บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาเพื่อหาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น(ΔT) ที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบนั้น สิ่งที่จำเป็นต้องทราบเป็นอันดับแรกคือ กลไกการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ตั้งแต่ท่อความร้อนเริ่มรับความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นทำงาน เพื่อให้การวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง โดยที่จะพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดโดยใช้สมมุติฐานการเริ่มต้นทำงานที่ได้ตั้งเอาไว้แล้ว เป็นแนวทางเพื่อให้ได้ทราบถึงตำแหน่งที่ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานอย่างแท้จริง

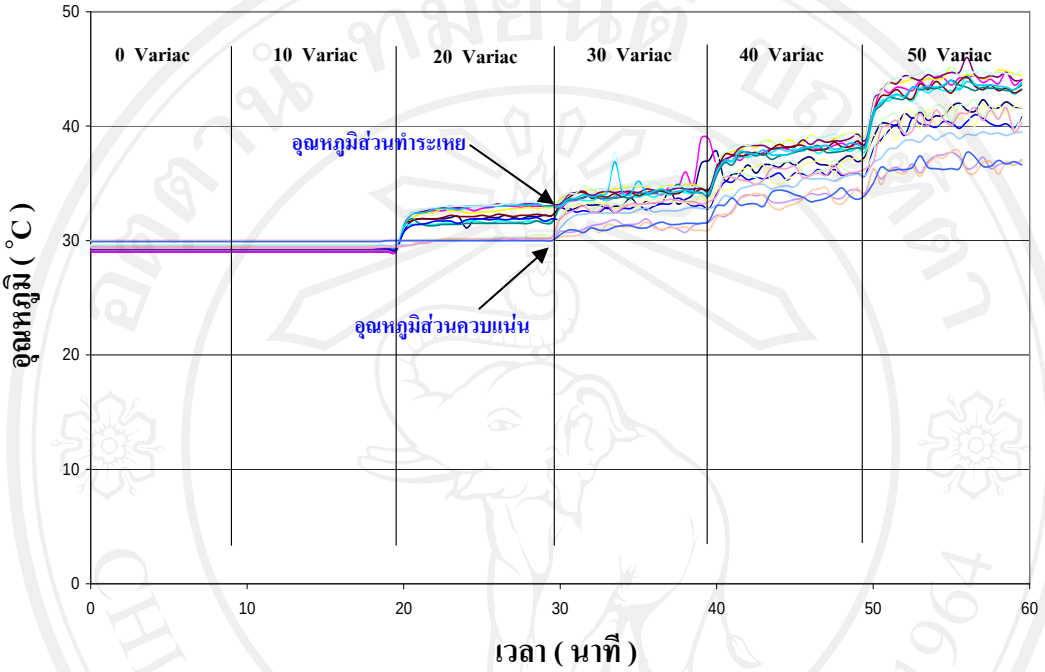
4.1 นิยามสภาวะเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบนั้น เกิดจากการไหลเวียนของสารทำงานภายในตัวท่อความร้อน และการไหลเวียนนี้เกิดขึ้นจากการขยายตัว และหดตัวจากการระเหยและการควบแน่นของสารทำงาน เมื่อได้รับความร้อนและระบายความร้อนตามลำดับ เนื่องจากการไหลเวียนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารทำงานภายในตัวท่อนี้เอง ทำให้ท่อความร้อนชนิดนี้เกิดการเริ่มต้นทำงานได้ Soponpongpipat et al. (2008) พบว่าในช่วงของการเริ่มต้นทำงานนั้นอาจเกิดการขัดขวางการไหลเวียนของสารทำงาน ซึ่งทำให้ท่อความร้อนไม่สามารถส่ง- ผ่านความร้อนได้ และ เกิดการแห้งเนื่องจากขาดของเหลวเข้าไปสัมผัสพื้นผิวส่วนทำระเหย การแห้งในลักษณะนี้เรียกว่าเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out) และเงื่อนไขการเริ่มเดินท่อความร้อนที่ทำให้ท่อความร้อนทำงานได้โดยไม่เกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้นเรียกว่า การเริ่มต้นทำงาน(Operating Startup)

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ใหม่ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบนี้น้อยมาก และ ที่ผ่านมาจะเน้นเกี่ยวกับการศึกษาในเชิงของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจนถึงปัจจุบันยังไม่มีใครทำการศึกษาถึงการทดลองเชิงปริมาณ ด้วยเหตุนี้ในการทดลองของงานวิจัยนี้จึงต้องกำหนดเงื่อนไขของคำว่าเริ่มต้นทำงาน โดยที่จะกำหนดการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนเมื่อสารทำงานภายในท่อความร้อนเกิดการสั่น (การไหลเวียนของสารทำงาน) ให้มีค่าของแอมปลิจูด การสั่นของสารทำงานให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 องศาเซลเซียส และให้มีค่าความถี่การสั่นของสารทำงานให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 รอบ/วินาที หากค่าของแอมปลิจูด และความถี่การสั่นของสารทำงานภายในส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้จะไม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นิยามว่าท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงาน สาเหตุที่เลือกช่วงการสั่นของแอมปลิจูด และ ความถี่การสั่นของสารทำงานอยู่ที่ 0.2 องศาเซลเซียส และ 0.1 รอบ/วินาที เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้านี้แล้วพบว่าถ้าค่าของแอมปลิจูด และ ความถี่การสั่นของสารทำงานมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ ท่อความร้อนชุดนั้นจะไม่ทำงานซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่าเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out)



รูปที่ 4.1 กราฟการสั่นของสารทำงานที่ได้จากการทดลอง

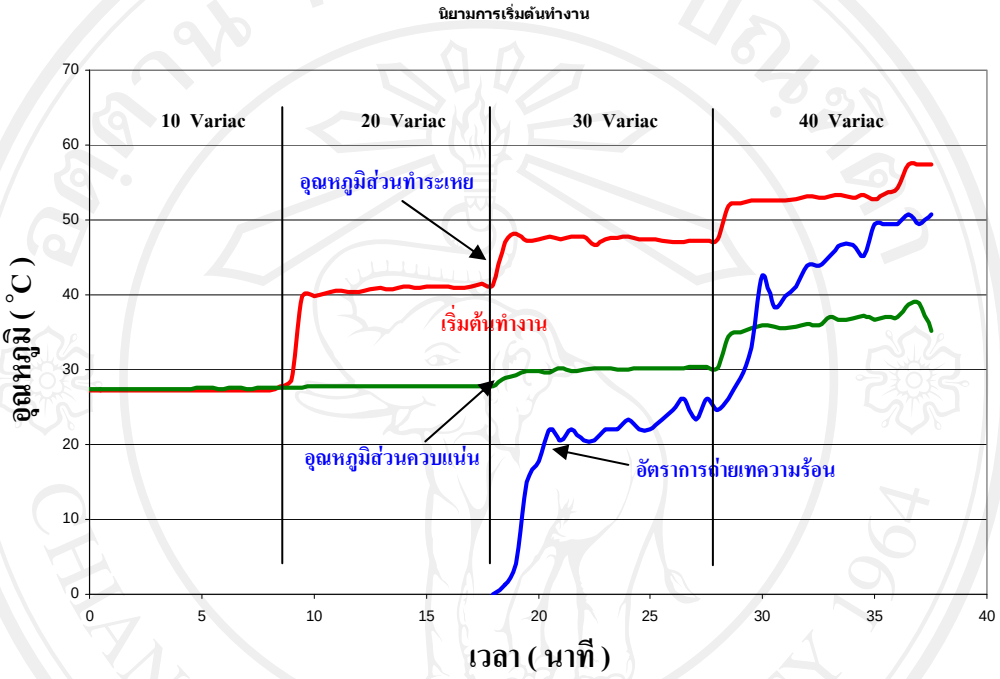
จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟการสั่นของสารทำงานและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารทำงานภายในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นที่สภาวะการเริ่มต้นทำงาน จะเห็นได้ว่าตอนเริ่มต้นที่แรงดันไฟฟ้าที่ 0 - 10 Variac (Variac เป็นอุปกรณ์ในการปรับแรงดันไฟฟ้าดูในหัวข้อที่ 3.4.3) อุณหภูมิของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแทบจะมีอุณหภูมิคงที่ เมื่อทำการเพิ่มแรง ดันไฟฟ้าเป็น 20 Variac อุณหภูมิของส่วนทำระเหยจะเพิ่มขึ้นแล้วเกิดการสั่นขึ้นเป็นบางท่อ และ อุณหภูมิของส่วนควบแน่นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่เกิดการสั่นของสารทำงาน เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟ ฟ้าจาก 20 Variac ไปเป็น 30 Variac จะพบว่าอุณหภูมิของส่วนทำระเหย และอุณหภูมิของส่วนควบ แน่นจะเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนและเกิดการสั่นของสารทำงานภายในท่อความร้อนขึ้น ดังนั้นจึงนิยามจุดนี้ให้เป็นจุดที่ท่อความร้อนเริ่มต้นทำงาน

