กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์<sup>3</sup> และ กนกพร เกาะมัน<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,  
picharn.m@gmail.com

<sup>2,3</sup>อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,  
<sup>2</sup>jirawat\_si@rmutto.ac.th, <sup>3</sup>kittisak\_wi@rmutto.ac.th

<sup>4</sup>อาจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,  
kanokporn\_ko@rmutto.ac.th

Picharn Maswanna<sup>1</sup>, Jirawat Sitranon<sup>2</sup>, Kittisak Witinantakit<sup>3</sup> and Kanokporn Kohmun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Energy Technology, School of Engineering and  
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra  
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, picharn.m@gmail.com

<sup>2,3</sup>Lecturer, Department of Energy Technology, School of Engineering and  
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra  
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand,

<sup>2</sup>jirawat\_si@rmutto.ac.th, <sup>3</sup>kittisak\_wi@rmutto.ac.th

<sup>4</sup>Lecturer, Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Technology,  
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra  
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, kanokporn\_ko@rmutto.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนใน  
แนวราบโดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งอุณหภูมิในการผลิตไอน้ำนั้นมีค่า 115 °C โดยเป็นพลังงาน

ความร้อนต่ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความร้อนทั้งหมดไปในโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากแหล่งอื่น ๆ ตัวแปรที่ศึกษาคือปริมาตรถังขั้บตันจาก 19 L เป็น 98 L ทำให้มวลอากาศภายในถังขั้บตันเพิ่มขึ้นไปอีก 5.76 เท่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของถังขั้บตันมีอิทธิพลต่อความดันภายในถัง เนื่องจากอุณหภูมิของไหลผสม ( $T_{ig}$ ) ภายในถังขั้บตันจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยค่าสูงสุดจะมีค่า 87.2 °C โดยแปรผันตรงกับความดันภายในถังขั้บตันที่สูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 60.593 kPa และผลของความแตกต่างภายในถังขั้บตันก็เก็บความร้อนก็จะค่อย ๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาและรอบการทำงาน ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมในระบบ ดังนั้นเมื่อขนาดถังขั้บตันลดลง ปริมาณความร้อนสะสมของระบบและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบก็จะลดลงตามไปด้วยเช่นกัน

**คำสำคัญ:** ถังขั้บตัน, ประสิทธิภาพทางความร้อน, มวลอากาศ

### ABSTRACT

This research focused on the variables affecting the working fluid circulating system with thermal energy of the horizontal by using steam for working fluid. Temperature for boiling system is 115 °C which is low heat energy can be applied to general waste from industrial or other sources. By the way, the researcher has experimented by increased volume of pressure tank from 19 L to 98 L that mean air mass increased 5.76 time. The results of the experiment showed that volume of air inside pressure tank that increased has affected with pressure inside pressure tank because temperature of steam inside pressure tank will be increase too maximum temperature is 87.2 °C it will be directly proportional to the pressure inside pressure tank maximum pressure is 60.593 kPa and temperature difference inside the storage tank will a bit increased as time and circle of working fluid affected to quantity of heat accumulated in system. So, if volume of pressure tank decreased quantity of heat accumulated and thermal efficiency will be decrease as well.

**KEYWORDS:** pressure tank, thermal efficiency, air mass

### 1. บทนำ

ประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของทุกประเทศ การบริหารจัดการไฟฟ้าจึงเป็นนโยบายหลักของภาครัฐซึ่งแต่ละประเทศให้ความสำคัญ เพราะนั่นหมายถึง ‘ชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชน’ [1] ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างมากมายและต่อเนื่อง ซึ่งโรงงานแต่ละแห่งจำเป็นต้องซื้อไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตจากการไฟฟ้าในอัตราสูง ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับ

ค่าไฟฟ้าเดือนละหลายล้านบาท จึงจำเป็นต้องมีแนวคิดในการประหยัดพลังงานของโรงงาน นั่นคือ การลดการใช้พลังงานลง โดยการจัดการพลังงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดโดยไม่ทำให้กระบวนการผลิตลดลงและไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง [2] โดยทั่วไปแล้วในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารธุรกิจขนาดใหญ่ที่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการสูญเสียพลังงานทั้งในรูปของพลังงานความร้อนและพลังงานความเย็นสู่สิ่งแวดล้อมเสมอ พลังงานที่สูญเสียออกไปนี้มักเกิดขึ้นจากการเสียดทานเชิงกลภายในเครื่องจักรและนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่นั้นจัดว่าเป็นหนึ่งในวิธีการลดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย ในหลักการทั่วไปในการนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่นั้นจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศมีการแข่งขันกันค่อนข้างสูง ทำให้ต้องตระหนักถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยของผลิตผลและผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมใด ๆ ต้นทุนส่วนหนึ่งและอาจจะเป็นส่วนใหญ่นอกจากค่าแรงแล้วจะมาจากการใช้พลังงานอีกส่วนหนึ่ง [2] แต่ถ้ามีการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งเหล่านั้นกลับมาใช้ ประโยชน์ก็จะเป็นผลดีกับธุรกิจอุตสาหกรรมนั้น ๆ เนื่องจากประสิทธิภาพของพลังงานจะเพิ่มขึ้นแล้ว ยังจะส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนหน่วยผลิตอีกด้วย โดยทั่วไปความร้อนที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 100 °C ของทุกระบวนการไม่สามารถนำมาใช้กับวัฏจักรพลังงานความร้อนต่ำ (Low temperature power cycle) ได้ ซึ่งในการนำความร้อนทิ้งในลักษณะนี้กลับมาใช้นั้น ต้องพิจารณาถึงวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายศาสตร์ได้ [3] การส่งถ่ายความร้อนในการหมุนเวียนของไหลในระบบนั้นมีทั้งหมดเวียนในลักษณะแนวตั้งและแนวราบ ทั้งระบบปิดและระบบเปิด อีกทั้งการเลือกใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหล สารทำงานหรือความร้อน ย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน ซึ่งการส่งถ่ายความร้อนนิยมใช้ของไหลเป็นสารตัวกลางส่งถ่ายความร้อน (Thermal Fluids) โดยอาศัยหลักการของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ในกระบวนการผลิตเกือบทุกอุตสาหกรรมจะมีความร้อนทิ้งหลายรูปแบบทั้งความร้อนและความเย็น ทั้งลมร้อน น้ำร้อน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ซึ่งของเสียเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานอีกได้ หรือเรียกว่า Waste Heat Recovery ทั้งยังสามารถช่วยประหยัดต้นทุนด้านพลังงานได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นการนำความร้อนดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ ต้องใช้พลังงานเพื่อขับเคลื่อนสารทำงานให้เคลื่อนที่จากแหล่งความร้อนไปยังจุดที่ใช้งาน โดยส่วนมากในภาคอุตสาหกรรมจะใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อนสารทำงาน [4] การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Water Heat System: SWHS) ควบคุมไปกับบิ๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ในตัว ระบบที่ออกแบบนี้ประกอบด้วยตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 1.58 m<sup>2</sup> ถึงเก็บน้ำเหนือศีรษะที่ระดับบนสุด ถึงเก็บน้ำขนาดใหญ่ที่ไม่มีตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับล่าง และวาล์วทางเดียวสำหรับควบคุมการไหลเวียนของน้ำ ทดสอบหัวปล่อยขนาด 1 และ 2 m บิ๊มสามารถทำงานที่อุณหภูมิสะสมประมาณ 70-90 °C และแรงดัน

