

การจำลองเชิงเลขของระบบทำความเย็นดูดซับแบบเบดคู่ ที่ใช้คู่สารถ่านกัมมันต์กับฟรียอน (R-22) และการทดสอบคุณสมบัติการดูดซับเบื้องต้น

Numerical simulation of a double-bed, adsorption refrigeration system using activated carbon-freon (R-22) pair and preliminary adsorption equilibrium experiment

สรรัตน์ หงส์ประภัศร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 พุทธมณฑลสาย 4 ศาลายา จ.นครปฐม 73170
โทร 0-2889-2138 ต่อ 6410 โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

Sorarat Hongprapas

Department of Mechanical Engineering, Mahidol University,
25/25 Buddhamonthon sai 4 road, Salaya, Nakornpatom 73170 Thailand.

Phone (662)8892138 ext 6401,6410. Fax 8892138 ext 6429.

Email egshp@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ที่ใช้คู่สารดูดซับถ่านกัมมันต์ กับสารทำความเย็นกลุ่มฟรียอนที่นิยมใช้ในระบบอัดไอ บทความนี้ได้แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติสมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์กับ R-22 และนำผลการทดลองมาใช้ในการจำลองเชิงเลข ของพฤติกรรมพลวัต ของระบบดูดซับแบบเบดคู่ที่ใช้คู่สารดังกล่าว ผลการคำนวณสามารถแสดงการทำงานที่แปรเปลี่ยนตามเวลา อย่างต่อเนื่องของส่วนประกอบหลัก ทุกอุปกรณ์ในระบบได้ และสามารถนำมาใช้ทำนายพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของระบบ เช่นคาบวัฏจักรได้ ถึงแม้สัมประสิทธิ์สมรรถนะ และความสามารถในการทำความเย็น ที่ได้จากแบบจำลองค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับระบบดูดซับที่ใช้คู่สารอื่นหรือระบบอัดไอ แต่ก็สามารถทำความเย็นได้ ระบบดูดซับที่ใช้คู่สารถ่านกัมมันต์ และ R-22 นี้ จึงมีศักยภาพที่จะทำความเย็นจากแหล่งความร้อนได้โดยตรง และยังสามารถใช้อุปกรณ์ร่วมกับระบบอัดไอได้

Abstract

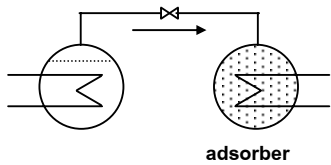
This study is a part of a research project, which aims to investigate feasibility of building adsorption refrigeration machines using activated carbon and freon as sorption pair. This paper presents the adsorption equilibrium equation of locally available activated carbon and R-22 which is obtained in a one-bed preliminary experiment. The experimental results are then used in

a numerical simulation showing the unsteady behavior of a double-bed, solid-sorption or "adsorption" cooling machine which is driven by heat. The simulation shows realistically continuous and unsteady operations of the double-bed system and its achievement of refrigerating effect. Effects of the system's cycle time on COP and specific cooling capacity (SCC) are also investigated. The performance parameters are presented in normalized forms. The existence of an optimized cycle switching frequency is indicated. The resulting COP and SCC of the simulated system are lower than those of the system using conventional adsorption pairs or the vapor-compression counterpart. Even though, the carbon-freon adsorption system still promises strong potential with regard to its ability to produced cold directly from heat source, such as the solar energy, and to its construction simplicity, as commercially available parts for vapor-compression machines can be used.

1. บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ หรือดูดเกาะ (adsorption, solid-sorption) เป็นวัฏจักรทำความเย็นซึ่งขับเคลื่อนด้วยความร้อน ที่อาศัยการทำงานของสารดูดซับของแข็ง (solid adsorbent) กับ สารทำความเย็น ได้รับการพัฒนาขึ้น ในช่วงทศวรรษ 1980 [4][9][10] แต่ก็มีการใช้งานในวงจำกัด เพราะมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ แต่ไม่นานมานี้ ระบบทำ

ความเย็นแบบนี้กลับมาได้ความสนใจอีก เนื่องจากความต้องการในการปรับอากาศ และทำความเย็นที่ขยายขนาดขึ้น พร้อมกับความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด, ราคาของเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้น, และ ความพยายามในการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ทำลายชั้นโอโซน ศักยภาพที่ได้เปรียบของวัฏจักรการทำความเย็นนี้ คือ สามารถทำความเย็นได้จากความร้อนโดยตรง, ไม่ต้องมีชิ้นส่วนเคลื่อนที่เหมือนในวัฏจักรอัดไอ, และ ชิ้นส่วนของระบบสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน จึงมีต้นทุนถูกกว่าระบบแบบดูดซึม (absorption) และยังมีโอกาสที่จะพัฒนาสู่สารทำงานใหม่ได้อีกมาก เพราะยังมีผู้ศึกษาน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบดูดซึม (ของเหลว+แก๊ส) ที่ระบบน้ำ+แอมโมเนีย หรือ ลิเทียมโบรไมด์+น้ำ ได้รับการพัฒนาไปมากแล้ว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่



รูป 1 หลักการทำงานของระบบดูดซึมอย่างง่าย

หลักการทำงานโดยย่อของระบบนี้ ได้แสดงในรูป 1 [5][6] เมื่อแอดซอร์เบนต์ ที่บรรจุสารดูดซึม (adsorbent) ของแข็ง ที่แห้ง ณ อุณหภูมิห้อง เปิดต่อกับอีวาโปเรเตอร์ จะดูดซึม (adsorb) ไอสารความเย็นเข้าไปอยู่ในรูพรุนขนาดเล็กที่มีอยู่จำนวนมากได้ ที่ความดันอิ่มตัวของอีวาโปเรเตอร์ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงเกิดการทำความเย็นในอีวาโปเรเตอร์ได้ เมื่อต้องการทำให้เบดแห้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ก็จะทำให้ความร้อนแก่ แอดซอร์เบนต์ เพื่อไล่สารความเย็นให้ไปกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์ เนื่องจากการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง การทำงานเป็นวัฏจักรจึงต้องมีตั้งแต่ 2 เบดขึ้นไป สลับจังหวะการทำงานกัน เพื่อรักษาอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ให้คงที่ แอดซอร์เบนต์ที่ทำงานด้วยความร้อนนี้จึงทำหน้าที่ เสมือนกับเครื่องอัดในวัฏจักรอัดไอนั่นเอง