แต่เนื่องจากการที่ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบมีการเชื่อมต่อกันในลักษณะของวงรอบ โดยสารทำงานสามารถเคลื่อนที่วนไปมาได้อย่างอิสระ ดังนั้นจากการทดลองในบางครั้งพบว่าการเกิดการสั่นในแต่ละท่อนั้นอาจไม่เกิดขึ้นตลอดเวลา อาจจะเกิดขึ้นแล้วหายไป หรืออาจจะเกิดขึ้นสลับท่อกันไปเรื่อยๆ ทำให้การจะหาสภาวะเริ่มต้นการทำงานของท่อหนึ่งท่อใดที่เป็นแบบถาวรนั้นทำได้ยาก ด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เหตุผลเหล่านี้เอง จึงทำให้การนิยามสภาวะการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ต้องมองเป็นภาพรวมคือ หากเกิดการสั่นขึ้นมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนโค้งเลี้ยวโดยตลอดเวลา แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของการเกิด ให้ถือว่าเป็นสภาวะการเริ่มต้นทำงานทันที

หรือหากการวิเคราะห์จากการเพิ่มขึ้นและเกิดการสั่นของอุณหภูมิในส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่น นั้นไม่สามารถบ่งบอกสภาวะการเริ่มต้นทำงานได้ชัดเจน อาจจำเป็นต้องพิจารณาจากข้อมูลในส่วนอื่นประกอบ เช่น จุดที่ท่อความร้อนเริ่มต้นการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น



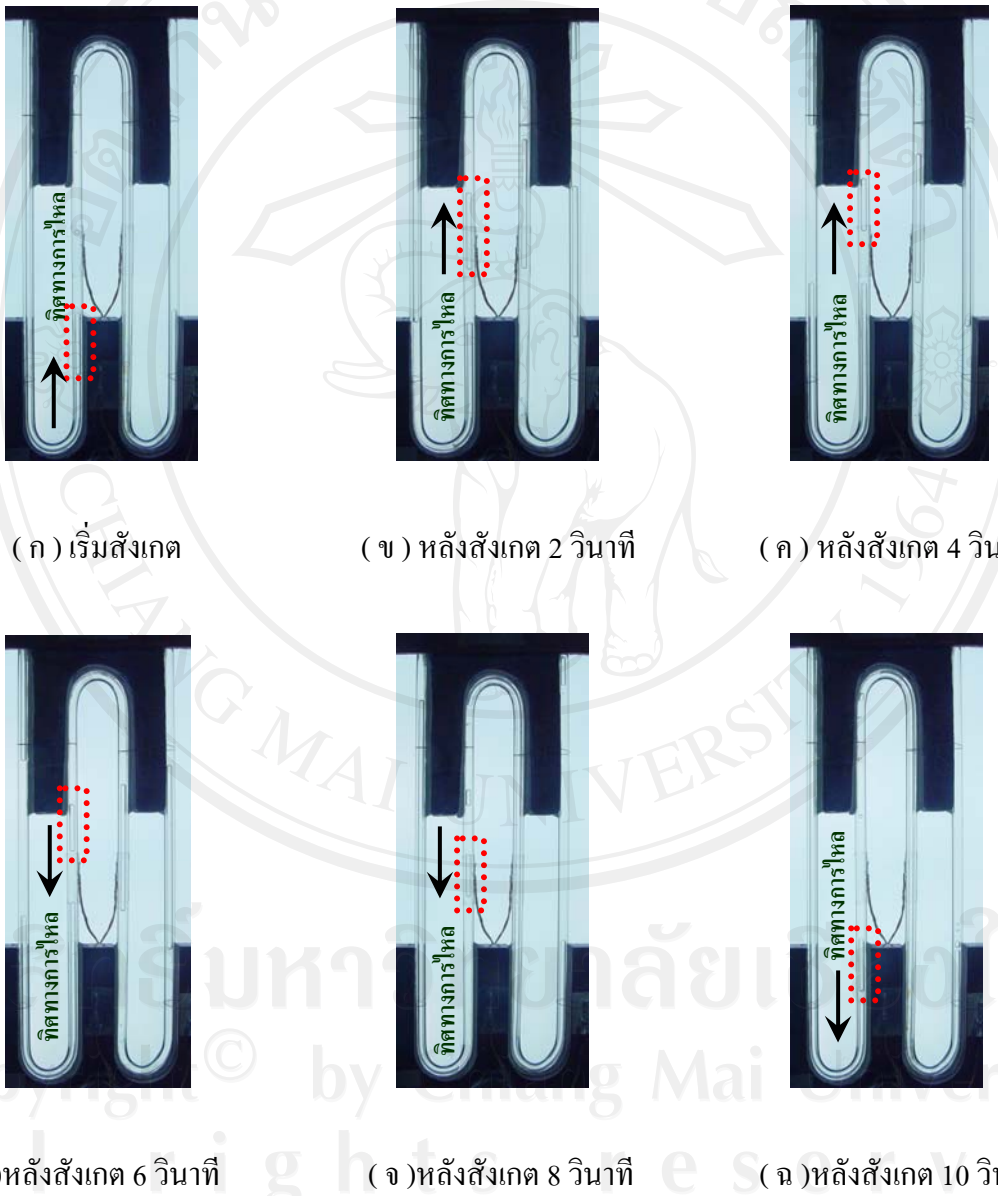
รูปที่ 4.2 นิยามที่ใช้กำหนดสภาวะการทำงานเริ่มต้น

จากรูปที่ 4.2 แสดงนิยามที่ใช้กำหนดสภาวะการทำงานเริ่มต้น ซึ่งสามารถกำหนดนิยามการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนได้เมื่อทำการให้ความร้อนแก่ท่อความร้อนแล้วพบว่าอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่นมีการเพิ่มขึ้นแล้วเกิดการสั่นขึ้น ซึ่งค่าการสั่นของแอมปลิจูด และความถี่ของการสั่นของสารทำงานอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ (0.2 °C และ 0.1 รอบ/วินาที ตามลำดับ) ดังนั้นจึงจะนิยามว่าจุดนี้เป็นจุดที่ท่อความร้อนเริ่มต้นทำงาน ดังแสดงในรูปของช่วงการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 30 Variac จะสามารถสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของส่วนทำระเหย และ ส่วนควบแน่นที่มีค่าแอมปลิจูดและ ความถี่ของการสั่นของสารทำงานอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ดังนั้นจะกำหนดจุดนี้ให้เป็นจุดที่เริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ถ้าหากในการทดลองไม่พบว่าเกิดการสั่นของสารทำงานที่ส่วนควบแน่นภายในท่อความร้อน แต่พบว่าเกิดการสั่นของสารทำงานที่ส่วนทำระเหยและมีการถ่ายเทความร้อนขึ้นก็จะกำหนดให้จุดที่เริ่มมีการถ่ายความร้อนให้เป็นจุดที่เริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปของช่วงการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 30 Variac

โดยที่การวัดค่าแอมปลิจูด และ ความถี่การสั่นของสารทำงานภายในท่อความร้อน แสดงในรูปที่ 4.3(ก) – 4.3(ฉ)



(ก) เริ่มสังเกต (ข) หลังสังเกต 2 วินาที (ค) หลังสังเกต 4 วินาที

(ง)หลังสังเกต 6 วินาที (จ)หลังสังเกต 8 วินาที (ฉ)หลังสังเกต 10 วินาที

รูปที่ 4.3 การวัดค่าแอมปลิจูด และ ความถี่การสั่นของสารทำงานภายในท่อความร้อน (Kammuang-lue,2008)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

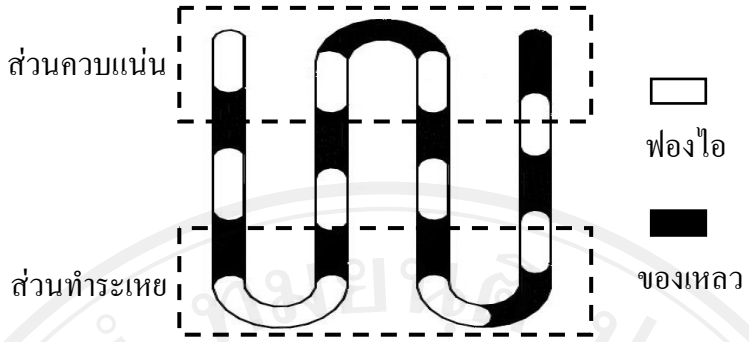
จากรูปที่ 4.3(ก) – 4.3(ฉ) แสดงการวัดค่าแอมปลิจูด และ ความถี่การสั่นของสารทำงานภายในท่อความร้อน ซึ่งในการวัดค่าแอมปลิจูด และ ความถี่นั้น จะทำการวัดปริมาณของฟองไอที่เคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปสู่ส่วนควบแน่นและจากส่วนควบแน่นเคลื่อนที่กลับไปยังส่วนทำระเหยในรูปที่ 4.3(ก) จากนั้นจะทำการพิจารณาฟองไอในกรอบสี่เหลี่ยมที่รับความร้อนจากส่วนทำระเหย กำลังจะเคลื่อนตัวออกจากส่วนทำระเหย หลังสังเกตเมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที ดังในรูปที่ 4.3(ข) พบว่าฟองไอที่มีความร้อนกำลังเคลื่อนที่ผ่านเทอร์โมคัปเปิล ที่ส่วนกันความร้อน และในขณะเดียวกันก็จะทำการบันทึกอุณหภูมิของฟองไอที่เคลื่อนที่ผ่านจุดนี้ด้วย (ฟองไอจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากรับความร้อนจากส่วนทำระเหย) และ เมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที ดังในรูปที่ 4.3(ค) พบว่าฟองไอเริ่มจะเคลื่อนเข้าสู่ส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนที่รับมาจากส่วนทำระเหย เมื่อเวลาผ่านไป 6 วินาที ดังในรูปที่ 4.3(ง) พบว่าฟองไอที่ถ่ายเทความร้อนจะเกิดการหดตัวลงและกำลังจะเคลื่อนตัวออกจากส่วนควบแน่น เมื่อเวลาผ่านไป 8 - วินาที ดังในรูปที่ 4.3(จ) พบว่าฟองไอที่ถ่ายเทความร้อนแล้วกำลังเคลื่อนที่ผ่านเทอร์โมคัปเปิลที่ส่วน-กันความร้อน และในขณะเดียวกันก็จะทำการบันทึกอุณหภูมิของฟองไอที่เคลื่อนที่ผ่านจุดนี้ด้วย (ฟอง-ไอจะมีอุณหภูมิที่ต่ำเนื่องจากถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นแล้ว) และเมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที ดังในรูปที่ 4.3(ฉ) พบว่าฟองไอจะเคลื่อนที่เข้าไปยังส่วนทำระเหยเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง แล้วจะเคลื่อนที่ไปถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นอีกเป็นวัฏจักร ทำให้เราสามารถวัดอุณหภูมิของฟองไอที่เคลื่อนที่ผ่านเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้กับชุดท่อความร้อนนั้นมีทั้งอุณหภูมิสูง และ ต่ำ เมื่อเกิดการไหลเวียนของสารทำงานขึ้นภายในท่อความร้อนก็จะสามารถนำเอาอุณหภูมิที่วัดได้มาหาค่าแอมปลิจูด และความถี่การสั่นของสารทำงานภายในท่อความร้อนได้