ไอน้ำ 10-18 kPa พบว่าการไหลเวียนของน้ำภายในระบบ อยู่ระหว่าง 15 ถึง 65 L/day ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงอาทิตย์และหัวปล่อย นอกจากนี้ อุณหภูมิน้ำสูงสุดในถังเก็บจะอยู่ที่ประมาณ 59 °C ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำสูงสุดต่อวันอยู่ที่ประมาณ 0.0017 % SWHS มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดต่อวันประมาณ 21 % สรุปได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ยกเว้นปั๊ม SWHS ใหม่ที่มีหัวปล่อย 1 m หรือต่ำกว่านั้นเหมาะสำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับปั๊มหมุนเวียน มีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ SWHS ในประเทศ [5] ปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบน้ำร้อนในระบบหมุนเวียนตามแรงดันคือการแลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายโอนความร้อนภายในถังเก็บความร้อนจะมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในถังเก็บความร้อน [6] ส่วนสำคัญของระบบปั๊มความร้อนที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ได้ทำการวิจัยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (ค่า U) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนน้ำโดยใช้ท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงขนาด 32A (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 mm) ที่ขดเป็นทองแดง ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงแบบขดกับท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงแบบเรียบ 32A ในเวลาเดียวกันได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน จากผลการวิจัยพบว่าค่า U ของท่อขดสูงกว่าท่อเรียบในการพาความร้อนตามธรรมชาติ 18 % และค่าการพาความร้อนแบบบังคับเพิ่มขึ้นถึง 19 % ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนกับท่อขดจะสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของท่อเรียบ [7] การพัฒนาปั๊มน้ำความร้อนพลังงานผสมผสาน สำหรับผลิตน้ำร้อนเป็น 2 ระบบ ระบบแรกใช้พลังงานจากแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ 2.1 m<sup>2</sup> ปริมาตรน้ำ 2.3 L ควบคู่กับพลังงานความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์ 2000 W ปริมาตรน้ำ 4.7 L ใช้ถังขั้บตันน้ำขนาดเล็ก 9.5 L ใช้น้ำในการหล่อเย็นโดยตรง 300 mm ระดับความสูงของการสูบน้ำ 1 และ 3 m โดยการเติมปริมาตรอากาศในถังขั้บตันน้ำ 10 % ระบบทำงานได้อัตโนมัติ พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบมี 2 ทาง ดังนั้นจึงต้องสมดุลพลังงานในช่วงการให้ความร้อนให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการในการขั้บตันน้ำภายในถังขั้บตันน้ำ มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากแหล่งความร้อนทั้ง 2 ที่ป้อนเข้าระบบ [8] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ถังให้ความร้อนขนาด 0.4 x 0.4 m สูง 0.3 m ปริมาตร 48 L หุ้มด้วยฉนวนทำจากยางสังเคราะห์ อุณหภูมิถึงผลิตไอน้ำร้อน 2 ค่าควบคุมไว้ที่ 110 °C และ 115 °C โดยให้ปริมาณอากาศในถังขั้บตันคงที่เข้าถึงขั้บตันที่มีอากาศอยู่ภายใน ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในถังผลิตไอน้ำร้อน ซึ่งอากาศอยู่ภายในถังจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น สภาวะของอากาศที่ได้รับความร้อนจากน้ำร้อนทำให้เกิดความดันสูงขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิและความดันยังคงสูงกว่าความดันในถังผลิตไอน้ำร้อน ทำให้น้ำสามารถหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนได้ เมื่อน้ำเย็นเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนจะทำให้อุณหภูมิของถังผลิตไอน้ำร้อนเกิดภาวะสูญญากาศ ทำให้อากาศในถังผลิตไอน้ำร้อนสามารถดูดน้ำกลับเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนได้ครบรอบการทำงานและเริ่มต้นทำงานในรอบถัดไป