คู่สารทำงาน (สารดูดซึม + สารความเย็น) ที่มีการทดสอบกันค่อนข้างมาก ได้แก่ ถ่านกัมมันต์+แอมโมเนีย [13], ถ่านกัมมันต์+แอลกอฮอล์ [9][14][16], ซีโอไลต์ และซิลิกาเจล+น้ำ [7][10] นอกจากนี้ที่อาศัยปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย แต่ก็ยังไม่มีคู่สารใดที่จะเหมาะสมกับการใช้งาน ปัญหาของระบบที่ใช้แอลกอฮอล์ หรือน้ำเป็นสารทำความเย็น คือความดันไอแอมโมเนียที่ต่ำกว่าบรรยากาศ และการรั่วเข้าของอากาศเมื่อนำไปใช้งานทำความเย็น ที่อุณหภูมิต่ำ ระบบแอมโมเนียจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้กับการทำความเย็น แต่ก็มีราคาแพงเพราะต้องรับความดันคอนเดนเซอร์ที่สูงกว่า และยังมีปัญหาความเย็นเป็นพิษของแอมโมเนียและเมธานอลด้วย ส่วนซีโอไลต์และซิลิกาเจลเป็นสารดูดซึม ที่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์

สำหรับสารกลุ่มฟรียอนที่มีการใช้ในระบบอัดไอเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย กลับมีการศึกษาในระบบดูดซึมน้อย ถึงแม้จะมีผลการทดสอบการดูดซึมเช่น R32 [1][2] ได้ผลที่ดี ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าระบบแอมโมเนีย แต่ระบบที่ใช้สารกลุ่มฟรียอนนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น สามารถที่จะใช้อุปกรณ์มาตรฐานสำหรับระบบอัดไอ

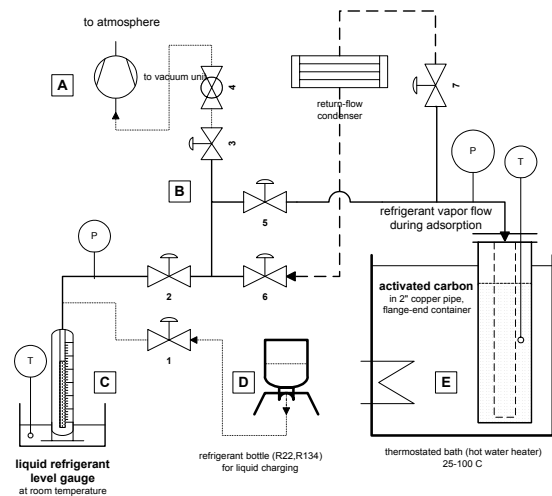
ที่ใช้ R22, R134a ได้ทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง ส่วนแอมโมเนียจะกัดกร่อนทองแดงจึงต้องใช้อุปกรณ์เหล็กที่ราคาแพงกว่า และสาร R22, R134a ไม่เป็นพิษต่อร่างกายโดยตรงเหมือนแอมโมเนีย, สะดวกต่อการทำงานในห้องปฏิบัติการ, มีความดันด้านอีวาโปเรเตอร์สูงกว่าบรรยากาศ, ความดันคอนเดนเซอร์ก็ไม่สูงเกินไป, มีความสามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้ และให้ประสิทธิภาพที่สูงพอใช้

ดังนั้นบทความนี้จะเสนอผลส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่จะทดสอบระบบดูดซึมที่ใช้ฟรียอน ได้แก่ R-22 และ R-134a ที่ยังมีผู้ศึกษาน้อย โดยจะเสนอผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติการดูดซึม และการจำลองเชิงเลขของระบบที่ใช้ ถ่านกัมมันต์ + R-22 (CHClF_2) ในบทความนี้ ก่อน สำหรับผลการทำงานของระบบทำความเย็นที่จะสร้างขึ้นจริง และผลที่ได้จาก R-134a จะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

การที่เลือก R-22 มาใช้ทดสอบเป็นสารความเย็นด้วย เนื่องจากจะ ได้สามารถเปรียบเทียบผลการวิจัย กับ สมรรถนะของระบบอย่างง่ายที่ใช้ R-22 ซึ่งได้มีผู้วิจัยเชิงทดลองมาก่อน [1] แต่ก็ได้เสนอสมการสมดุลการดูดซึม (adsorption equilibrium equation) ไว้ และ ถึงแม้ R-22 จะเป็นสาร HCFC ที่มีผลต่อชั้นโอโซน แต่ก็ยังมีการใช้งานในระบบปรับอากาศ จึงสามารถหาอุปกรณ์เพื่อการทดสอบได้ง่าย

2. การทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมเบื้องต้น

ข้อมูลคุณสมบัติในการดูดซึมของถ่านกัมมันต์และสารกลุ่มฟรียอนยังมีผู้ศึกษาไว้น้อย เช่นการทดสอบอย่างง่ายของ Critoph and Vogel [1] และระบบทำความเย็นของ Jones [4] ที่ใช้ถ่านชนิดพิเศษของ NASA JPL เอง เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ต้องการจะใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นและหาได้ง่ายในประเทศไทย เพราะอาจจะต้องใช้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมที่สภาวะสมดุล (p-T-x data) ของถ่านชนิดที่มีอยู่กับฟรียอน(R-22) ขึ้นมาใหม่ เพื่อที่จะนำข้อมูลมาใช้ในการจำลองเชิงเลข และในการออกแบบระบบต่อไป



ส่วนประกอบโดยสังเขป

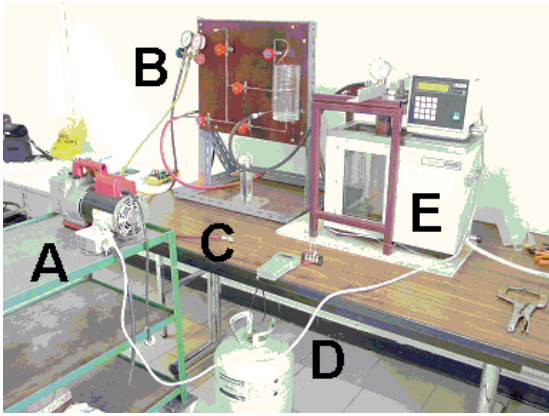
A บิม์สุญญากาศ, B ชุดสติปวาล์ว, C แท่งวัดระดับฟรียอนเหลว,

D ถังฟรียอน, E ท่อถ่านกัมมันต์ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

รูป 2 แผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อการทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมของถ่านกัมมันต์กับฟรียอน

