

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงของคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

Direct Contact Heat Transfer Phenomena of Carbon Dioxide and Water

สถาพร ทองวิค¹ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์^{1*} และ อติพงศ์ นันทพันธ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์ 0-5394-4144 ต่อ 961 โทรสาร 0-5394-4145 *อีเมล tanong@dome.eng.cmu.ac.th

² กองศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง 52220

โทรศัพท์ 0-5425-6932 โทรสาร 0-5425-6938 อีเมล atipoang.n@egat.co.th

Sathaporn Thongwik¹ Tanongkiat Kiatsirirot^{1*} and Atipoang Nuntaphan²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200

Tel: 0-5394-4144 Ext. 961 Fax: 0-5394-4145 *Email: tanong@dome.eng.cmu.ac.th

² Mae Moh Training Center, Electricity Generating Authority of Thailand, Mae Moh, Lampang 52220

Tel: 0-5425-6932 Fax: 0-5425-6938 Email: atipoang.n@egat.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปรากฏการณ์ด้านการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเป็นสารตัวกลางเปลี่ยนเฟส โดยได้ทำการฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิต่ำประมาณ -15 ถึง -60 องศาเซลเซียส เข้าผสมกับน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส ภายในท่อทดลองที่ทำจากพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0762 เมตร ยาว 2 เมตร ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0032, 0.0064 และ 0.0085 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาตรของน้ำ 1, 2 และ 3 ลิตร

จากการศึกษาพบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ขึ้นอยู่กับ อัตราการไหล และอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาตรของน้ำในท่อทดลอง และแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบ Lump สามารถใช้คำนวณอุณหภูมิของน้ำภายในท่อทดลองได้เป็นอย่างดี

Abstract

This research studies the direct contact heat transfer phenomena of carbon dioxide and water which is the phase change media. In this work, low temperature carbon dioxide, approximately -15 to -60 °C, is injected into 28 °C water in the test tube having 0.0762 m diameter and 2 m long. The mass flow rate of carbon dioxide is 0.0032, 0.0064 and 0.0085 kg/s while the water volume is varied from 1, 2 and 3 liter

From this study, it is found that the heat transfer performance between carbon dioxide and water depends on the

mass flow rate and the temperature of carbon dioxide and volume of water in test tube. Moreover, lump model can be applied to this case and it can be predicted the temperature of the water quite well.

1. บทนำ

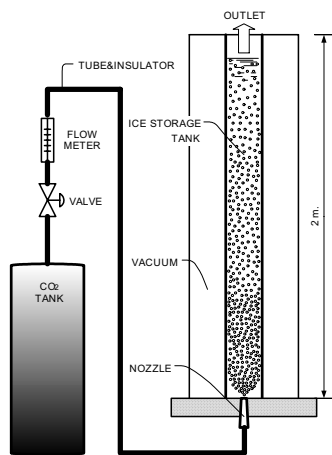
ปัจจุบัน ระบบปรับอากาศจากถั่วได้ว่าเป็นระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ ของอาคารพาณิชย์ ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องมีการจ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศมาก หนทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การนำเอาระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งมาใช้ประโยชน์ ซึ่งระบบดังกล่าวนี้จะผลิตน้ำแข็งในช่วงเวลาที่ราคาพลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด และนำมาใช้ในการปรับอากาศในช่วงที่ราคาพลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งจากการวิจัยของ Chaichana et al. [1] พบว่าระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งสามารถลดต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 55% ต่อเดือน

อนึ่ง ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งมาใช้ในการปรับอากาศของอาคารพาณิชย์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่แล้วระบบที่นำมาใช้งาน จะออกแบบให้ ระบบท่อของคอยล์เย็น (Evaporator) แห้งอยู่ในถังน้ำ และน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะสะสมตัวอยู่โดยรอบของท่อคอยล์เย็น ซึ่งน้ำแข็งจะหนาขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลา จากคุณสมบัติของน้ำแข็งที่มีค่าการนำความร้อนค่อนข้างต่ำ ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่สารทำความเย็นในคอยล์เย็นทำได้ยาก ประสิทธิภาพการทำงานของระบบจึงต่ำลงตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น

หนทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การนำเอาเทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงมาใช้ประโยชน์ โดยมีหลักการทำงานคือ สารทำความเย็นจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับน้ำในถัง ทำให้น้ำมีอุณหภูมิลดลงจนกลายเป็นน้ำแข็ง ในขณะที่สารทำความเย็นเมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และไหลออกจากถังน้ำทางด้านบน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2-5] พบว่า ระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งที่ใช้เทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงมีสมรรถนะสูง กว่าระบบแบบปกติ โดยมีค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนเข้าใกล้ 100% แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวมีจุดอ่อนคือ สารทำความเย็นที่ใช้มักจะละลายในน้ำ รวมทั้งสารทำความเย็นที่ไหลออกจากถังน้ำมีความชื้นสูง ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบทำความเย็น ดังนั้นการเลือกประเภทของสารทำความเย็นจึงมีความสำคัญต่อระบบมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดที่จะนำเอาคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ทดแทนสารทำความเย็น ทั้งนี้เนื่องจากสารดังกล่าวได้มีการนำมาใช้ในระบบทำความเย็นหรือปั๊มความร้อนเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ประกอบกับสารดังกล่าวสามารถละลายน้ำได้น้อย จึงน่าจะเหมาะสมกับระบบผลิตน้ำแข็งแบบสัมผัสโดยตรง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งในอนาคต



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งมีหลักในการทดลองคือ จะฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิต่ำประมาณ -15 ถึง -60 องศาเซลเซียส เข้าผสมกับน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส ภายในห้องทดลองที่ทำจากพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0762 เมตร ยาว 2 เมตร ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0032, 0.0064 และ 0.0085 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาตรของน้ำ 1, 2 และ 3 ลิตร

ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ รวมทั้งอุณหภูมิด้านเข้าห้องทดลองของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

ซึ่งมีความความคลาดเคลื่อนของการวัดคือ ± 0.1 องศาเซลเซียส และบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) อนึ่งค่าอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จะคำนวณจากการชั่งน้ำหนักก๊าซในถังที่เหลือ ที่เวลาต่างๆ

อนึ่ง งานวิจัยนี้ จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่ลดอุณหภูมิ น้ำลง จากอุณหภูมิห้องจนถึงจุดเยือกแข็งเท่านั้น โดยปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงของน้ำแข็งยังไม่แสดงผลการวิจัยในบทความฉบับนี้

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

รูปที่ 2-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถัง เมื่อฉีดคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิต่ำเข้าผสม โดยรูปที่ 2 เป็นกรณีของน้ำปริมาตร 3 ลิตร อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.0032, 0.0064 และ 0.0085 กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าในขณะปริมาตรของน้ำเท่ากัน ที่อัตราการไหล 0.0085 กิโลกรัมต่อวินาที สามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้เร็วกว่าของกรณีที่มีอัตราการไหลของมวลมีค่าเท่ากับ 0.0064 และ 0.0032 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลต่อการลดอุณหภูมิของน้ำ นั่นคือที่อัตราการไหลสูงกว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อน จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำลดลงในอัตราที่รวดเร็วกว่า

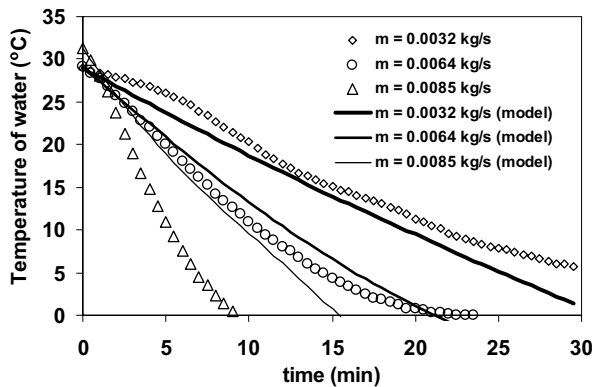
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถังกักเก็บ ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.0064 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาตรน้ำจำนวน 1, 2 และ 3 ลิตร พบว่าที่ปริมาตรน้ำจำนวน 1 ลิตร สามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้เร็วกว่า 2 และ 3 ลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาตรของน้ำที่ถ่ายเทความร้อนด้วยเทคนิคการสัมผัสโดยตรงนี้มีผลต่อการลดอุณหภูมิของน้ำ คือที่ปริมาตรน้ำน้อยกว่าความร้อนที่สะสมอยู่ในน้ำก็น้อยตามไปด้วยทำให้สามารถลดอุณหภูมิได้เร็วกว่า

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถังกักเก็บ ในการเก็บสะสมความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง ที่ปริมาตรน้ำจำนวน 3 ลิตร อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.0064 กิโลกรัมต่อวินาที อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ด้านเข้าถังน้ำเท่ากับ -16, -45 และ -57 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ด้านเข้าถังน้ำ มีผลต่อการลดอุณหภูมิของน้ำในถังกักเก็บ โดยในกรณีของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์สูงอัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บจะเพิ่มสูงขึ้น