การหมุนเวียนน้ำได้ปริมาตรน้ำต่อรอบที่สุดคืออุณหภูมิ 115 °C การหมุนเวียนสูบน้ำได้สูงสุด 25 รอบ การใช้ปริมาณความร้อนมีค่า 2.656 MJ และประสิทธิภาพความร้อนของระบบ 25.45% [3] ปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องต้นแบบปั๊มสูบน้ำอาศัยกำลังไอน้ำแบบอัตโนมัติขึ้นมา สามารถสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำหลายรอบการทำงาน ซึ่งขนาดถังที่เล็กเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนค่อนข้างมาก ปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่ใช้พลังงานจากขดลวดไฟฟ้าขนาด 3 kW ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนระบบ ทำให้ระบบสูบน้ำได้เพิ่มขึ้นได้ถึง 227 L ในขณะที่ระดับความสูงในการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพปั๊มสูงขึ้นที่ระดับ 4.85 m [9] ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการหมุนเวียนของสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบในระบบปิด อาศัยถ่ายเทความร้อนในแนวราบการโอนความร้อนภายในถังเก็บความร้อนผลิตกำลังไอน้ำที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นพลังงานในการหมุนเวียนสารทำงาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ยังแลกเปลี่ยนได้ไม่มาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยตามไปด้วย และการหมุนเวียนของสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบ มีระยะทางการส่งถ่ายความร้อนสั้น เนื่องจากความดันที่ใช้ในการหมุนเวียนไม่เพียงพอในการผลักดันสารทำงานให้เคลื่อนที่ได้ในระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดการสูญเสียความดันของของไหลภายในท่อที่ใช้ในการหมุนเวียนสารทำงาน [10, 11]

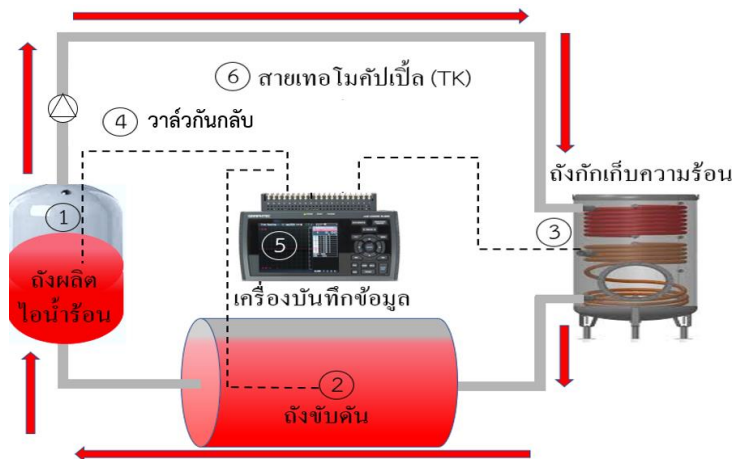
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบการหมุนเวียนของสารทำงาน เพื่อเพิ่มความดันรวมให้กับระบบ และประสิทธิภาพทางความร้อน ทำให้ระบบสามารถหมุนเวียนสารทำงานได้ในระยะทางที่มากขึ้น และมีความเร็วในการหมุนเวียนสารทำงานต่อรอบเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขนาดปริมาตรของถังขັບตันให้มากขึ้น เพื่อจะเพิ่มมวลอากาศภายในระบบมากขึ้น โดยปริมาตรและมวลของอากาศที่อุณหภูมิน้ำร้อนในถังผลิตไอน้ำ 115 °C จะส่งผลต่อความดันที่เพิ่มขึ้นในการเอาชนะความสูญเสียการไหลภายในท่อแบบแนวราบ โดยทำให้ระบบสามารถหมุนเวียนสารทำงานได้ในระยะทางที่มากขึ้น

## 2. ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน

หลักการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน แสดงดังรูปที่ 1 เป็นระบบหมุนเวียนสารทำงาน โดยไอน้ำเกิดการหมุนเวียนในระบบผ่านสู่ถังกักเก็บน้ำร้อน ที่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) อยู่ภายในระบบก่อน ตำแหน่งที่ 1 เป็นการผลิตน้ำร้อนที่ได้รับความร้อนจากขดลวดความร้อน (Heater) จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในถังผลิตน้ำร้อนให้สูงขึ้นเกิดความดันที่สูงขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิเมื่อถึงจุดเดือดของน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C เกิดการเปลี่ยนสถานะของเหลวกลายเป็นไอน้ำเคลื่อนที่ไปยังถังกักเก็บน้ำร้อนที่ตำแหน่งที่ 2 โดยผ่านวาล์วกันการไหลย้อนกลับ

เมื่อเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนภายในถังกักเก็บน้ำร้อนจะมีอุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงส่งผลต่อความดันลดลงตามไปด้วย เมื่อการไหลของน้ำผ่านเข้าสู่ถังขั้วตันที่ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งภายในยังบรรจุอากาศทำให้เกิดความดันที่เพิ่มขึ้น จากอากาศที่ได้รับความร้อนจากน้ำร้อนส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้น เกิดความแตกต่างของความดันในถังผลิตไอน้ำร้อนเกิดให้น้ำสามารถหมุนเวียนกลับไปยังถังผลิตน้ำร้อน เมื่อน้ำเย็นไหลเข้าสู่ถังน้ำร้อนเกิดเป็นสุญญากาศ เกิดการดูดน้ำกลับจากถังไอน้ำเข้าสู่ถังผลิตน้ำร้อนซึ่งครบ 1 รอบของการทำงาน [2]



รูปที่ 1 หลักการการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน

## 2.2 ปริมาณความร้อนสะสมในถังกักเก็บน้ำร้อน [3]

$$Q_{st} = m_{w,s} \times C_{p,w} \times (T_{2,s} - T_{1,s}) \quad (1)$$

เมื่อ  $Q_{st}$  คือ ปริมาณความร้อนสะสมในถังกักเก็บ (kJ)

$m_{w,s}$  คือ มวลน้ำในถังกักเก็บ (kg)

$C_{p,w}$  คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)

$T_{2,s}$  คือ อุณหภูมิในถังกักเก็บที่เวลาสุดท้าย (°C)

$T_{1,s}$  คือ อุณหภูมิในถังกักเก็บที่เวลาเริ่มต้น (°C)

### 2.3 ประสิทธิภาพของระบบน้ำร้อน [3]

$$\eta_t = \frac{Q_{st}}{Q_{input}} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ  $\eta_t$  คือ ปริมาณความร้อนของระบบ (%)

$Q_{st}$  คือ ปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บน้ำร้อน (kJ)

$Q_{input}$  คือ ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ระบบ (kJ)