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้ทดสอบ ได้จากบริษัทเคมีวิทย์ เป็นถ่านเม็ด ทำจากกะลามะพร้าว ขนาด mesh 8x16 มี void fraction ประมาณ 35% การจัดอุปกรณ์เพื่อการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2 และ 3 วิธีการทดสอบโดยสังเขปคือ นำถ่านกัมมันต์ปริมาณ 290 g บรรจุในท่อทองแดงขนาด 2 นิ้ว โดยอยู่ระหว่างผนังท่อกับแกนกลางลวดตาข่ายที่กันเป็นช่องระบายแก๊ส ก่อนการทดสอบจะทำสุญญากาศให้ระบบ พร้อมกับให้ความร้อนแก่ท่อบรรจุถ่านที่ 90 C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิรุ่น LAUDA D15 KP (อุปกรณ์ E) เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ถ่านแห้ง น้ำยาฟร็อนเหลวจะบรรจุในแท่งอะคริลิก (C) ที่ใช้วัดระดับ ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการเปิดชุดวาล์ว (B) เพื่อให้ไอฟร็อนเข้ามาดูดซับอยู่ในถ่าน จนความดันเพิ่มขึ้นถึงค่าที่ต้องการ รอให้มีการปรับสมดุลประมาณ 1 ชั่วโมง จึงคำนวณความเข้มข้น x ได้จากระดับของเหลวที่หายไป (C) จากนั้นจึงปิดวาล์วเข้าท่อถ่าน, เพิ่มอุณหภูมิที่ละค่า ตามต้องการ, และทำการบันทึกค่าความดัน ในช่วงนี้จะเป็นกระบวนการที่ความเข้มข้นคงที่ (isosteric) จากนั้นทำการทดลองซ้ำ โดยเพิ่ม x ขึ้นเป็นทั้งหมด 4 ค่า



รูป 3 ภาพถ่ายการจัตุอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติการดูดซับตามรูป 2

2.2 ผลการทดลองที่ได้

จากผลการทดลอง แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง p-T-x data ได้สมมุติให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่าย ที่ดัดแปลงจากสมการ Dubinin [13]

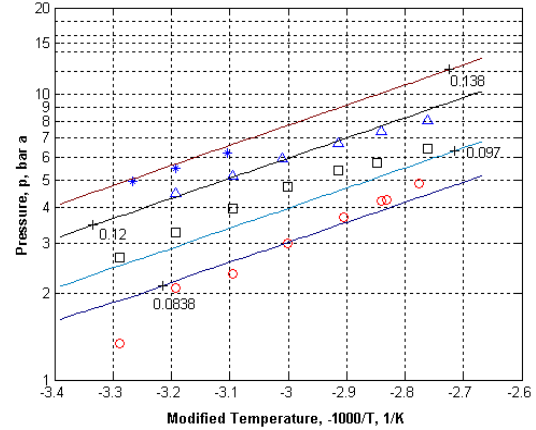
$$\ln x = C_0 + \frac{C_1}{T} + C_2 \ln p \quad (1)$$

p = absolute pressure in kPa

T = temperature in K

x = concentration = refrigerant mass / activated carbon mass

ค่าคงที่ไม่แสดงหน่วย ที่ได้จากการวิเคราะห์ least square ของข้อมูลผลการทดลอง ได้แก่ $C_0 = -8.05$, $C_1 = 856$, $C_2 = 0.527$



- experiment $x = 0.0838$ □ experiment $x = 0.097$
- △ experiment $x = 0.120$ * experiment $x = 0.138$
- + 4 best fit isosteric contour lines from equation 1

รูปที่ 4 ผลการทดลองคุณสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์และฟร็อน-22 แสดงบนแผนภาพคลาปีรอง

ข้อมูลจากการทดลอง และเส้นกราฟความเข้มข้นคงที่ ซึ่งคำนวณจากสมการ (1) สำหรับความเข้มข้นที่ใช้ทดลองทั้ง 4 ค่า ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ในรูปของแผนภาพคลาปีรอง ถึงแม้ว่าสมการดังกล่าวจะทำนายความดันต่ำเกินไปที่ x ค่าน้อย และสูงเกินไปที่ x ค่ามาก แต่ก็ยังพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดีกว่า สมการในรูป Dubinin-Astakhov [2] ที่มักนิยมใช้กับคู่สารชนิดอื่น และยังสามารใช้คำนวณได้สะดวกกว่า เพราะไม่ต้องคำนวณสภาวะอิ่มตัวอีกด้วย

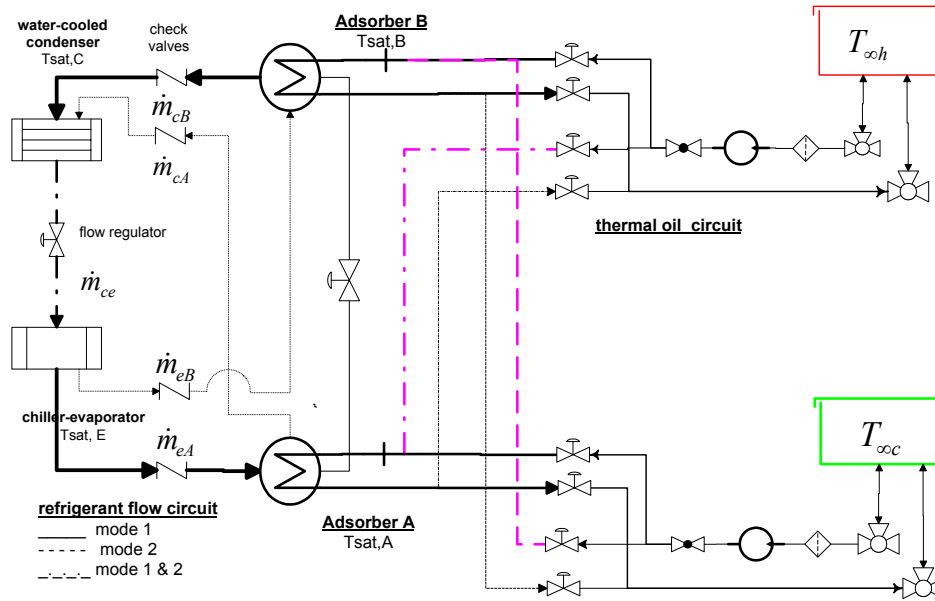
3. การจำลองเชิงเลข

เนื่องจากระบบดูดซับนี้ เป็นวัฏจักรที่มีการทำงานแบบสภาวะไม่คงที่ในตัวเอง (inherently unsteady) การจำลองระบบที่สมบูรณ์จึงทำได้ยาก และยังมีอยู่น้อย การวิเคราะห์ระบบชนิดนี้มักจะใช้กับแบบเบดเดี่ยว และไม่คิดผลของอุปกรณ์อื่นในวงจรสารความเย็น [10] ในบทความนี้จะทำการจำลอง พฤติกรรมพลวัต (dynamic behavior) ของระบบแบบเบดคู่ (double-bed) ที่มีการสลับการทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาโปรแกรมที่มีความสมบูรณ์ ให้เป็นเครื่องมือในการทดลองเชิงเลข (numerical experiment) และออกแบบระบบ สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ต่อไป ในงานนี้จะได้เสนอตัวอย่างของคาบวัฏจักรที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ

3.1 ระบบที่ใช้ในการจำลอง

ระบบทำความเย็น แบบดูดซับอย่างง่าย ดังรูป 5 ประกอบด้วย แอดซอร์เบอร์เบด 2 อันคือ A,B ทำงานสลับกัน เพื่อให้การทำงานต่อเนื่อง และรักษาอุณหภูมิไอวาไปเรเตอร์ให้คงที่ เช่นเมื่อเบด A อยู่ในจังหวะดูดซับ เบด B จะอยู่ในจังหวะคาย การสลับการทำงานทำได้โดยการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วของวงจรน้ำมันระเหยความร้อน ตาม

คาบเวลาที่ตั้งไว้เพื่อเลือกโหมด (mode) การทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ



รูป 5 แผนผังการทำงานของระบบดูดซับแบบคู่ที่ใช้ในการจำลอง

โหมด 1, น้ำมันอุณหภูมิห้อง $T_{\infty c}$ ต่อกับเบต A (ดูด) น้ำมันร้อน $T_{\infty h}$ ต่อกับเบต B (คาย) ตามที่แสดงด้วยเส้นทึบในรูป 5

โหมด 2, น้ำมันอุณหภูมิห้อง $T_{\infty c}$ ต่อกับเบต B (ดูด) น้ำมันร้อน $T_{\infty h}$ ต่อกับเบต A (คาย) ตามที่แสดงด้วยเส้นประในรูป 5

วาล์วกันกลับในวงจรสารความเย็นทำให้คอนเดนเซอร์ต่อกับเบตร้อน (desorbing bed) หรือไม่ต่อกับเบตใดเลย และอีวาโปเรเตอร์ต่อกับเบตเย็น (adsorbing bed) หรือไม่ต่อกับเบตเลย ตลอดเวลา

ในที่นี้จะทำการจำลองพฤติกรรมของส่วนของวงจรสารความเย็นเท่านั้น ส่วนวงจรมัน จะถือว่ามันจะมีอุณหภูมิคงที่เป็น $T_{\infty h}$ หรือ $T_{\infty c}$ เท่านั้นเนื่องจากอัตราการไหลของมันมีค่ามากพอ

การออกแบบเบื้องต้นของขนาดอุปกรณ์ต่างๆ จะคิดจากค่าพลังงานเฉลี่ย โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีอิทธิพลในอีวาโปเรเตอร์ 5°C ภาระความเย็นเป็นเครื่องทำน้ำเย็นขนาดจิว (1 g/s) อุณหภูมิมีอิทธิพลในคอนเดนเซอร์แบบน้ำหล่อเย็นเป็น 35°C ความหมายของสัญลักษณ์และค่าของปริมาณอื่นๆในแบบจำลองได้สรุปไว้ในตาราง ๓1

นอกจากข้อมูลคุณสมบัติการดูดซับที่ได้ทำการทดลอง แล้วข้อมูลคุณสมบัติอื่น ที่ใช้ในการคำนวณตามที่แสดงในตาราง ได้มาจากเอกสารอ้างอิงอื่นๆของวัสดุที่ใกล้เคียงกัน และ สมมุติให้มีค่าคงที่

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการพื้นฐานของวงจรสารความเย็น อาจแยกได้เป็นสมการที่ใช้สำหรับ cooling part คือสมการสำหรับ เบตที่เย็นกว่ากับอีวาโปเรเตอร์ และ heating part คือสมการสำหรับ เบตร้อนกับคอนเดนเซอร์ ทั้ง cooling part และ heating part จะมีลักษณะสมการเหมือนกัน ยกเว้นแตกต่างกันเพียง อุณหภูมิของน้ำมันถ่ายเทความร้อน และทิศทางการไหลของสารความเย็นเท่านั้น สมการของแต่ละ part ยังสามารถแบ่ง

ออกได้เป็น 4 กลุ่มฟังก์ชันตามวิธีการเชิงเลข ที่จะใช้ในโปรแกรม ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะ cooling part

1. การอนุรักษ์มวลสารความเย็น สำหรับ แอดซอร์เบเตอร์

$$f_1 = \rho_c \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^R 2\pi r L x dr \right] - \dot{m}_{e2a} = 0 \quad (2)$$

พจน์แรกคือมวลสารความเย็นทั้งหมดที่ถูกดูดซับอยู่ในเบต ส่วน \dot{m}_{e2a} เป็นอัตราการไหลของสารความเย็นใน cooling part จากอีวาโปเรเตอร์เข้าสู่เบต A หรือ B ขึ้นอยู่กับโหมดการทำงาน (ถ้าเป็น heating part จะหมายถึงอัตราการไหลจากเบตออกสู่คอนเดนเซอร์)

ค่า x ที่ตำแหน่งต่างๆในแอดซอร์เบเตอร์ ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ตามสมการสมดุลการดูดซับ (1) ที่ได้จากการทดลอง เราสมมุติให้ความดันมีค่าสม่ำเสมอได้ หรือ $\partial p / \partial r = 0$ เพราะจากการวิเคราะห์ order of magnitude ของการไหลในวัสดุพอร์น [8] พบว่า flow time scale มีค่าน้อยกว่า transient conduction time scale หลายเท่า

ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแอดซอร์เบเตอร์ จะมีความสำคัญมากกว่า เนื่องจาก Biot number มีค่าสูง เพราะถ่านเม็ดนำความร้อนได้ไม่ดี และเนื่องจากแอดซอร์เบเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญทำหน้าที่ขับเคลื่อนระบบ จึงต้องมีการจำลองโดยละเอียด โดยคำนวณ สมการการนำความร้อนแบบ 1 มิติในแนวรัศมีของแอดซอร์เบเตอร์

$$\frac{k_c}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} + k_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \rho_c H \frac{\partial x}{\partial t} = \rho_c (C_c + x C_r) \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (3)$$

ถึงแม้ว่าเบตที่จะสร้างขึ้นจริง จะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก แต่เราจะใช้แบบจำลองอย่างง่ายที่คล้ายกัน คือเป็นแบบถ่านทรงกระบอกซ้อนอยู่ด้านนอกของท่อน้ำมันตามความยาว โดยไม่คิดผลของครีป ทั้งน้ำมันร้อนและเย็นจะไหลในท่อเดียวกันนี้ดังรูป 6 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการ (3) ได้แก่