4.2 วิเคราะห์การเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ

4.2.1 ปรากฏการณ์ภายในและสาเหตุของการเริ่มต้นทำงาน

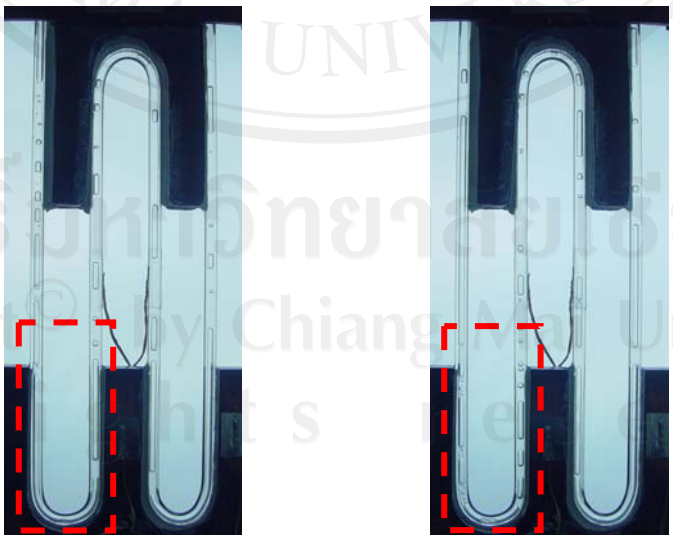
ภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบเริ่มต้นจากสภาวะหยุดนิ่ง สารทำงานสองสภาวะภายในท่อความร้อนจัดเรียงตัวเป็นแบบ Slug-train (ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวระหว่างของเหลวสลับกับฟองไอ) โดยทั่วทั้งท่อดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในโค้งรูปตัวยูในบริเวณส่วนทำระเหยมีทั้งก้อนของเหลวและฟองไอสลับกันไป หลังจากเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิระดับหนึ่ง สารทำงานที่อยู่ในท่อความร้อนเริ่มมีการเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากการขยายตัวของฟองไอเนื่องมาจากก้อนของเหลวที่อยู่ข้างเคียงได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่ง จากนั้นจะระเหยกลายเป็นไอและถ่ายเทมวลเข้าสู่ฟองไอ เมื่อฟองไอในโค้งเลี้ยวนั้นเกิดการขยายตัว ก็จะส่งผลทำให้สารทำ-งานในโค้งเลี้ยวที่อยู่ถัดไปเกิดการเคลื่อนที่และมีการขยายตัวของฟองไอเกิดขึ้นเช่นกัน จนในที่สุดสารทำงานจะมีการเคลื่อนที่ในทุกโค้งเลี้ยว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.4 การจัดเรียงตัวแบบ Slug-train ภายในท่อความร้อนแบบสั่น

นอกจากนี้ Kammuang-lue (2008) ยังพบว่าเงื่อนไขในการเริ่มเคลื่อนตัวของสารทำงานภายในท่อความร้อนนั้นสามารถใช้การคาดคะเนโค้งเลี้ยวแรกที่สารทำงานเริ่มเคลื่อนที่ ซึ่งโค้งเลี้ยวแรกนั้นต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้ คืออันดับแรกต้องเป็นโค้งเลี้ยวที่มีปริมาณฟองไอรวมในส่วนทำระ-เหยมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก)แต่ฟองไอที่มีความยาวคาบเกี่ยวตั้งแต่ส่วนทำระเหยไปจนถึงส่วนควบแน่นจะไม่นำมาพิจารณากับปริมาณฟองไอรวม เนื่องจากฟองไอดังกล่าวจะไม่มีการขยายตัวหรือมีการหดตัวน้อยมาก เพราะสารทำงานที่เกิดการระเหยแล้วถ่ายเทมวลเข้ามายังฟองไอดังกล่าวสามารถลอยไปควบแน่นได้โดยตรง ลำดับที่สองเป็นโค้งเลี้ยวที่มีรอยต่อระหว่างก้อนของเหลว และฟองไอในส่วนทำระเหยมากที่สุด หากมีจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีปริมาณฟองไอรวมเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากกว่าหนึ่งโค้งเลี้ยว ดังกรอบสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.5(ข)



(ก) (ข)

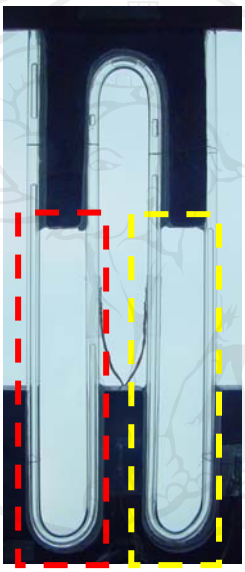
รูปที่ 4.5 ปริมาณฟองไอรวมในส่วนทำระเหยที่ใช้คาดคะเนการเริ่มทำงาน

Kammuang-lue (2008)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.2 ลำดับของปรากฏการณ์ภายในและสาเหตุที่ทำให้ท่อความร้อนไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้ตามปกติ

เมื่อพิจารณาลำดับเหตุการณ์ทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นในหัวข้อ 4.2.1 สามารถสรุปสาเหตุที่ทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้ตามปกติ หรือสาเหตุของการแห้งตั้งแต่เริ่มต้นได้ดังนี้ ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากการแห้งของฟิล์มของเหลวตั้งแต่เริ่มได้รับความร้อน เนื่องจากการที่ฟองไอขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้สามารถครอบคลุมส่วนทำระเหยทั้งหมดในทุกโค้งเลี้ยว ดังแสดงในกรอบสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.6 อันเป็นผลสืบเนื่องจากอัตราการควบแน่นที่น้อยกว่าอัตราการขยายตัวของท่อความร้อนเมื่อไม่มีของเหลวไหลเข้าไปยังส่วนทำระเหยจึงทำให้เกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้นหรือที่เรียกว่า Initial dry out



รูปที่ 4.6 ปริมาณฟองไอรวมในส่วนทำระเหยที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้ตามปกติ (Kammuang-lue,2008)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานเริ่มต้น

4.3.1 ผลของสารทำงาน

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าท่อความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อความร้อน ปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ก็ขึ้นอยู่กับสารทำงานด้วย ในการออกแบบท่อความร้อนโดยปกติแล้วจะต้องเลือกสารทำงานให้เหมาะสม อาทิเช่น มีอุณหภูมิการระเหย และควบแน่นเหมาะสมกับแหล่งอุณหภูมิที่จะนำไปใช้งาน ไม่กัดกร่อนวัสดุที่ใช้เป็นท่อมีความเหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการกระจายถ่ายเท ตลอดจนมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่ด้วยปัจจัยเพียงเท่านี้ยังไม่อาจคาดคะเนได้ว่าท่อความร้อนที่บรรจุสารทำงานที่เหมาะสมตามเงื่อนไขดังกล่าวจะสามารถเริ่มต้นทำงานและถ่ายเทความร้อนได้ เพื่อนำผลและแนวโน้มที่ได้รับจากการศึกษานี้ รวบรวมไว้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพิ่มเติมสำหรับการเลือกใช้สารทำงานที่เหมาะสมและสามารถคาดคะเนความเสี่ยงที่ท่อความร้อนนั้นๆ จะไม่สามารถทำงานได้หากได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาผลของสารทำงานที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ พบว่ากรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปลี่ยนสารทำงานจาก R123 เป็น Acetone และ น้ำ หรืออีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ จะส่งผลให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 และ 150 มิลลิเมตร จำนวน 5 10 และ 15 โค้งเลี้ยว สารทำงานที่ใช้คือ R123 Acetone และ น้ำ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก 161 kJ/kg เป็น 501 kJ/kg และ 2386 kJ/kg จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 14.6 °C ไปเป็น 29.8 °C และ 73.8 °C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มีจำนวน 10 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 20.4 °C เป็น 38.9 °C และ 89.2 °C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มีจำนวน 15 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 20.4 °C ไปเป็น 44.6 °C และ 77.1 °C ตามลำดับ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก 161 kJ/kg เป็น 501 kJ/kg และ 2386 kJ/kg จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 20.4 °C เป็น 44.6 °C และ 77.1 °C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มีจำนวน 10 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 21.7 °C เป็น 47.7 °C และ 97.1 °C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มีจำนวน 15 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 32.8 °C ไปเป็น 56.4 °C และ 101.3 °C ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