### 2.4 ความดันที่ใช้ในการหมุนเวียนไอน้ำ

การหาค่าความดันระบบการหมุนเวียนไอน้ำได้จากสมการ (3) (4) และ (5) [3]

$$P_{system} = P_{air} + P_{vapor} \quad (3)$$

$$P_{air} \cdot V_{air} = m_{air} \cdot R_{air} \cdot T_{air} \quad (4)$$

$$P_{vapor} = 133.32 \times 10^{(8.07131 - 1730.63 \times \frac{1730.63}{T_{vapor} + 233.426})} \quad (5)$$

เมื่อ  $P_{system}$  คือ ความดันรวมในระบบ (kPa)

$P_{air}$  คือ ความดันของอากาศในระบบ (kPa)

$P_{vapor}$  คือ ความดันของไอน้ำในระบบ (kPa)

$m_{air}$  คือ มวลอากาศในระบบ (L)

$V_{air}$  คือ ปริมาตรอากาศในระบบ ( $m^3$ )

$R_{air}$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/kg °C)

$T_{air}$  คือ อุณหภูมิอากาศในระบบ (°C)

$T_{vapor}$  คือ อุณหภูมิไอน้ำในระบบ (°C)

### 3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์ทดลอง (แสดงดังรูปที่ 2)

1) ถังขั้บตัน (Pressure tank) รูปทรงกระบอกแนวนอน วัสดุทำจากสแตนเลสเบอร์ 304 มีความหนา 0.0030 m โดยมีสองขนาดดังนี้ ถังแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m ความสูง 0.39 m ปริมาตรของน้ำ 19 และ ถังที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 m ความสูง 0.50 m ปริมาตรของน้ำ 98 L

2) ถังกักเก็บความร้อน (Storage tank) รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 0.40 m x 0.40 m x 0.30 m ปริมาตรในการบรรจุน้ำ 48.0 L ความหนา 0.0015 m วัสดุเป็นสแตนเลสเบอร์ 304

3) ถังผลิตไอน้ำร้อน (Heating tank) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด กว้าง 0.2 m ยาว 0.3 m สูง 0.5 m ปริมาตรในการบรรจุ 3 L ความหนาของวัสดุ 0.003 m วัสดุเป็นสแตนเลสเบอร์ 304 ฉนวนเป็นยางสังเคราะห์

4) วาล์วกันย้อนกลับ (Swing check valve type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านออก 0.025 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านเข้า 0.025 m วัสดุที่ใช้เป็นทองเหลือง ชนิดของบานพับเป็นแบบกลับด้วยสปริง

5) ขวดลวดให้ความร้อน (Electric heater) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.008 x 0.2 m ใช้แรงดันไฟฟ้า 220-240 VAC ขนาดกำลังไฟฟ้า 3 kW วัสดุเป็นลวดนิกเกิลโครเมียม

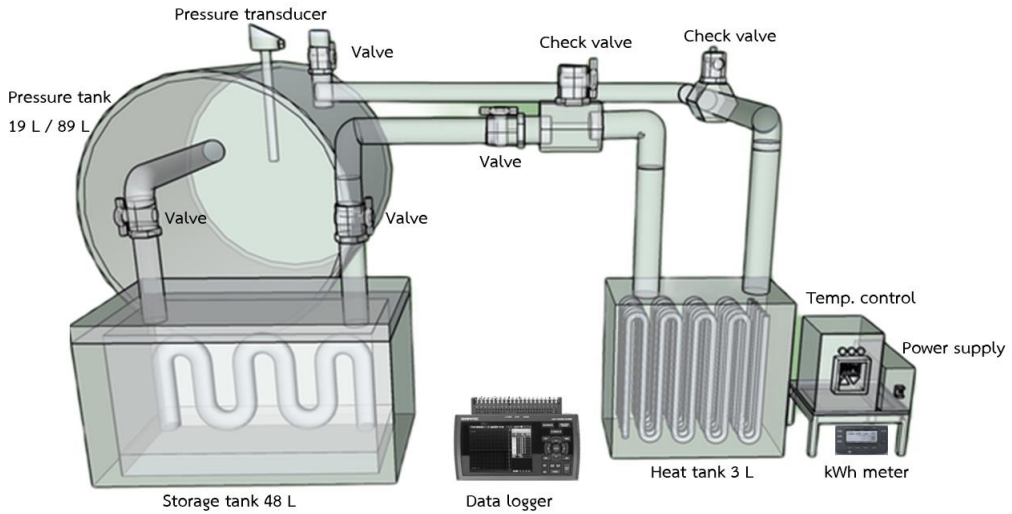
6) เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดัน (Data logger) แหล่งรับสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้า อยู่ในช่วง 20-50 mV ค่าความแม่นยำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $\pm 0.005\%$  ย่านการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1370 °C ค่าความแม่นยำของอุณหภูมิ  $\pm 0.15\%$  แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 180 ถึง 250 VAC ความถี่ของกระแสไฟฟ้า 50/60 Hz

7) ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure Transducer) หลักการทำงานแปลงสัญญาณความดันเป็นแรงดันไฟฟ้า ย่านการวัด -14.7 ถึง 30 psi (-1 ถึง 2 bar) ความแม่นยำของการวัด  $\pm 0.25\%$  อุณหภูมิของสารทำงาน -40 ถึง 125 °C แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 9 ถึง 30 VDC สารทำงานที่ใช้ น้ำ และอากาศ

8) ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิดของหัวตรวจจับ Type K ย่านการวัด 0 ถึง 200 °C ค่าเบี่ยงเบน  $\pm 2.0\%$  (-110 ถึง 285 °C) ค่าเบี่ยงเบน  $\pm 2.2\%$  และ 285 ถึง 1,250 °C ค่าเบี่ยงเบน  $\pm 0.75\%$  ขนาด 0.032 m x 0.002 m

9) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 220-240 VAC กำลังไฟฟ้าด้านออก 3 kW ความถี่ด้านเข้า 50 Hz ระบบควบคุมแสดงผล PID/Digital