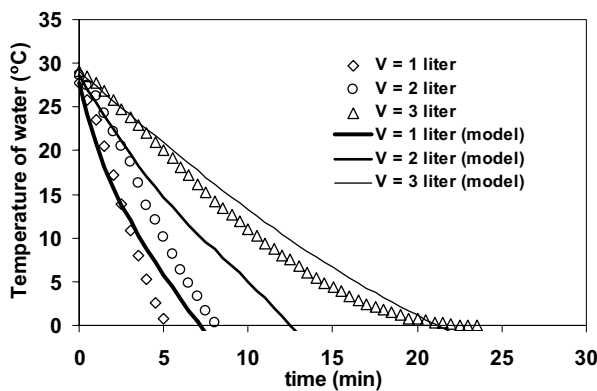
อนึ่ง กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำที่เกิดขึ้น โดยอาศัยแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบ Lump ดังต่อไปนี้

$$T_w^{t+\Delta t} = T_w^t + \frac{(\dot{m}C_p)_{CO_2}(T_{CO_2,out} - T_{CO_2,in})\Delta t}{(mC_p)_w} \quad (1)$$

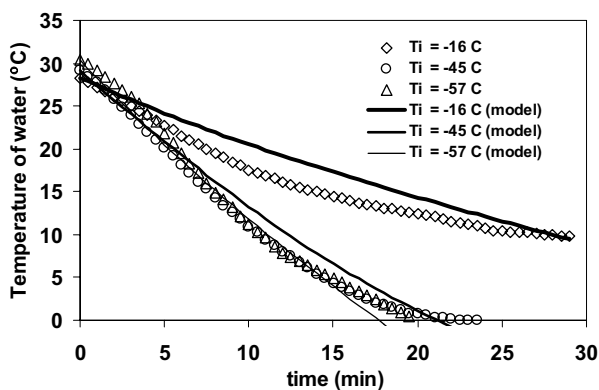
โดยที่ T คืออุณหภูมิ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ m คือมวล t คือเวลา ตัวห้อย w คือน้ำ ตัวห้อย CO_2 คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ตัวห้อย in และ out คือ สภาวะด้านเข้าและออกตามลำดับ



รูปที่ 2 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิของน้ำ ในกรณีปริมาตรน้ำ = 3 ลิตร



รูปที่ 3 ผลของปริมาตรน้ำในถังต่ออุณหภูมิของน้ำ ในกรณีอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ = 0.0064 กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิของน้ำ ในกรณีอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ = 0.0064 กิโลกรัมต่อวินาที

จากรูปที่ 2-4 พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายอุณหภูมิของน้ำได้ดีพอสมควร และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากผลของการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งความคลาดเคลื่อนของการควบคุมอัตราการไหล และอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ฉีดเข้าไปในน้ำ

งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของตัวแปรไร้มิติต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยตัวแปรไร้มิติที่นำมาศึกษาได้แก่ Stanton Number (St) Stefan Number (Ste) และตัวแปรไร้มิติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทดลอง ดังต่อไปนี้

$$St = \frac{U_V V}{(\dot{m} C_p)_{CO_2}} \quad (2)$$

$$Ste = \frac{C_{PW} (\Delta T)_{lm}}{\lambda_W} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{L_W}{D_W} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{P_{CO_2}}{P_W} \quad (5)$$

โดยที่ U_V คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร V คือ ปริมาตรของน้ำในถัง λ_W คือ ค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัวของน้ำ ΔT_{lm} คือ อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น γ คือ ตัวแปรไร้มิติของสัดส่วนความสูงของน้ำในถัง (L_W) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังน้ำ (D_W) ξ คือ ตัวแปรไร้มิติของสัดส่วนความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ (P_{CO_2}) ต่อความดันน้ำในถังที่ระดับหัวฉีด (P_W)

อนึ่งค่า U_V และ ΔT_{lm} คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_w - T_{CO_2, in}) - (T_w - T_{CO_2, out})}{\ln[(T_w - T_{CO_2, in}) / (T_w - T_{CO_2, out})]} \quad (6)$$

$$U_V = \frac{Q}{V(\Delta T)_{lm}} \quad (7)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรน้ำในถัง และ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน ความสัมพันธ์ของตัวแปร St กับตัวแปรไร้มิติอื่นๆ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$St = 0.0027717 Ste^{-0.63937} \gamma^{0.58989} \xi^{0.97739} \quad (8)$$

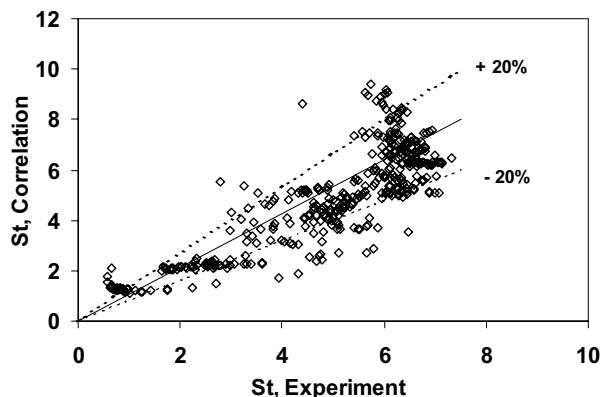
เมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากสมการ (8) กับผลการทดลองพบว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการทดลองโดย 68% ของค่าที่ประเมินได้ เบี่ยงเบนจากข้อมูลการทดลอง $\pm 20\%$