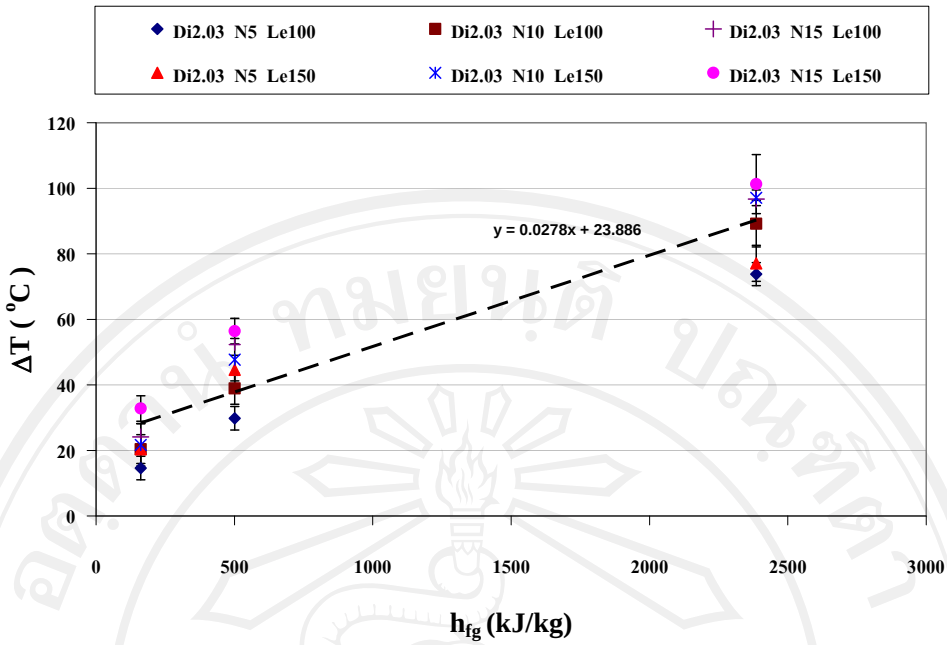
ส่วนในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 มิลลิเมตร ไม่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองเป็นชุดที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้หรือเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out)

เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นจาก 161 kJ/kg เป็น 501 kJ/kg และ 2386 kJ/kg หรือ เปลี่ยนสารทำงานจาก R123 เป็น Acetone และน้ำตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอนั้น จะมีผลทำให้สารทำงานในสถานะของเหลวต้องการความร้อนป้อนให้ในการเปลี่ยนสถานะเป็นไอเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบในหน่วยน้ำหนักของสารทำงานที่เท่ากัน ดังนั้นท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมากกว่าจึงสามารถรับและถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าที่ปริมาณของไอจะมากเพียงพอที่จะทำให้สามารถเกิดกลไกลการถ่ายเทความร้อนขึ้นและทำให้ Slug-train เกิดการขยายตัวของฟองไอในส่วนทำระเหย และ เกิดการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่น จึงต้องใช้ความร้อนป้อนเข้าสูงเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น จะทำให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่น และเกิดการขยายตัวของฟองไอในส่วนทำระเหยแล้วทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นภายในท่อความร้อน และเข้าสู่สภาวะการเริ่มต้นทำงานในที่สุด

จากแนวโน้มของผลการทดลองที่ปรากฏสามารถคาดคะเนได้ว่า หากเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมากขึ้นกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้น แต่หากลดค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอลงมากกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) น้อยลง เนื่องจากสารทำงานมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอลดลงทำให้สามารถสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

แม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบในหัวข้อเดียวกันนี้ แต่หากนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Charoensawan et. al.(2003) ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ พบว่าเมื่อทำการลดความยาวส่วนทำระเหยลงแล้ว จะทำให้อัตราการหดตัวของฟองไอเพิ่มขึ้นและ Soponpongpipat et al.(2008) ได้ทำการสร้างแบบจำลองในการทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ทำให้ทราบว่าหากการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่นมากกว่าการขยายตัวในส่วนทำระเหยแล้วจะทำให้ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานได้ จากงานวิจัยทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.7 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อการทำงานเริ่มต้นของ CLOHP

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงขึ้นจะต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอนั้นจะมีผลทำให้สารทำงานในสถานะของเหลวต้องการความร้อนป้อนให้ในการเปลี่ยนสถานะเป็นไอเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบในหน่วยน้ำหนักของสารทำงานที่เท่ากัน

4.3.2 ผลของความยาวส่วนทำระเหย

โดยปกติแล้วเราใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบเพื่อเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวกลางระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งรับความร้อน ซึ่งอยู่แยกออกจากกัน ด้วยเหตุนี้ความยาวในแต่ละส่วนของท่อความร้อนจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบท่อความร้อน แต่เนื่องด้วยสาเหตุของสภาวะการเริ่มต้นทำงานจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อน ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับผลของตัวแปรความยาวจึงมุ่งเน้นศึกษาผลของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเป็นหลัก แต่ทั้งนี้ยังต้องคำนึงถึงความสำคัญของส่วนที่เหลือดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเข้าใจผิดพลาดเนื่องจากผลที่ได้รับอาจจะมีผลต่อความไม่สมมาตรกันของความยาวแต่ในแต่ละส่วนรวมอยู่ด้วย ตลอดจนหลีกเลี่ยงไม่ให้ผลที่ได้จากการศึกษามีผลของฟักซ์การถ่ายเทความร้อนรวมอยู่ด้วยเมื่อคิดต่อหน่วยพื้นที่ของแต่ละส่วน จึงจำเป็นต้องจัดให้ในแต่ละชุดการทดลองมีความยาวส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นจะต้องมีค่าเท่ากับความยาวส่วนทำระเหยเสมอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการศึกษาผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ พบว่ากรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 เป็น 100 และ 150 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 10 และ 15 โค้ง-เลี้ยว ใช้ R123 Acetone และ น้ำ เป็นสารทำงาน ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 10 โค้งเลี้ยว ใช้สารทำงานเป็น R123 เมื่อเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 เป็น 100 และ 150 มิลลิเมตร จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 19.8 ˚C ไปเป็น 20.4 ˚C และ 21.7 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ Acetone เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 32.7 ˚C ไปเป็น 38.9 ˚C และ 47.7 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 75.9 ˚C ไปเป็น 89.2 ˚C และ 97.1 ˚C ตามลำดับ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว ใช้สารทำงานเป็น R123 เมื่อเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 เป็น 100 และ150 มิลลิเมตร จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 22.8 ˚C ไปเป็น 24.1 ˚C และ 32.8 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ Acetone เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 46.3 ˚C ไปเป็น 52.3 ˚C และ 56.4 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และ ส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 87.4 ˚C ไปเป็น 96.7 ˚C และ 101.3 ˚C ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 มิลลิเมตร ไม่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองเป็นชุดที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้หรือเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out)

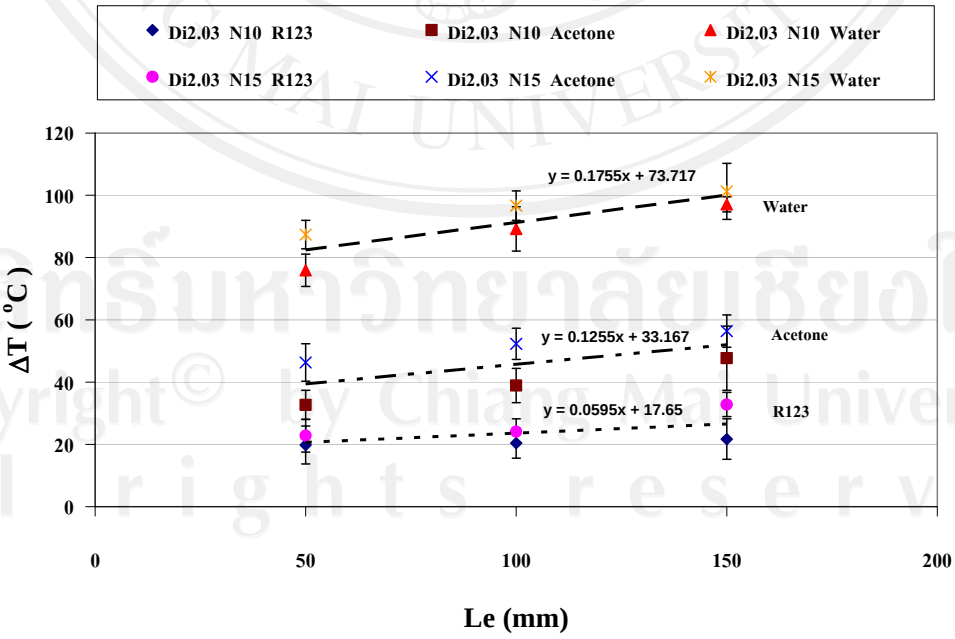
เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 เป็น 100 และ 150 มิลลิเมตร จะทำให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยนั้น เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของฟองไอจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นมีระยะทางที่เพิ่มขึ้นกว่าที่ฟองไอจะเคลื่อนที่จากส่วนทำ-ระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้นั้นต้องใช้เวลามากขึ้น จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของฟองไอในส่วนทำระเหยและเกิดการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่น แล้วทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเกิดการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อความร้อนขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากแนวโน้มของผลการทดลองที่ปรากฏสามารถคาดคะเนได้ว่า หากเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยมากขึ้นกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้น แต่หากลดความยาวส่วนทำระเหยลงมากกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) น้อยลง เนื่องจากการลดความยาวส่วนทำระเหยจะเป็นการลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของฟองไอลงจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นและสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