รูปที่ 2 โครงสร้างการทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวราบ

#### 4. วิธีการทดลอง

1) ศึกษาตัวแปร (ปริมาตรอากาศในถังขั้วตัน) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบ โดยการทดลองกับขนาดถังขั้วตัน 2 ขนาด คือ ขนาด 19 L และ 98 L โดยให้อุปกรณ์อื่นเหมือนกันทุกอย่าง รวมทั้งปริมาณน้ำในถังผลิตความร้อน และถังขั้วตัน ปริมาณเท่ากันเช่นกันคือในถังผลิตไอน้ำร้อน 3 L และ ถังขั้วตัน 3 L เปลี่ยนแปลงเพียงแต่ขนาดถังขั้วตันเท่านั้น

2) กำหนดจุดวัดอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ ที่ต้องนำมาวิเคราะห์ และจุดวัดความดันในถังขั้วตัน และติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดันตามจำนวนที่ติดตั้งไป

3) การทดลองจะเริ่มจากถังขั้วตันขนาด 19 L ก่อน โดยเติมน้ำ 3 L ในถังผลิตไอน้ำร้อนให้เต็มถึงปริมาณน้ำเทียบกับอากาศคือ 3:0 L และเติมน้ำในถังขั้วตัน 3 L โดยปริมาณน้ำกับอากาศคือ 3:16 L ดังแสดงในรูปที่ 3

4) ทำการตั้งค่าเริ่มต้นเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (kW-h) และตั้งค่าเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดันโดยบันทึกทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5) ทำการตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิที่ 115 °C เปิดเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้ชุดลดทำความร้อน

6) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ให้นำผลมาทำการวิเคราะห์ ถ้าชุดข้อมูลไปในทิศทางเดียวกันให้ทำการทดลองที่ตัวแปรใหม่คือถังขั้วตันที่ปริมาตร 98 L แล้วทำการทดลองซ้ำจากข้อที่ 3 ถึง ข้อที่ 5 โดยปริมาตรน้ำกับอากาศคือ 3:95 L ทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3

ปริมาตรอากาศ 95 L  
ปริมาตรน้ำ 3 L

ปริมาตรอากาศ 16 L  
ปริมาตรน้ำ 3 L

ถังขับเคลื่อนขนาด 98 L

ถังขับเคลื่อนขนาด 19 L

**รูปที่ 3 อัตราส่วนของปริมาณของน้ำกับปริมาตรของอากาศในถังขับเคลื่อนขนาด 19 L และ 98 L**

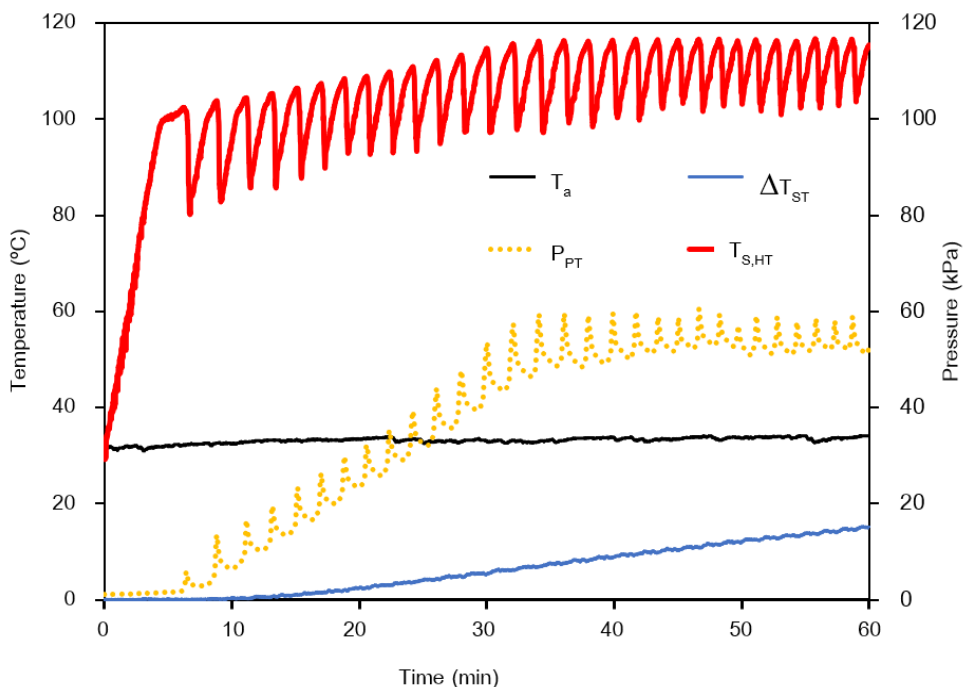
7) นำผลการทดลองทั้งสองแบบมาวิเคราะห์ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อน อุณหภูมิอากาศในถังขับเคลื่อน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความดันในถังขับเคลื่อน จำนวนรอบที่หมุนเวียนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมง ปริมาณความร้อนสะสมในถังกักเก็บ ปริมาณกำลังไฟที่ใช้ไป และประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ

### 5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาตรของถังขับเคลื่อนสองขนาดคือ 19 L และ 98 L ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวราบ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิและความดัน ปริมาตรอากาศ และปริมาตรของน้ำในอุปกรณ์ต่างๆ โดยจุดวัดประกอบด้วยอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ ( $T_{w,HT}$ ) อุณหภูมิของในถังผลิตไอน้ำ ( $T_{s,HT}$ ) อุณหภูมิอากาศรอบๆ ( $T_a$ ) อุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างในถังกักเก็บความร้อน ( $\Delta T_{ST}$ ) ความดันกับอุณหภูมิของถังขับเคลื่อน ( $P_{PT}$ ) และปริมาตรของอากาศ เพื่อหาปริมาณความร้อนที่สะสมในถังกักเก็บความร้อน และประสิทธิภาพความร้อนในถังกักเก็บความร้อน ( $\eta_c$ ) และหาความสัมพันธ์ที่มีผลกับการหมุนเวียนของระบบเป็นต้น โดยนำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยควบคุมอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำไว้ที่  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีผลการศึกษาดังนี้

การทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวราบ จะเป็นถังขับเคลื่อนขนาด 98 L ซึ่งอุณหภูมิของน้ำในถังผลิตไอน้ำร้อน ( $T_{w,HT}$ ) จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอที่อุณหภูมิเกิน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิจะไม่สูงตามค่าที่ตั้งไว้ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำเริ่มต้นที่ความดัน 0 kPa หลังจากนั้นเมื่อความดันเพิ่มจุดเดือดก็จะเพิ่มขึ้นตามแต่จะไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ โดยอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะสูงขึ้นตามความดัน เมื่อมีความดันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่ไปในถังขับเคลื่อนและไหลเข้าสู่ถังกักเก็บความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้อุณหภูมิของไอน้ำด้านขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนลดลง ไหลเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิ

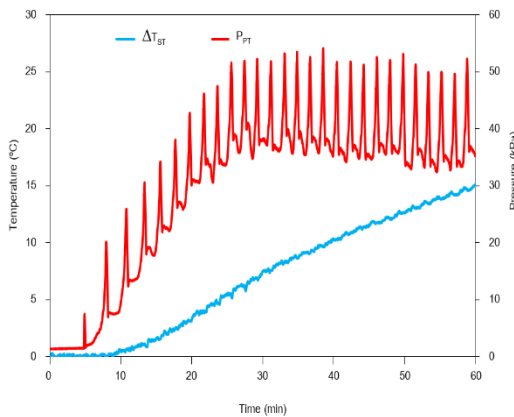
100 °C ขึ้นไปจนเกิดสภาวะสูญญากาศเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ถังผลิตไอน้ำร้อน ส่งผลให้สารทำงานเคลื่อนที่กลับเข้าไปในถังผลิตไอน้ำร้อน ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานในถังผลิตไอน้ำร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4 และขดลวดความร้อนจะทำงานอีกครั้ง เนื่องจากอุณหภูมิของสารทำงานลดลงต่ำกว่าค่า set point การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะเริ่มต้นจากจุดเดือดของสารทำงานคือ ที่ 100 °C และจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันภายในถังขั้วตันที่ หมุนเวียนมายังถังผลิตไอน้ำร้อนทำให้ความดันภายในถังผลิตไอน้ำร้อนสูงขึ้นมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับแต่จะไม่เกินค่าที่ตั้งไว้คือ 115 °C เมื่อเกินค่าที่ตั้งไว้ ขดลวดความร้อนจะตัดการทำงานเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนให้คงที่ อุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะอยู่ในรูปแบบเดิมไปเป็นรอบๆ ในรูปแบบฟันปลา ซึ่งการเพิ่มความร้อนและการคลายความร้อนเป็นรอบ ๆ จะเกิดความร้อนสะสมในถังกักเก็บความร้อน 48 L เนื่องจากการคลายความร้อนผ่านทางขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังน้ำในถังกักเก็บความร้อน ซึ่งอุณหภูมิ น้ำในถังกักเก็บความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบและอุณหภูมิของสารทำงาน



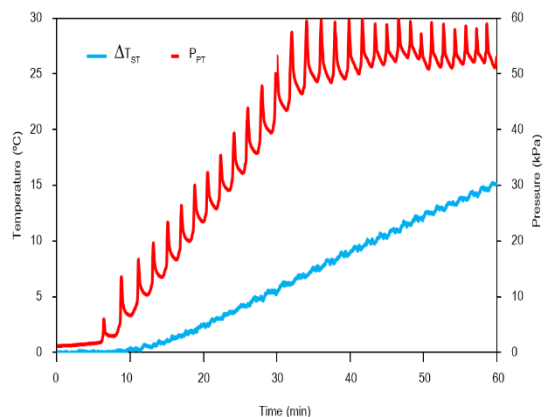
รูปที่ 4 การทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานในแนวราบ ที่ขนาดถึงขั้วตันขนาด 98 L

ความแตกต่างของอุณหภูมิในถังกักเก็บความร้อนที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที แรกตามรอบการทำงานจะสอดคล้องกับความดันของระบบที่เพิ่มขึ้นตามทั้งถึงขั้วตัน 19 L และ

98 L โดยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พอเวลาผ่านไปในช่วงประมาณ 25 นาทีความดันในถัง ขั้วตัน 19 L เริ่มมีลักษณะคงที่ แต่ถังขั้วตัน 98 L ลิตรจะเริ่มคงที่ประมาณนาทีที่ 35 แต่จะเห็น ความแตกต่างกันของความดันทั้งสองถังคือ ถังขั้วตัน 98 L จะมีความดันคงที่สูงสุดที่ 50-60 kPa ในขณะที่ถังขั้วตัน 19 L จะอยู่ในช่วง 35-50 kPa ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับสมการที่ 3 ถึง 5 แสดง ดังรูปที่ 5 เนื่องจากมวลอากาศภายในถังขั้วตันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของอากาศภายในถังขั้วตัน ดังนั้นเมื่อปริมาตรถังขั้วตันเพิ่มขึ้น มวลอากาศก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความดันอากาศภายในถัง ขั้วตันเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยอุณหภูมิของถังก็เก็บความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันจากการตั้งค่าอุณหภูมิ ของถังผลิตไอน้ำร้อนเท่ากัน