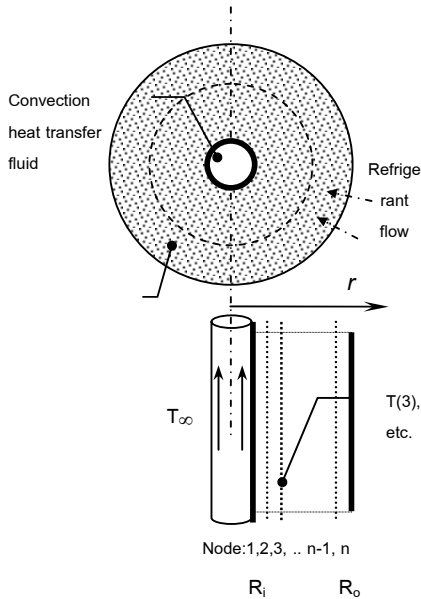
- convection wall (internal)

$$h_f (T_\infty - T_{\text{pipe}}) = (\rho C S)_{\text{pipe}} \left(\frac{\partial T_{\text{pipe}}}{\partial t} \right) - k_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r=R_i} \quad (3.1)$$

โดยที่เราคิดพลวัตความร้อนของท่อ เป็นแบบศูนย์มิติได้ เพราะ Biot number ของท่อทองแดงมีค่าน้อยมาก T_{pipe} ก็คืออุณหภูมิถ่านที่รัศมีด้านในที่ node T_1 นั้นเอง และให้ $T_{\infty h}$ หรือ $T_{\infty c}$ มีค่าคงที่

- adiabatic wall (external)

$$\left(\frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r=R_o} = 0 \quad (3.2)$$



รูป 6 แผนผังแอดชอปเบอร์เบต และกริดในการคำนวณ

สมการ(3) ยังมีข้อสมมุติว่า ไม่คิดการพาความร้อน และ thermal capacity ของสารความเย็นระหว่างรูพรุนของเบต ที่มีค่าน้อย ความร้อนแฝงของการดูดซับ, H ได้จากการประมาณโดยสมการ Clausius-Clapeyron เมื่อ p, T ในสมการ (4) เป็นค่าบนเส้น isosteric

$$H = R_r \left[\frac{\partial(\ln P)}{\partial(1/T)} \right] \frac{T}{T_{\text{sat}}} \quad (4)$$

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล ผ่านเซ็คควาล์ว จาก อีวาโปรเรเตอร์ เข้าสู่แอดชอปเบอร์เบต (หรือ จากเบตไปสู่คอนเดนเซอร์ ถ้าเป็น heating part)

$$f_2 = \dot{m}_{e2a} - K_v \sqrt{(P_e - P_a)} = 0 \quad (5)$$

3. กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (การอนุรักษ์พลังงาน) สำหรับอีวาโปรเรเตอร์ (uniform-state transient process)

$$f_3 = \left(\frac{\partial mu}{\partial t} \right)_e + \dot{m}_{e2a} h_{ge} - \dot{Q}_w - \dot{m}_{ce} h_{fi} + M_e C_e \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_e = 0 \quad (6)$$

เมื่อภาวะของ อีวาโปรเรเตอร์ คือการให้น้ำเย็น

$$\begin{aligned} \dot{Q}_w &= \dot{m}_w C_w (T_{wi} - T_{wo}) \\ &= U_e A_e \left[\frac{T_{wi} - T_{wo}}{\ln \left(\frac{T_{wi} - T_e}{T_{wo} - T_e} \right)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

4. การอนุรักษ์มวลสารความเย็น สำหรับอีวาโปรเรเตอร์

$$f_4 = \left(\frac{\partial m}{\partial t} \right)_e + \dot{m}_{e2a} - \dot{m}_{ce} = 0 \quad (8)$$

ข้อสมมุติของสมการ คืออีวาโปรเรเตอร์เป็นแบบ flooded type และอยู่ในสภาวะอิ่มตัวเสมอ (6)(8) โดยที่มีคุณภาพไอเป็น $z_{r,e}$ กรณีที่เป็น heating part จะเปลี่ยนสมการ (6)(8) เป็น กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และ การอนุรักษ์มวลสารความเย็น สำหรับคอนเดนเซอร์ตามลำดับ

นอกจากนั้นเป็นสมการที่ใช้เชื่อมการไหลระหว่างคอนเดนเซอร์กับอีวาโปรเรเตอร์ ซึ่งใช้ค่าความดันอีวาโปรเรเตอร์ จาก cooling part และ ความดันคอนเดนเซอร์จาก heating part

$$\dot{m}_{ce} = K_{ce} \sqrt{(P_c - P_e)} \quad (9)$$

ข้อมูลคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารความเย็น (R-22) ได้จากการ interpolation จากไฟล์ข้อมูล [18]

3.3 วิธีกริดเชิงเลข

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลักได้แสดงใน flow charts ในตาราง ภา1 มีวิธีการคำนวณโดยสรุปดังนี้

1 เมื่อตั้งค่าเริ่มต้นแล้วโปรแกรมจะคำนวณโมดการทำงาน จากเวลา ว่าเบตใดอยู่ในจังหวะดูดซับ หรือจังหวะคาย สลับกันโมดละครั้งวัฏจักร ข้อมูลของเบต A หรือ B จะส่งให้เป็นข้อมูลของเบตใน cooling หรือ heating part ตามโมดการทำงาน

2 คำนวณสมการ (9) ที่จะเชื่อม cooling กับ heating part

3 เริ่มการคำนวณตัวแปรทั้ง cooling กับ heating part ที่สอดคล้องกับสมการ (2)-(8) ที่อธิบายพฤติกรรมของระบบทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย 2 adsorbers, evaporator, condenser ตัวอย่างของ cooling part มีตัวแปรหลักอยู่ในรูป

$$[y_1, y_2, y_3, y_4]_{cooling} = [P_a, \dot{m}_{e2a}, P_e, z_{r,e}] \quad (10)$$

ขั้นตอนนี้ต้องการหา y ที่จะทำให้ ค่าฟังก์ชันตามสมการ (2)(5)(6)(8) เป็นศูนย์ทั้งหมด

$$[f_1, f_2, f_3, f_4]_{cooling} = 0 \quad (11)$$

สมการ (11) มีสมการย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่จำนวนมาก การหาคำตอบจะใช้วิธี Newton-Raphson's [12] โดยการคำนวณ $\left[\frac{\partial f_i}{\partial y_j} \right]$ และ $[f_i]$ เชิงเลข และแก้สมการ

$$\left[\frac{\partial f_i}{\partial y_j} \right] [\Delta y_j] = [f_i] \quad (12)$$

เพื่อหา correction Δy_j จนกระทั่งค่าฟังก์ชัน f ลดลงต่ำกว่าเงื่อนไขการลู่เข้า (convergence criteria) จะได้ y_j เป็นคำตอบ

4 การคำนวณใน time domain จะเป็นแบบ implicit ที่มีควมเสถียร และใช้ Crank-Nicholson discretization scheme first-order accurate time derivatives

5 ในการเรียกโปรแกรมย่อยเพื่อคำนวณ f_i ตามสมการ (2) จะต้องใช้สมการ (3) ด้วย สมการนี้จะหาการกระจายของ T, x ใน adsorber ด้วยวิธีทาง finite difference โดยใช้ second-order accurate spatial derivatives, successive-over-relaxation (S.O.R.) iteration method

การหาอุณหภูมิ ที่แต่ละโหนด ก็จะใช้หาคำตอบด้วยวิธี Newton-Raphson's เช่นกัน

6 ความเข้มข้น, x ที่แต่ละโหนด หาได้จาก สมการสมดุลการดูดซับของถ่านกับ R-22 (1) ที่ได้จากการทดลอง

7 เมื่อเสร็จสิ้นการคำนวณของแต่ละ time step แล้วก็คำนวณโมดการทำงาน อีกครั้งหนึ่ง เพื่อคืนค่าข้อมูลที่ได้ กลับไปยังตัวแปรของเบตที่เหมาะสมก่อนที่เริ่มรอบ time step ต่อไป

โปรแกรมจำลองระบบนี้เขียนขึ้นบน Matlab 6.0

3.4 ปริมาณที่ได้จากการคำนวณ (post-processed quantities)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance, COP) หาได้จากค่าเฉลี่ยของความร้อนที่ถ่ายเทที่ อีวาโปเรเตอร์ และที่เบตรอน ในช่วงครึ่งความวัฏจักร

$$COP_{cycle} = \frac{\sum_{half-cycle} \dot{Q}_w}{\sum_{half-cycle} \dot{Q}_{in}} \quad (13)$$

เมื่อ Cooling capacity, \dot{Q}_w คัดจากความร้อนที่ระบายออกจากน้ำสู่อีวาโปเรเตอร์

Heat input, \dot{Q}_{in} คัดจากความร้อนที่ระบายจาก heat transfer medium เข้าสู่แอตซอมเบอร์

แต่ COP ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน เช่นอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ซึ่งมักจะไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบกับ ค่า COP ของระบบที่ย้อนกลับได้ (Carnot reversible cycle) ทางทฤษฎี คือ

$$COP_{rev} = \frac{1}{\frac{T_{con}}{T_e} - \frac{T_{max}}{T_{con}}} = \frac{1}{\frac{T_{con}}{T_e} - \frac{1}{\frac{T_{con}}{T_{max}}}} \quad (14)$$

เมื่อ T_{max} คืออุณหภูมิสูงสุดในระบบ คืออุณหภูมิของน้ำมันร้อนนั่นเอง เราจะได้อัตราส่วนเป็น ตัวแปรไร้มิติ normalized COP

$$NCOP = COP_{cycle} / COP_{rev} \quad (15)$$

บทความนี้จะเสนอการแสดงผลด้วยกลุ่มไร้มิติที่ได้อาจการ normalized ด้วย characteristic scales ที่เหมาะสม ได้แก่

Normalized bed-switching frequency,

$$w = \left(\frac{\rho_c C_c}{k_c} \right) \frac{2L_c^2}{t_{fc}} \quad (16)$$

$$L_c = \text{characteristic length scale} = R_o - R_i = 2 \text{ cm}$$

Normalized specific cooling capacity,

$$NSCC = \frac{\sum \dot{Q}_w}{t_{fc} M_c} \left(\frac{\rho_c C_c}{k_c} \right) \frac{L_c^2}{h_{fge} x_0} \quad (17)$$

ความถูกต้องของแบบจำลองได้มีการทดสอบโดย

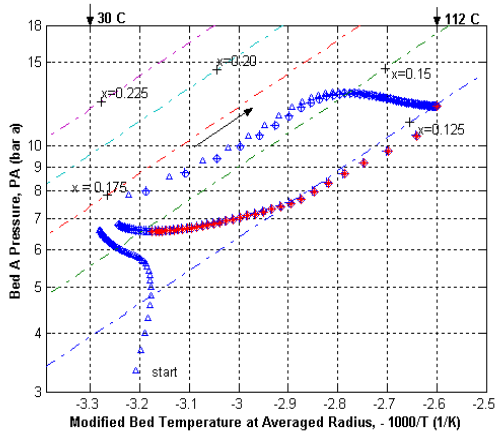
1 การเปลี่ยน spatial and time increment พบว่าไม่มีผลต่อกรคำนวณ (grid independent)

2 มวลรวมของสารความเย็นที่มีอยู่ในระบบมีค่าคงที่ตลอดเวลา

3 ทดลองใช้โปรแกรมจำลองระบบเบตคู โดยใช้ข้อมูลจากผลการวิจัยอื่น แต่เป็นคู่สารถ่านกัมมันต์+เมธานอล [16][18] พบว่าได้ค่า COP ใกล้เคียงกัน

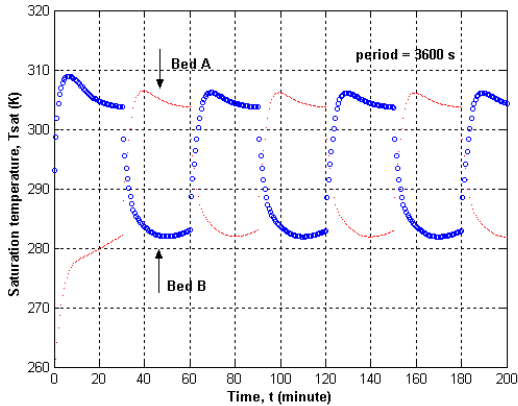
3.5 ผลการคำนวณ

รูปที่ (7) ถึง (11) แสดงผลการจำลอง ที่ได้จากกรณี คาววัฏจักร, $t_c=3600$ s

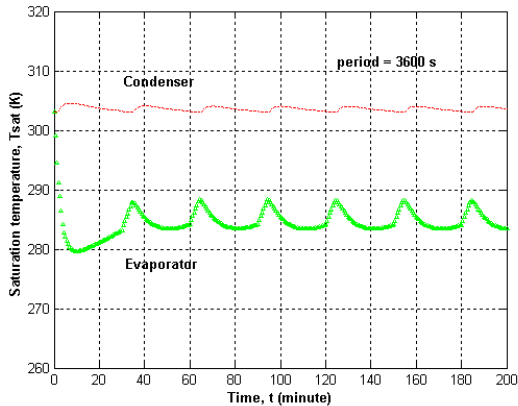


$\Delta = 1^{st}$ cycle, $+ = 2^{nd}$ cycle,
 $O = 3^{rd}$ cycle, plotted every 37.5 s