แม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบในหัวข้อเดียวกันนี้ แต่หากนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Charoensawan et. al.(2003) ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ เมื่อทำการลดความยาวส่วนทำระเหยลงแล้ว จะทำให้อัตราการหดตัวของฟองไอเพิ่มขึ้นและ Soponpongpipat et al.(2008) ทำการสร้างแบบจำลองในการทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ทำให้รู้ว่าหากการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่นมากกว่าการขยายตัวในส่วนทำระเหยแล้วจะทำให้ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานได้ จากงานวิจัยทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความยาวส่วนทำระเหยลดลงจะทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และ ส่วนควบแน่นลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือท่อความร้อนสามารถเริ่มต้นทำงานได้ง่ายขึ้น เนื่องจากฟองไอมีระยะทางการเคลื่อนที่ลดลงทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.8 ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3.3 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยว

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทำจากท่อคาปิลลารี่ที่นำมาขดเป็นลักษณะโค้งเลี้ยวกลับไปกลับมา การออกแบบและเลือกจำนวนโค้งเลี้ยวที่เหมาะสมนอกจากจะต้องออกแบบให้ท่อความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนได้ตามต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงพื้นที่ในการจัดวางตัวของท่อเข้ากับแหล่งกำเนิดความร้อน เนื่องจากการมีจำนวนโค้งเลี้ยวมากขึ้นก็หมายถึงการมีจำนวนกลุ่มท่อมากขึ้นซึ่งเหมาะกับพื้นที่แหล่งให้ความร้อนที่มากพอเช่นกัน จากที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าผลที่ได้รับจากการศึกษาผลของจำนวนโค้งเลี้ยวเป็นส่วนที่ผู้ออกแบบสามารถปรับเพิ่มหรือลดจำนวนโค้งเลี้ยวให้เหมาะสมกับพื้นที่แหล่งกำเนิดความร้อน

จากการศึกษาผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ พบว่ากรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 5 เป็น 10 และ 15 โค้งเลี้ยว จะส่งผลให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นผลการทดลองโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 และ 150 มิลลิเมตร ใช้ R123 Acetone และ น้ำ เป็นสารทำงาน ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร ใช้สารทำงานเป็น R123 เมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 5 โค้งเลี้ยว เป็น 10 และ 15 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 14.6 ˚C เป็น 20.4 ˚C และ 24.1 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ Acetone เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 29.8 ˚C ไปเป็น 38.9 ˚C และ 52.3 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 73.8 ˚C เป็น 89.2 ˚C และ 96.7 ˚C ตามลำดับ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร ใช้สารทำงานเป็น R123 เมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 5 เป็น 10 และ 15 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 20.4 ˚C เป็น 21.7 ˚C และ 32.8 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ Acetone เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 44.6 ˚C เป็น 47.7 ˚C และ 56.4 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบ แน่นเพิ่มขึ้นจาก 77.1 ˚C เป็น 97.1 ˚C และ 101.3 ˚C ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่ท่อความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.06 มิลลิเมตร ไม่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองเป็นชุดที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้หรือเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

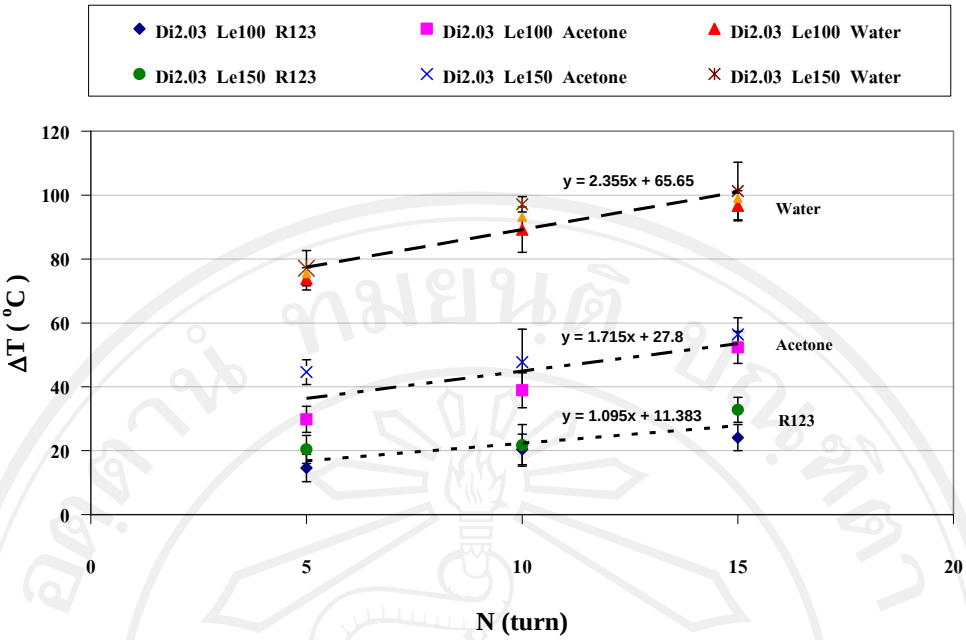
เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 5 เป็น 10 และ 15 โค้งเลี้ยวจะทำให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวนั้นเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นหรืออีกในหนึ่งคือการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจะเป็นการเพิ่มความยาวรวมของท่อความร้อนทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นกับการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมากขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น และ ทำให้เกิดการขยายตัวของฟองไอในส่วนทำระเหยและเกิดการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่น แล้วทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเกิดการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อความร้อนขึ้น

จากแนวโน้มของผลการทดลองที่ปรากฏสามารถคาดคะเนได้ว่า หากเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวมากขึ้นกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้น แต่หากลดจำนวนโค้งเลี้ยวลงมากกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) น้อยลง เนื่องจากการลดจำนวนโค้งเลี้ยวจะเป็นการลดพื้นที่รับความร้อน และเป็นการลดความยาวรวมของท่อความร้อน หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นการลดแรงเสียดทานลง

แม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบในหัวข้อเดียวกันนี้ แต่หากนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Charoensawan et. al.(2003) ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ เมื่อทำการลดจำนวนโค้งเลี้ยวลงทำให้อัตราการหดตัวของฟอง-ไอเพิ่มขึ้นและ Soponpongpipat et al.(2008) ทำการสร้างแบบจำลองในการทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ทำให้รู้ว่าหากการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่นมากกว่าการขยายตัวในส่วนทำระเหยแล้วจะทำให้ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานได้ จากงานวิจัยทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวลดลงจะทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และ ส่วนควบแน่นลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือท่อความร้อนสามารถเริ่มต้นทำงานได้ง่ายขึ้น เนื่องจากความยาวรวมของท่อความร้อนลดลงทำให้ถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.9 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีผลต่อการทำงานเริ่มต้นของ CLOHP

4.3.4 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในการเริ่มต้นออกแบบท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบนั้น ตัวแปรแรกที่ต้องพิจารณาถึงก่อนเป็นอันดับแรกคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เนื่องจากต้องเลือกท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่เกินค่าวิกฤตดังสมการ (1.1) แต่ข้อมูลเพียงเท่านี้ไม่อาจเพียงพอที่จะทำให้ทราบว่าที่ความร้อนที่ออกแบบมานั้นจะสามารถเริ่มต้นทำงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีต่อการเริ่มต้นทำงานเพื่อนำผล และ แนวโน้มที่ได้รับจากการศึกษานี้รวบรวมไว้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพิ่มเติมสำหรับการเลือกใช้ขนาดท่อที่เหมาะสม และสามารถคาดคะเนความเสี่ยงที่ท่อความร้อนนั้นๆ จะไม่สามารถทำงานได้

จากการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ พบว่ากรณีที่ท่อความร้อนเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจาก 1.06 เป็น 2.03 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มี ความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 และ 100 มิลลิเมตร ใช้ R123 และ น้ำ เป็นสารทำงาน ในกรณีที่ท่อความร้อนมีความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ใช้สารทำงานเป็น R123 มีจำนวน 10 โค้งเลี้ยว เมื่อเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจาก 1.06 เป็น 2.03 มิลลิเมตร จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 19.8 °C เป็น 21.2 °C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มีจำนวน 15 โค้ง-เลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 22.8 °C เป็น 30.8 °C ตามลำดับ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีความยาวส่วนทำระเหย 100 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ใช้สารทำงานเป็น น้ำ มี 10 โค้งเลี้ยว เมื่อเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจาก 1.06 เป็น 2.03 มิลลิเมตร จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 83.7 ˚C เป็น 89.2 ˚C ตามลำดับ สำหรับท่อความร้อนที่มี 15 โค้งเลี้ยว จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 87.1 ˚C เป็น 96.7 ˚C ตามลำดับ ส่วนในกรณีของสารทำงานเป็นอาซิโทน ไม่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากข้อมูลของท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 mm ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองเป็นชุดที่ไม่สามารถเริ่มต้นทำงานได้หรือเกิดการแห้งตั้งแต่เริ่มต้น (Initial dry out)

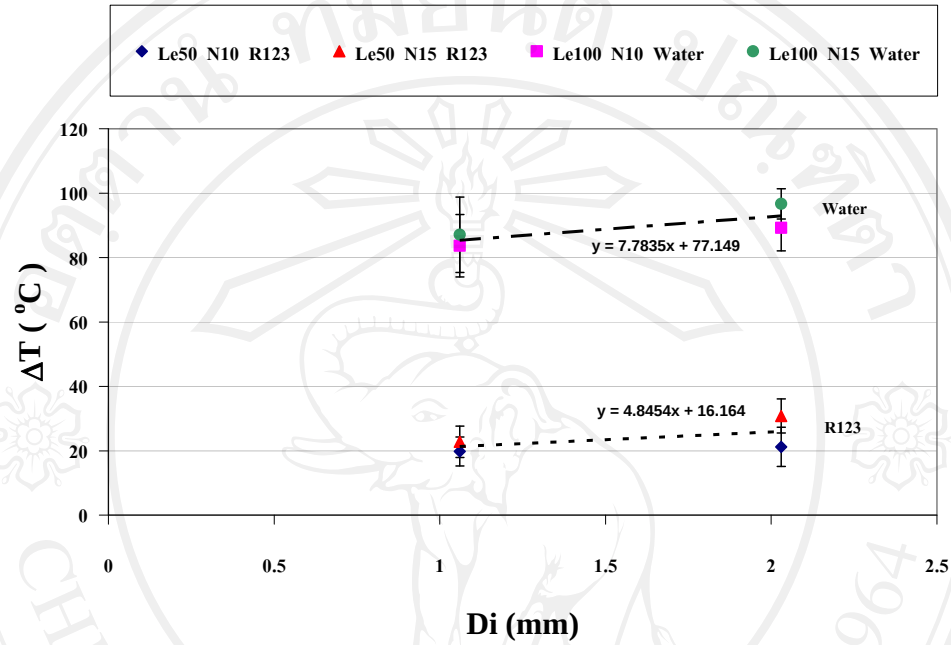
เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.06 mm เป็น 2.03 mm จะทำให้ใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมากขึ้น เมื่อพิจารณาผ่านหน้าตัดขวางของท่อความร้อนพบว่าฟองไอจะมีตำแหน่งที่ค่อนไปทางด้านบนของท่อ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ของเหลวที่ห่อหุ้มฟองไอที่สัมผัสกับพื้นที่ให้ความร้อนที่อยู่ส่วนบนของท่อต่อพื้นที่ผิวภายในของท่อที่ส่วนทำระเหยทั้งหมดและทำการพิจารณาปริมาณของฟองไอที่มีขนาดเท่ากันพบว่าท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยจะให้ค่าสัดส่วนดังกล่าวสูง(มีค่าเข้าหาหนึ่ง) จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น เนื่องจากมีขนาดความหนาฟิล์มน้อย ในขณะที่ท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากจะมีค่าสัดส่วนดังกล่าวน้อยทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้นานกว่าเนื่องจากมีขนาดความหนาฟิล์มมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้น

จากแนวโน้มของผลการทดลองที่ปรากฏสามารถคาดคะเนได้ว่า หากเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์-กลางมากขึ้นกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) เพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ท่อความร้อนสามารถทำงานได้ตามปกติ แต่หากลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงมากกว่าค่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น(ΔT) น้อยลง เนื่องจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะเป็นการเพิ่มค่าสัดส่วนขึ้นจึงทำให้ท่อความร้อนนั้นสามารถทำงานได้ง่ายขึ้น แต่หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำการศึกษานั้นมีค่าเกินกว่าค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตแล้วท่อความร้อนก็จะไม่สามารถทำงานได้อยู่ดี

แม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบในหัวข้อเดียวกันนี้ แต่หากนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Maezawa et. al.(1996) พบว่าถ้าหากท่อความร้อนที่สร้างขึ้นมานั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง-วิกฤตของแต่ละสารทำงานแล้วท่อความร้อนจะไม่สามารถทำงานได้ และ Soponpongpipat et al.(2008) ทำการสร้างแบบจำลองในการทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ทำให้รู้ว่าหากการหดตัวของฟองไอในส่วนควบแน่นมากกว่าการขยายตัวในส่วนทำระเหยแล้วจะทำให้ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานได้ จากงานวิจัยทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจะทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบใช้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหย และ ส่วนควบแน่นลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือท่อความร้อนสามารถเริ่มต้นทำงานได้ง่ายขึ้น เนื่องจากค่าสัดส่วนระหว่างฟองไอกับพื้นที่ของท่อเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มน้อยลงจึงทำให้สารทำงานสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

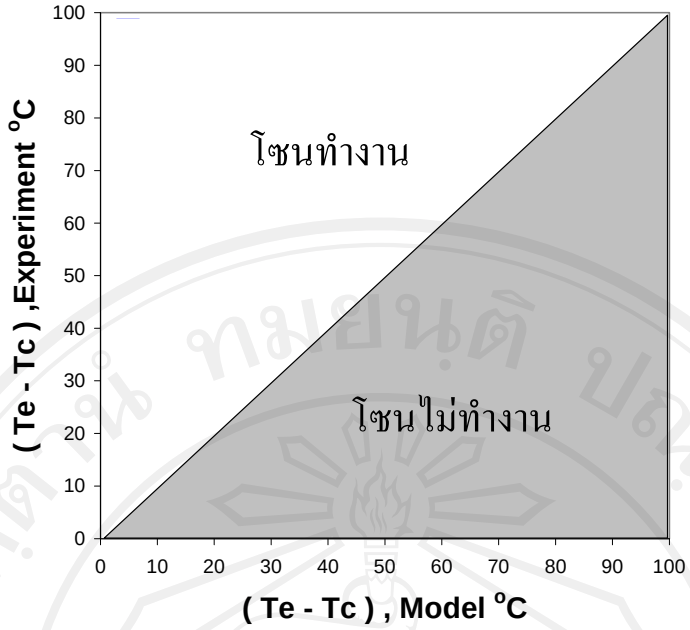


รูปที่ 4.10 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อการทำงานเริ่มต้นของ CLOHP

4.4 ผลของการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

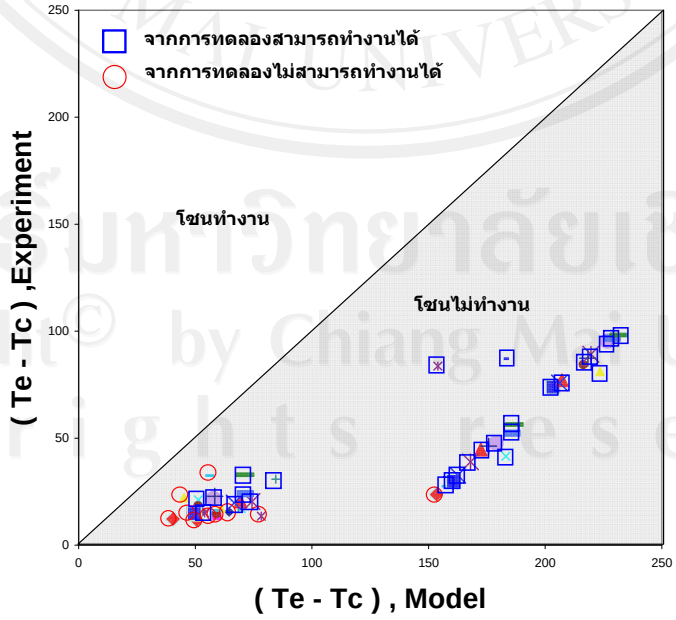
เนื่องจากการทดลองในรายงานวิจัยนี้ทำการเพิ่มความร้อนให้กับท่อความร้อนทีละขั้น และทำการสังเกตว่าท่อความร้อนทำงานหรือไม่ สำหรับชุดการทดลองที่ท่อไม่สามารถเริ่มทำงานได้ในตอนเริ่มต้นนั้นจะไม่หยุดการทดลองทันที แต่จะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นแก่ท่อ ดังนั้นในการคำนวณหากพบว่าท่อความร้อนไม่สามารถทำงานได้ในอุณหภูมิที่กำหนดไว้ตอนต้น จะทำการคำนวณเงื่อนไขการทำงานได้สำหรับการให้ความร้อนขั้นต่อไป โดยกำหนดให้อุณหภูมิตั้งต้นในการคำนวณครั้งต่อไปมีค่าเท่ากับอุณหภูมิส่วนทำระเหยในการให้ความร้อนขั้นแรก เนื่องจากท่อต้องมีการกระจายความร้อนภายในตัวมันเอง และในภาคผนวก ง แสดงผลการคำนวณเงื่อนไขการเริ่มต้นทำงานได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยใช้สารทำงานเป็น R123 โดยที่กราฟแสดงผลการทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะทำโดยแบ่งพื้นที่ของกราฟออก เป็นสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟการทำนายจากแบบจำลอง