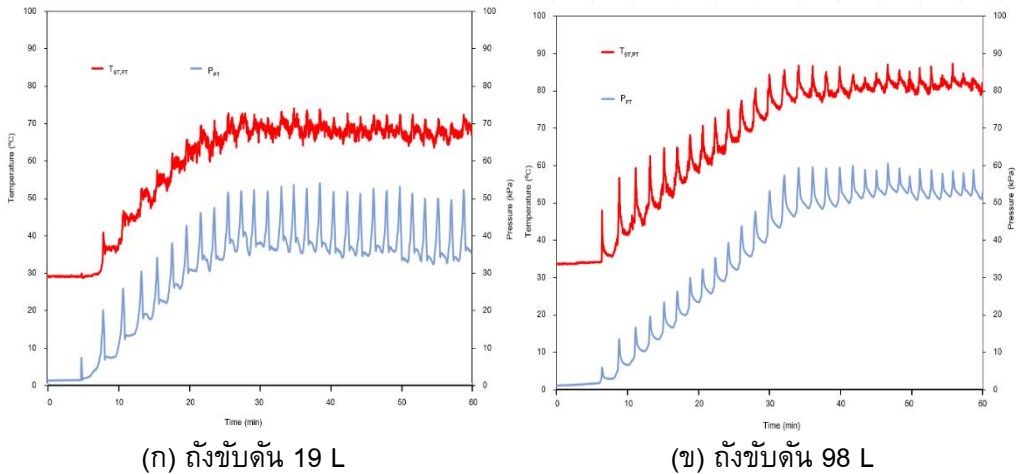
(ก) ถังขั้วตัน 19 L



(ข) ถังขั้วตัน 98 L

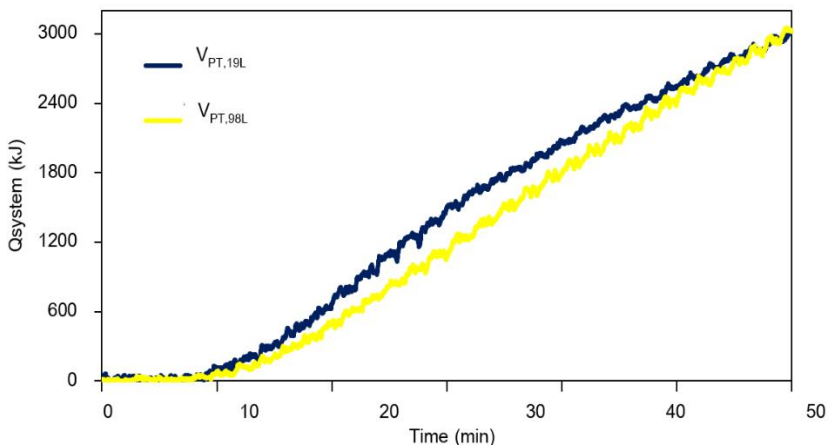
### รูปที่ 5 ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิในถังกักเก็บความร้อน ( $\Delta T_{ST}$ ) และความดันรวมในระบบ

จากสมการที่ 4 เมื่ออุณหภูมิและมวลอากาศสูงขึ้น จะส่งผลให้ความดันอากาศสูงขึ้นตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 โดยความดันรวมภายในระบบจะเกิดจากความดันไอน้ำรวมกับความดันอากาศ ดัง สมการที่ 3 ดังนั้นเมื่อปริมาตรถังขั้วตันมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 19 L เป็น 98 L จะทำให้มวลอากาศ ภายในถังเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของถังนั้นด้วย และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอน้ำภายใน ถังขั้วตันที่เพิ่มขึ้นตามมวลของอากาศ



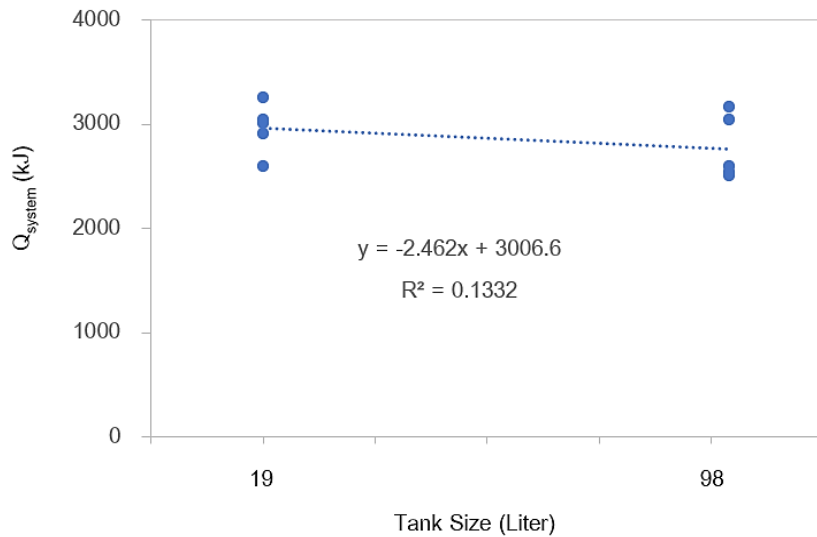
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิของไอน้ำในถังขั้วตัน และความดันรวมในระบบ

อุณหภูมิภายในถังกักเก็บความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อระบบเริ่มทำงาน ความร้อนจากถังผลิตไอน้ำร้อนเคลื่อนที่ผ่านถังขั้วตันทำให้มีความดันสูงขึ้นและเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกติดตั้งไว้ภายในถังกักเก็บความร้อน เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำภายในถังกักเก็บความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิของไอน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีอุณหภูมิสูงกว่าขนาดถังขั้วตัน 98 L เนื่องจากมวลของไอน้ำและความดันภายในระบบของถังขั้วตัน 98 L มีค่าสูงกว่าจึงไหลเวียนได้เร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในถังกักเก็บความร้อนลดลงปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บความร้อนจึงลดลงตามไปด้วย



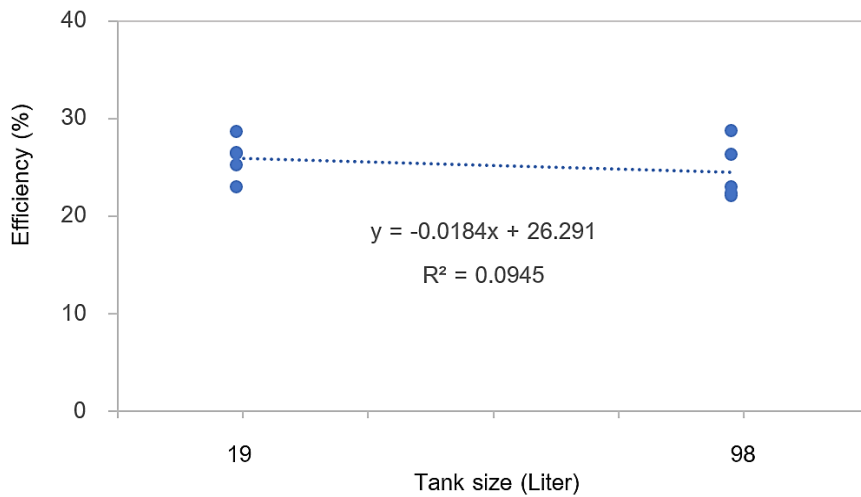
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ถังกักเก็บความร้อนและถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