รูปที่ 7 ความดันและอุณหภูมิที่กึ่งกลางของแอดซอร์เบอ A จากการคำนวณ แสดงบนแผนภาพคลาปีรอง พร้อมด้วยเส้นความเข้มข้นคงที่ (isosteric contours) กรณี คาววัฏจักร, $t_c=3600$ s

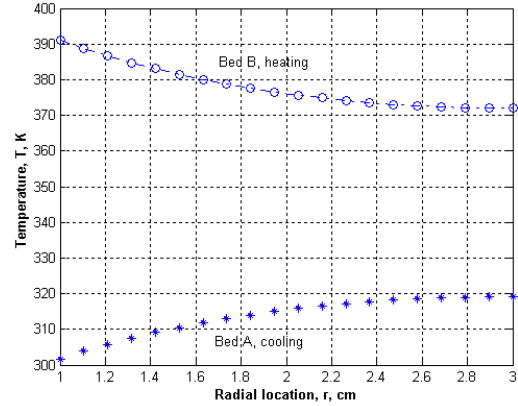


รูปที่ 8 บันทึกอุณหภูมิมีมิตัวของแอดซอร์เบอ

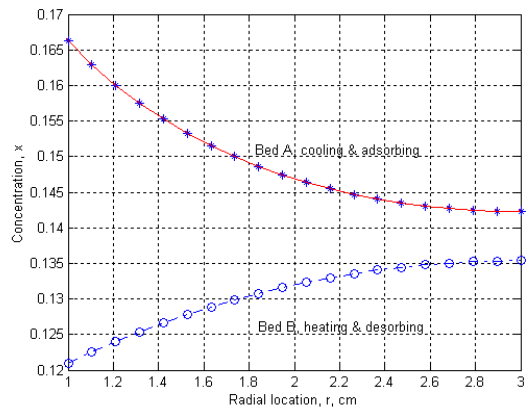


รูปที่ 9 บันทึกอุณหภูมิมีมิตัวของคอนเดนเซอร์ และอีวาโปเรเตอร์

จากรูป 7 และ 8 แสดงพฤติกรรมพลวัตของแอดซอร์เบอเบต ที่มีกลการสลับการทำงานอย่างต่อเนื่อง จะเห็นว่ามีการปรับตัวเข้าสู่ limit cycle ได้ภายใน 2 วัฏจักรเท่านั้น และมีความเข้มข้นสูงสุด กับต่ำสุด ต่างกัน 5% ซึ่งถือว่าน้อย เมื่อเทียบกับคู่สารชนิดอื่น [2] แต่ก็สามารถทำงานได้ คือมีความดันในคอนเดนเซอร์ สูงกว่าความดันในอีวาโปเรเตอร์พอควร ดังจะเห็นได้จากรูป 9 แต่อุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ สูงเกินกว่าที่ออกแบบด้วยค่าเฉลี่ยไว้อีกประมาณ 7 C

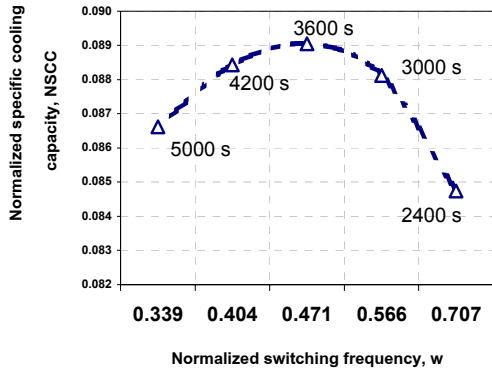


รูปที่ 10 การกระจายอุณหภูมิ ภายในแอดซอร์เบอ ณ เวลา 200 นาที คาววัฏจักร $t_c = 3600$ s

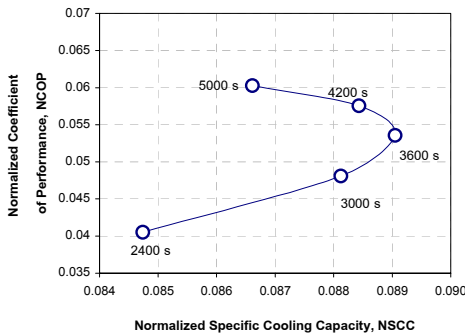


รูปที่ 11 การกระจายความเข้มข้น ภายในแอดซอร์เบอ ณ เวลา 200 นาที คาววัฏจักร $t_c = 3600$ s

การที่ความสามารถในการทำความเย็นลดลงไปนี้ สังเกตได้จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ที่ลดลงไป กลับเพิ่มขึ้น ณ ปลายครึ่งวัฏจักรก่อนที่จะสลับการทำงาน เนื่องมาจากสารดูดซับได้ดูดสารความเย็นเข้าไปจนเกือบเต็มความสามารถแล้ว ดังจะเห็นจากรูปที่ 10 และ 11 ที่แสดงการกระจายความเข้มข้นในเบตทั้งสอง ก่อนจะสลับการทำงานเล็กน้อย ความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างกราฟ 2 เส้น คือความสามารถในการหมุนเวียนสารความเย็น ที่อาจเรียก equivalent volumetric efficiency จะเห็นว่ามีความเฉพาะบริเวณด้านในที่ติดกับท่อ หรือ 50% ของปริมาตรถ่านเท่านั้น ที่มีความแตกต่างมากพอจะเกิดการดูดซับได้



รูปที่ 12 กราฟระหว่าง SCC vs switching frequency ในรูปตัวแปรไร้มิติ ที่คาบวัฏจักร, t_c 5 ค่า



รูปที่ 13 กราฟระหว่าง NCOP vs NSCC ที่คาบวัฏจักร, t_c 5 ค่า

แบบจำลองนี้ยังสามารถนำไปใช้ ศึกษาผลของคาบวัฏจักรที่มีต่อสมรรถนะของระบบได้ ดังรูปที่ 12 จะเห็นว่าคาบวัฏจักรที่ให้ความสามารถในการทำความเย็นสูงสุด (optimized cycle time) อยู่ที่ประมาณ 3600 วินาที หรือ 0.47 ในรูปตัวแปรไร้มิติ

รูปที่ 13 แสดงว่า ถ้าคาบวัฏจักรนานกว่า 5000 s ออกไปอีกสมรรถนะของระบบ (NCOP) จะเริ่มเข้าใกล้ค่าสูงสุดเช่นกัน เนื่องจากอุณหภูมิของเบตจะสม่ำเสมอขึ้น ไม่สามารถดูดซับเพิ่มอีก ทำให้อุณหภูมิของโปรเตอร์เพิ่มขึ้นปลายวัฏจักร ตามที่จะเห็นได้จากรูปที่ด้วย แต่ ณ จุดที่ NCOP สูงสุดนั้น NSCC ได้ตกลงต่ำมากแล้ว (เราไม่ได้รันโปรแกรมเกินไปจากจุดนี้เพราะต้องใช้เวลานานมาก) นอกจากนี้ระบบจริงยังเกิดความร้อนสูญเสียในวงจรน้ำมันมากขึ้น ที่ไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้น จึงควรเลือกใช้คาบวัฏจักร ณ จุดที่ SCC ของระบบสูงสุด จากแบบจำลองนี้คือ $t_c = 3600$ s, $SCC = 2$ W/kg carbon, $COP = 0.11$ ซึ่งจะน้อยกว่าระบบอัดไอประมาณ 20-30 เท่า