อนึ่ง สมการ (8) ได้บ่งบอกถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง กล่าวคือ ตัวเลข St ซึ่งบ่งบอกถึงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงจะแปรผกผันกับตัวเลข Ste ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (U_V) เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าลักษณะการฉีดคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ในในงานวิจัยนี้เป็นแบบกระจาย (Disperse) ก่อให้เกิดการปั่นป่วนสูง ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวล จะส่งผลทำให้ค่า St เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม

การเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลจะส่งผลให้ อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็กลดลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไป และส่งผลให้ค่า St_e ลดลงตามไปด้วย

ในกรณีของค่าตัวแปรไร้มิติ γ พบว่ามีผลลัพธ์ที่แปรผันกับค่า St ปรากฏการณ์เนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่บรรจุในภาชนะพอม-สูง กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ฉีดเข้ามาทางด้านล่างของถัง ตีกว่าในกรณีของน้ำที่บรรจุในภาชนะพอม-เตี้ย เพราะช่วงเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับน้ำในกรณีของภาชนะพอม-สูง จะยาวนานกว่า

กรณีของอิทธิพลของตัวแปรไร้มิติ ξ ที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน หรือค่า St พบว่าค่า ξ แปรผันกับค่า St เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจาก กรณีที่ความดันในระบบท่อของคาร์บอนไดออกไซด์สูง จะส่งผลให้ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากหัวฉีดสูงตามไปด้วย ดังนั้นการกระจายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะดีกว่ากรณีที่ความดันต่ำ ซึ่งส่งผลให้ค่า U_V เพิ่มขึ้น และค่า St เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูป 5 การเปรียบเทียบ St จากการคำนวณและผลการทดลอง

อนึ่ง ผลการทดลองที่น่าเสนอในบทความนี้ ยังเป็นเพียงการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งการศึกษาโดยละเอียดจะดำเนินการในขั้นต่อไป

4. สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงระหว่างน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ปริมาณน้ำ อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวล และความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนลักษณะทางกายภาพของถังบรรจุ

แบบจำลองแบบ Lump สามารถนำมาประยุกต์ใช้คำนวณหาอุณหภูมิของน้ำที่เวลาต่างๆ ได้ดี รวมทั้งโมเดลการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการทดลองได้ประมาณ 68% โดยมีค่าเบี่ยงเบน $\pm 20\%$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกด้านการวิจัยต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaichana, C. William, W.S.C., and Lu A., 2001. An ice thermal storage computer model. Applied Thermal Engineering. Vol. 21, pp. 1769-1778.
- [2] Ayres, J.M., Sowell, E.F., and Lau, H., 1985. Performance of commercial cool storage system. Vol. 1-2. CA: Electric Power Research Institute.
- [3] Blair, C.K., 1976. Heat transfer characteristics of a three-phase volume boiler direct contact heat exchanger. M.S. Thesis, University of Utha, Salt Lake City.
- [4] Sideman, S., and Gat, Y., 1966. Direct contact heat transfer with change of phase: spray column study of three phase heat exchanger. AIChE Journal., Part 1, Vol. 95, pp. 1206-1213.
- [5] Kiatsiriroat, T., Siriulubpla, P., Nuntaphan, A., 1998. Performance Analysis of a Refrigeration Cycle Using a Direct Contact Evaporator. Int. J. Energy Research, Vol. 22, pp. 1179-1190.

รายการสัญลักษณ์

- C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kgK)
 D_w = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังน้ำ (m)
 L_w = ความสูงของน้ำในถัง (m)
 m = มวล (kg)
 \dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 P = ความดัน (Pa)
 St = Stanton Number
 St_e = Stefan Number
 t = เวลา (min)
 T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT_{lm} = อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็ก ($^{\circ}\text{C}$)
 U_V = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ($\text{W/m}^3\text{K}$)
 V = ปริมาตรของน้ำในถัง (m^3)
 λ_w = ความร้อนแฝงของการแข็งตัวของน้ำ (J/kg)
 γ = ตัวแปรไร้มิติ
 ξ = ตัวแปรไร้มิติ

ตัวห้อย

- W = น้ำ
 CO_2 = คาร์บอนไดออกไซด์
 in = สภาวะด้านเข้า
 out = สภาวะด้านออก