ปริมาณความร้อนที่สะสมภายในถังกักเก็บความร้อนจะมีค่าแปรผกผันกับปริมาตรของถังขั้วตัน เมื่อขนาดถังขั้วตันเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนก็จะลดลง โดยเส้นแนวโน้มและสมการเชิงเส้นเป็นการทำนายพฤติกรรมของปริมาณความร้อนแสดงให้เห็นถึงการลดลงอย่างเป็นนัยสำคัญของปริมาณความร้อนกับปริมาตรของถังขั้วตัน เนื่องจากปริมาตรถังขั้วตันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มวลอากาศและความดันเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของไอน้ำจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามความดัน ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่สะสมภายในระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบจะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบและพลังงานที่ได้จากระบบ แสดงดังรูปที่ 9 การทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพทางความร้อนกับปริมาตรของถังขั้วตัน โดยการเพิ่มเส้นแนวโน้มและสมการเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดถังขั้วตันเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลงตามลำดับเนื่องจากปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของถังขั้วตันที่ลดลง ก็จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นตามปริมาตรของถังขั้วตันที่ลดลงเช่นกัน ในเมื่อปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังสมการที่ 2



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพทางความร้อนที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

## 6. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของถังขั้วตันมีอิทธิพลต่อความดันภายในถัง เนื่องจากอุณหภูมิของไอน้ำภายในถังขั้วตันจะมีอุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าสูงสุดจะอยู่ที่ 87.2 °C จะแปรผันตรงกับความดันภายในถังที่สูงขึ้น 60.593 kPa และผลของความแตกต่างของอุณหภูมิภายในถังก็เก็บจะค่อย ๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาและรอบการทำงาน ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมภายในระบบ ดังนั้นเมื่อขนาดถังขั้วตันลดลง ปริมาณความร้อนสะสมของระบบและประสิทธิภาพความร้อนของระบบก็จะลดลงตามลำดับ โดยที่ปริมาณความร้อนในระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีค่าเท่ากับ 2,959 kJ และที่ถังขั้วตันขนาด 98 L มีค่าเท่ากับ 2,765 kJ ในส่วนของประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีค่าเท่ากับ 25.94% และที่ขนาดถังขั้วตัน 98 L มีค่าเท่ากับ 24.49 %

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอาจารย์ สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง รวมถึงให้อุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัยและอนุเคราะห์สถานที่เก็บผลการทดลองครั้งนี้ด้วย

## References

- [1] Electricity Generating Authority of Thailand. Fuel for Electricity Generation [Internet]. 2021 [cited 2021 Jan 02]. Available from: <https://www.egat.co.th/home/fuel/>
- [2] Ruammake P. Key success factors for the sustainable solar energy development. Executive Journal 2014;34(1):122-9. (In Thai)
- [3] Sitranon J, Chitwiroj A, Namprakai P, Witinantakit K. A study of heat transfer system with steam as a horizontal circulating working fluid. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):238-52. (In Thai)
- [4] Sitranon J, Jaekhom S, Makmee A, Onwised C. A study of the circulation of steam circulating system in the horizontal. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2021;3(1):44-54. (In Thai)
- [5] Sutthivirode K, Namprakai P, Roonprasang N. A new version of a solar water heating system coupled with a solar water pump. Applied Energy Journal 2019;86(9):1423-30.
- [6] Sitranon J, Sutthivirode K, Rungprasand N. A Study of discharge head affecting the temperature and amount of hot water using mathematical modeling of a solar water heating system. SWU Engineering Journal 2020;15(1):97-107. (In Thai)
- [7] Zhang XW, Oh GS, Jung GJ. Performance of water source heat pump system using high-density polyethylene tube heat exchanger wound with square copper wire. Advance in Mechanical Engineering Journal 2015;7(7):1-12.
- [8] Moonsri P, Kunchornrat J, Namprakai P. Hybrid energy thermal water pump for producing hot water from a shallow well in Thailand. Energy Engineering Journal 2016;142(3):1-15.
- [9] Oonwised C, Sitranon J, Sutthivirode K. Study of temperature and amount of cooling water affecting to vacuum pressure of steam water pump. Renewable Energy for Community Journal 2021;4(3):107-20. (In Thai)
- [10] Akkarathiwa S, Wongcharee K. Thermodynamics: an engineering approach. 7<sup>th</sup> ed. Thailand: puMcGrahill Publishing; 2021.
- [11] Lazonva M. Characteristics of forced convection heat transfer to R125 at supercritical state in horizontal tube [PhD Thesis]. Belgium: Ghent University; 2020.



## ประวัติผู้เขียนบทความ



**พิชาญ มาศวรรณ** นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-515-8563 Email: picharn.m@gmail.com



**ผศ.ดร.จิรวัดน์ สิตรานนท์** อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: Jirawat\_si@rmutto.ac.th

งานวิจัย: Thermal Energy, Solar Energy, Steam-Air Power, Solar Thermal Water Pump



**ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์** อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: kittisak\_wi@rmutto.ac.th



**กนกพร เกาะมัน** อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (แผนกวิชาฟิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: kanokporn\_ko@rmutto.ac.th

งานวิจัย: Interferometer, Refractive index, Metrology

---

**Article History:**

Received: September 8, 2022

Revised: December 1, 2022

Accepted: December 7, 2022