4. สรุปผลการศึกษา และงานในอนาคต

งานวิจัยนี้ทำให้เห็นศักยภาพที่จะนำ คู่สารถ่านกัมมันต์ ชนิดที่หาได้ง่ายในประเทศ กับ R-22 มาใช้ในระบบดูดซับ ที่ทำความเย็นได้ด้วยความร้อนโดยตรง แบบจำลองเชิงเลขที่พัฒนาขึ้น สามารถแสดงพฤติกรรมพลวัตของระบบเบตคู่ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการออกแบบ

และกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของระบบที่จะสร้างขึ้นจริงต่อไป เทคนิคของโปรแกรม ยังจะนำไปใช้ได้กับกระบวนการ batch process อื่นๆที่มีการสลับการทำงาน เช่น pressure swing adsorption เป็นต้น ได้ด้วย

ผลการคำนวณทำให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบนี้ยังมีค่าน้อยกว่าแบบอื่น แต่จะสามารถแก้ไขด้วยการเพิ่มครีบบระบายความร้อนในเบต เพื่อให้ถ่านมีอุณหภูมิสม่ำเสมอมากขึ้น และการใช้สารเคมีประสานถ่าน เพื่อเพิ่มการนำความร้อนระหว่างท่อถ่านให้มากขึ้น งานในอนาคตจะนำผลการทดสอบกับ R-134a ที่ไม่เป็นสาร CFC และสมรรถนะของต้นแบบจริงมาเสนอต่อไป

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับชนิดนี้ ไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนเพอร์เซอร์ ดังนั้นจึงลดขั้นตอนการเปลี่ยนรูปพลังงาน และยังคงการพึ่งพากระแสไฟฟ้าที่ต้องนำเข้าเชื่อเพลิงจากต่างประเทศ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีการใช้พลังงานจำนวนมากในการทำความเย็น และมีศักยภาพของแหล่งพลังงานความร้อนในท้องถิ่นอยู่อีกมากมาย เช่นกรณีของประเทศไทย โดยที่แหล่งพลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบ อาจจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานความร้อนเหลือจากไอเสียเครื่องยนต์หรือจากไอน้ำกลั่นตัว หรือ โดยเฉพาะจากการเผาไหม้ของวัสดุชีวมวล ในภาคการเกษตรต่างๆ ที่มีศักยภาพทางความร้อนที่ยังมิได้ใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ และมีราคาถูกอยู่มาก วิธีการทำความเย็นจากความร้อนได้โดยตรงนี้ จึงมีประโยชน์มากในกรณีของประเทศไทย

นอกจากนี้การพัฒนาคู่สารทำงาน เช่นถ่านกัมมันต์ที่หาได้ง่าย และสารความเย็นกลุ่มฟรีออนที่ปลอดภัย และมีใช้กันแพร่หลาย ก็จะทำให้ต้นทุนของระบบถูกลงกว่าระบบแอมโมเนีย เพราะสามารถใช้อุปกรณ์มาตรฐานของระบบฟรีออนที่มีราคาถูกกว่าได้ จึงน่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะพัฒนาได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้สนับสนุนทุนส่งเสริมวิจัยรุ่นใหม่ สำหรับโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Critoph R E, Vogel R, "Possible adsorption pairs for use in solar cooling", International Journal of Ambient Energy, Vol 7, No 4, 1986
- [2] Critoph R E, "Evaluation of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycle", Applied Thermal Engineering, Vol 16, No 11, 1996
- [3] Douss N, Meunier F E, Sun L M, "Predictive Model and Experimental Results for a Two-Adsorber Solid Adsorption Heat Pump", Ind Eng. Chem. Research, Vol 27, pp. 310-316, 1988
- [4] Jones J, "Sorptions refrigeration research at NASA JPL", Heat recovery systems & CHP, Vol, 13, No 4, 1993

- [5] Llobet J, and Goetz V, "Rotary system for the continuous production of cold by solid-gas sorption: modeling and analysis of energy performance", International Journal of Refrigeration, Vol 23, pp. 609-625, **2000**
- [6] Meunier F;"Solid sorption: an alternative to CFCs", Heat recovery systems & CHP, Vol, 13, 4, **1993**
- [7] Meunier F, and Douss N; "Performance of Adsorption Heat Pumps: Active Carbon-Methanol and Zeolite-Water Pairs", ASHRAE Transactions, pp. 267-274, **1990**
- [8] Middleman S; "An Introduction to Fluid Dynamics: Principles of Analysis and Design", John Wiley & Sons, **1997**
- [9] Pons M and Guilleminot J.J; "Design of an Experimental Solar-Powered Solid-Adsorption Ice Maker", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol 108, pp. 332-337, **1986**
- [10] Restuccia G, Freni A, Maggio; "A zeolite-coated bed for air conditioning adsorption systems: parametric study of heat and mass transfer by dynamic simulation", Applied Thermal Engineering, Vol 22, **2002**
- [11] Shelton. S.V.; "Solid adsorbent heat pump system", United State Patent, No.4,610,148, **1986**
- [12] Stoecker W F, "Design of Thermal Systems", McGraw-Hill, USA, **1989**
- [13] Tamainot-Telto Z, and Critoph R E;"Adsorption refrigerator using monolithic carbon-ammonia pair", International Journal of Refrigeration, Vol 20, 2, pp. 146-155, **1997**
- [14] Tiansuwan J, Kiatsiroat T, and Hirunlabh J; "Activated carbon-Ethanol: an alternative working substance for adsorption cooling system", Journal of Energy, Heat and Mass Transfer, Vol 17, pp., 65-73, **1995**
- [15] Wang R.Z.; "Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation", International Journal of Refrigeration, Vol 24, pp.602-611, **2001**
- [16] Wang R Z, Xu Y X, Wu J Y, Wang W ; "Experiments on Heat Regenerative Adsorption Refrigerator and Heat Pump", International Journal of Energy Research, Vol 22, pp. 935-941, **1998**
- [17] Zheng W, Worek W M, Nowakowski G ; "Performance of multi-bed sorption heat pump systems", International Journal of Energy Research, Vol, 20, , pp., 339-350, **1996**
- [18] ASHRAE, Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, USA, **1993**