จากรูปที่ 4.11 แสดงกราฟการทำนายจากแบบจำลองโดยที่โซนบนแสดงการทำนายว่าท่อความ-ร้อนสามารถทำงานได้ จะพบว่าหากข้อมูลตกอยู่ในส่วนนี้อุณหภูมิแตกต่างที่วัดได้จากการทดลองมีค่า-มากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมอ และโซนล่างแสดงการทำนายว่าท่อไม่สามารถทำงานได้ จะพบว่าหากข้อมูลตกอยู่ในส่วนนี้อุณหภูมิแตกต่างที่วัดได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมอ



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการทำนายจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการทำนายการเริ่มต้นทำนายของท่อระหว่างแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายสูงเนื่องจากในการทำนายพบว่าข้อมูลการทดลองทั้งหมดตกอยู่ที่โซนล่างของกราฟซึ่งแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นไม่สาสารถทำงานได้ แต่ที่จริงแล้วยังมีข้อมูลการทดลองที่ยังมีการเริ่มต้นทำงานอยู่ สาเหตุที่ทำให้แบบจำลองนี้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากในการสร้างแบบจำลองนี้ได้นำข้อมูลจากผลการทดลองของ Kammuang-lue (2008) มาเป็นบรรทัดฐานในการสร้างแบบจำลองในครั้งนี้ ซึ่งทำการทดลองเพื่อหาจุดที่ท่อความร้อนนั้นทำงานได้สูงสุด โดยไม่ได้ทำอย่างละเอียดณจุด “ทำงาน” ตามนิยามในงานวิจัยนี้ จึงทำให้ในการทดลองนั้นต้องใช้อุณหภูมิของส่วนควบแน่นที่ต่ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิส่วนกันความร้อนไม่ให้เกิน 50 °C และ ในการนำข้อมูลการทดลองมาใช้ในการสร้างแบบ จำลองจะเป็นการสุ่มช่วงที่คิดว่าท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานจึงทำให้ได้ข้อมูลที่มีช่วงของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นไม่ค่อยแม่นยำมากนัก ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่จะทำการหาจุดที่ท่อความร้อนนั้นเริ่มต้นทำงานที่แท้จริงและควบคุมอุณหภูมิของส่วนควบแน่นให้อยู่ที่ประมาณ 27 °C จึงทำให้เมื่อนำแบบจำลองการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อนมาทำการทำนายข้อมูลที่มีเงื่อนไขในการลดลองที่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการทำนายขึ้น

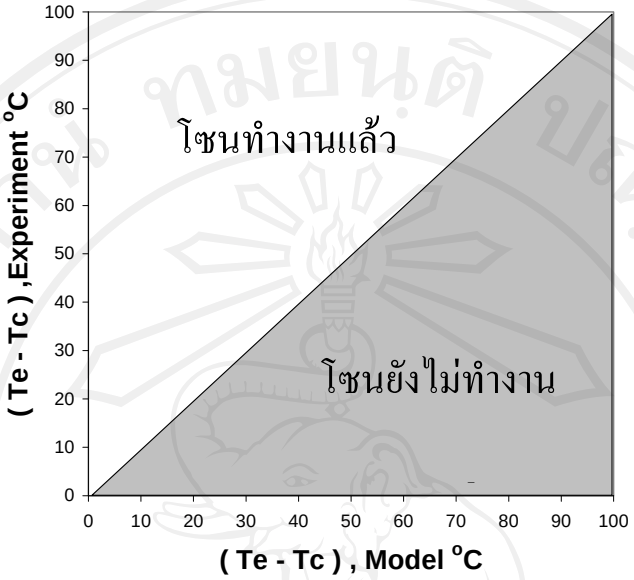
เมื่อทำการพิจารณาชุดทดลองที่ทำงานแล้ว หากเราทำการเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างจากการทดลองให้กับชุดทดลองที่ทำงานได้จากที่อยู่โซนล่าง(จากการทำนายพบว่าท่อไม่ทำงาน) ให้เลื่อนขึ้นไปอยู่ด้านบนของกราฟ ก็จะทำนายได้ว่าชุดการทดลองนี้ทำงานได้ ซึ่งตรงกับผลการทดลองจริง แต่หากพิจารณาชุดทดลองที่ไม่ทำงานเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างจากการทดลองให้กับชุดทดลองที่ไม่ทำงานได้จากที่อยู่โซนล่าง(จากการทำนายพบว่าท่อไม่ทำงาน) ให้เลื่อนขึ้นไปอยู่ด้านบนของกราฟ ก็จะทำนายได้ว่าชุดการทดลองนี้ทำงานได้ ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองจริง

จะเห็นได้ว่ากราฟแสดงผลการทำนายการเริ่มต้นทำงานนั้นเกิดการขัดแย้งขึ้นระหว่างผลของการทดลองจริงกับผลของการทำนาย เช่น จากการทดลองจริงพบว่าชุดทดลองที่ไม่สามารถทำงานได้ไม่ว่าจะทำการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นเท่าไรก็ตาม ชุดทดลองชุดนั้นก็ยังไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งมีผลต่างจากการทำนาย และหากชุดทดลองที่ไม่สามารถทำงานได้ตกอยู่ที่โซนบนของกราฟ ก็จะสามารถทำนายได้ว่า “ ทำงานได้ ” แต่ในความเป็นจริงนั้นจากการทดลองชุดทดลองนั้นไม่สามารถทำงานได้

จากการวิเคราะห์กราฟการทำนาย พบว่าข้อมูลของชุดการทดลองที่ไม่สามารถทำงานได้นั้นไม่ว่าจะอยู่ตรงโซนไหนของกราฟการทำนายชุดทดลองก็ไม่สามารถทำงานได้อยู่ดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากราฟการทำนายที่สร้างขึ้นนี้ไม่สามารถที่จะทำนายได้ว่าชุดข้อมูลไหนไม่สามารถทำงานได้ เพราะ ถ้าชุดทดลองที่ไม่สามารถทำงานได้อยู่โซนบนของกราฟจะเกิดการขัดแย้งขั้นระหว่างผลการทดลองจริงกับการทำนาย ดังนั้นในการทำนายจะไม่นำชุดทดลองที่ไม่ทำงานมาใช้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นแล้วทำการเปลี่ยนคำอธิบายของกราฟการทำนายใหม่โดยให้โซนบนของกราฟแสดงการทำนายว่าท่อความ-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ร้อนสามารถทำงานได้ หากข้อมูลตกอยู่ในส่วนนี้อุณหภูมิแตกต่างที่วัดได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมอ และโซนล่างของกราฟแสดงการทำนายว่าท่อยังไม่ทำงาน หากข้อมูลตกอยู่ในส่วนนี้อุณหภูมิแตกต่างที่วัดได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมอดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนคำอธิบายของกราฟการทำนายใหม่

หลังจากที่ทำการปรับเปลี่ยนคำอธิบายของกราฟการทำนายแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการปรับปรุงแบบจำลองการเริ่มต้นทำงาน โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP และจากการพิจารณาผลจากการทดลองเชิงปริมาณพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP นั้นสามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลของตัวแปรที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP ที่วางตัวในแนวระนาบ

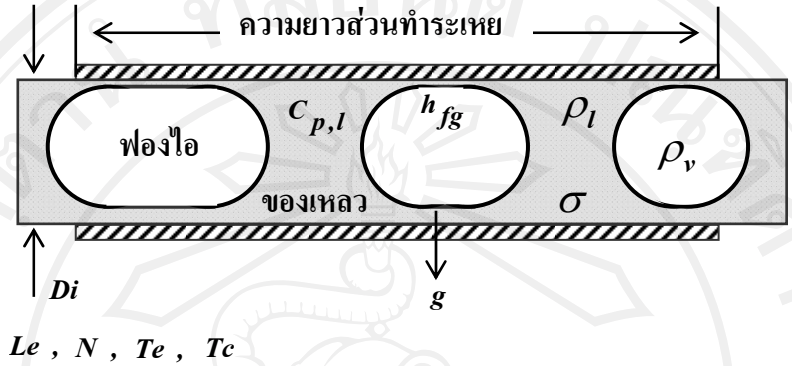
ตัวแปร				
Le	เพิ่มขึ้น	⇨	ΔT	เพิ่มขึ้น
N				เพิ่มขึ้น
Di				เพิ่มขึ้น
h_{fg}				เพิ่มขึ้น
σ				เพิ่มขึ้น

จากตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเริ่มต้นทำงานสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่มีผลต่ออุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta T, exp = f\left(\text{ปรากฏการภายใน}, \text{ขนาดรูปร่าง}, \text{คุณสมบัติของสารทำงาน}\right) \quad \text{.....(4.1)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1) สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ภายในของ CLOHP นั้นประกอบไปด้วย แรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วง ส่วนตัวแปรของขนาดรูปร่างนั้นเกิดขึ้นจากความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารทำงานนั้นเกิดขึ้นจากค่าความร้อนแฝงของการระเหย และค่าความร้อนจำเพาะที่สภาวะนั้นดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงปรากฏการณ์ภายในของ CLOHP ในความยาวส่วนทำระเหย

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำสมการที่ (4.1) ที่เป็นฟังก์ชันที่มีผลต่ออุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนควบแน่นกับส่วนมาเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\Delta T,exp = f\left(g,D,N,L_e,h_{fg},C_p,\rho_v,\rho_l,\sigma\right) \text{.....(4.2)}$$

จากการศึกษาเชิงปริมาณของ CLOHP ในกรณีที่วางตัวในแนวระนาบพบว่า ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว และ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนั้นมีผลต่อการเริ่มต้นทำงานของท่อความร้อน ดังนั้นสามารถนำความสัมพันธ์จากสมการที่ (4.2) มาเขียนให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่อธิบายถึงขนาดรูปร่างของ CLOHP ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของตัวแปรไร้มิติดังแสดงในสมการ (4.3) และ (4.4)

$$\text{กลุ่มตัวแปรไร้มิติของสัดส่วนรูปร่าง} = \left(\frac{L_e}{D_i}\right) \text{.....(4.3)}$$

$$\text{กลุ่มตัวแปรไร้มิติของจำนวนโค้งเลี้ยว} = \left(\frac{L_t}{L_e}\right) \text{.....(4.4)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อทำการพิจารณาถึงคุณสมบัติของสารทำงาน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสามารถนำสมการที่ (4.2) มาเขียนความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์นี้ในรูปของตัวแปรไร้มิติ Bond number (Bo) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ฟองไอพยายามที่จะเคลื่อนที่ไปยังผิวท่อด้านบน และของเหลวพยายามหน่วงฟองไอไม่ ให้หลุดออกจากผิวท่อดังแสดงในสมการที่ (4.5)

$$Bo = D_i \left(g\left(\frac{\left(\rho_l - \rho_g\right)}{\sigma} \right) \right)^{0.5} \qquad \text{.....(4.5)}$$

และเมื่อทำการพิจารณาถึงคุณสมบัติของสารทำงาน พบว่าเมื่อสารทำงานได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งแล้วสารทำงานจะเกิดการระเหยแล้วมีการถ่ายเทความร้อนแฝง และความร้อนสัมพัทธ์ขึ้นดังนั้นจากสมการที่ (4.2) สามารถเขียนความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์นี้ในรูปของตัวแปรไร้มิติ Jacob number (Ja) ดังแสดงในสมการที่ (4.6)

$$Ja = \left(\frac{h_{fg}}{C_{p,l} \Delta T_{e-c}} \right) \qquad \text{.....(4.6)}$$

จากการพิจารณากลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้กล่าวมาข้างต้น เช่น Bond number Jacob number สัดส่วนรูปร่าง และจำนวนโค้งเลี้ยว สามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อแบบจำลองการเริ่มต้นทำงานได้ดังสมการที่ (4.7)

$$\Delta T, Model^* = \Delta T, Model\left[f\left(Le / Di, Lt / Le, Bo, Ja \right) \right] \qquad \text{.....(4.7)}$$

จากนั้นใช้วิธีการหาสมการแบบผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด (least squares curve fitting)ในการหาค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ และ กำลังที่ดีที่สุดของความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.7) และสามารถเขียนสมการสหสัมพันธ์ในการทำนายการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP ได้ดังสมการที่ (4.8)

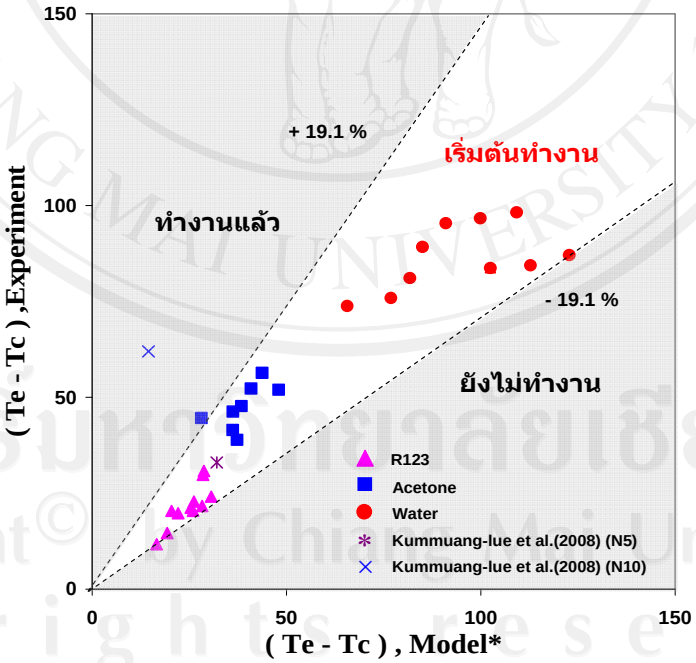
$$\Delta T, Model^* = \Delta T, Model\left[3.168 \left(\frac{Le}{Di} \right)^{0.217} \left(\frac{Lt}{Le} \right)^{0.468} (Bo)^{-0.081} (Ja)^{1.180} \right] \qquad \text{.....(4.8)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากสมการสหสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้ค่า สัมประสิทธ์ความหน้าเชื่อถือ หรือ coefficient of determination (R^2) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน หรือ standard deviation (STD) เป็น 0.90 และ ± 19.9 % ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาพจน์ของตัวแปรไร้มิติ Bond number พบว่ามีเลขยกกำลังเข้าใกล้ศูนย์มากเมื่อเทียบกับพจน์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติตัวอื่นๆ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวแปรไร้มิติของ Bond number มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในแบบจำลองนี่น้อยมาก ดังนั้นสามารถตัดตัวแปร Bond number ออกได้ แล้วทำการหาค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ และ กำลังใหม่จะได้สมการสหสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.9)

$$\Delta T,Model^{*} = \Delta T,Model\left[2.680\left(\frac{Le}{Di}\right)^{0.244}\left(\frac{Lt}{Le}\right)^{0.488}(Ja)^{1.249}\right] \quad \text{.....(4.9)}$$

โดยมีค่า coefficient of determination (R^2) และ standard deviation (STD) เป็น 0.91 และ ± 19.1 % ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่าของแต่ละชุดทดลองที่ทำงานได้มาป้อนลงในสมการเพื่อที่จะใช้ในการทำนายการเริ่มต้นทำงานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟทำนายการทำงานเริ่มต้นของ CLOHP

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูปที่ 4.15 แสดงกราฟทำนายการเริ่มต้นทำงานของ CLOHP พบว่าหากข้อมูลการทำนายตกอยู่ในโซนของเส้นความคลาดเคลื่อน ± 19.1 % แบบจำลองจะทำนายว่าท่อความร้อนนั้นอยู่ในส่วนที่เริ่มต้นทำงาน แต่หากข้อมูลการทำนายตกอยู่ที่โซนบนของกราฟด้านบนของเส้นความคลาดเคลื่อน + 19.1 % แบบจำลองจะทำนายว่าท่อความร้อนสามารถทำงาน และหากข้อมูลการทำนายตกอยู่ที่โซนล่างของเส้นความคลาดเคลื่อน - 19.1 % แบบจำลองจะทำนายว่าท่อความร้อนยังไม่ทำงานเนื่องจากอุณหภูมิยังไม่ถึงจุดที่ท่อเริ่มทำงาน

เมื่อนำแบบจำลองที่ทำการปรับปรุงแล้วเปรียบเทียบกับขข้อมูลการทดลองของ Kummuang-lue et al.(2008) พบว่าข้อมูลการทดลองตกอยู่ทั้งในโซนที่ เริ่มต้นทำงาน และ โซนที่ทำงานแล้ว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการทดลองของ Kummuang-lue et al.(2008) เป็นการทดลองเพื่อหาการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด ดังนั้นในการทดลองจึงไม่สนใจช่วงของการเริ่มต้นทำงาน และข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบจะเป็นการสุ่มช่วงที่คิดว่าเริ่มต้นทำงาน ดังนั้นข้อมูลที่ได้มาอาจเป็นช่วงที่สารทำงานภายในท่อความร้อนเริ่มต้นทำงาน หรือ ทำงานไปแล้ว จึงทำให้ในการทำนายผลการทดลองของ Kummuang-lue et al.(2008) ตกอยู่ในทั้งสองโซนที่กล่าวมาข้างต้น

สามารถสรุปได้ว่าจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการเริ่มต้นทำงานพบว่าแบบจำลองนั้นเกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายสูงเนื่องจากมีเงื่อนไขของข้อมูลจากการทดลองที่ใช้สร้างแบบจำลอง และข้อมูลจากการทดลองที่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการปรับปรุงแบบจำลองแบบจำลองที่ใช้ในการทำนาย และ ปรับเปลี่ยนคำอธิบายใหม่ จากการปรับปรุงแบบจำลองแล้วเมื่อนำมาทำนายการเริ่มต้นทำงานของท่อจะมีความคลาดเคลื่อนในการทำนาย โดยมีค่า coefficient of determination (R^2) และ standard deviation (STD) เป็น 0.91 และ ± 19.1 % ตามลำดับ.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved