

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

เพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจในงานวิจัยนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกล่าวถึงพื้นฐานที่สำคัญเกี่ยวกับท่อความร้อน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของท่อความร้อน อันได้แก่ โครงสร้างและหลักการทำงานของท่อความร้อนทั้งแบบท่อความร้อนทั่วไป (Conventional heat pipe) และ ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) นอกจากนี้ยังจะกล่าวถึงขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อน เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ และสามารถแยกสภาวะการส่งผ่านความร้อนในสภาวะปกติ และ สภาวะวิกฤติได้ดียิ่งขึ้น

2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อน

2.1.1 โครงสร้างของท่อความร้อน

ท่อความร้อนเป็นที่รู้จักกันเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1831 โดย L.P.Perkins ได้ทำการจดสิทธิบัตรท่อความร้อนเฟสเดียว (Single-phase Perkins Tube) และในปี ค.ศ. 1892 L.P.Perkins และ W.E. Buck ได้ทำการพัฒนาและจดสิทธิบัตร ท่อความร้อนแบบสองสถานะ Maezawa et al.(2000) จากนั้นท่อความร้อนก็ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมอย่างต่อเนื่อง

ในปัจจุบันท่อความร้อนมีหลายชนิด เช่น ท่อความร้อนแบบหมุน (Rotating Heat Pipe) ท่อความร้อนชนิดวงรอบ (Loop Heat Pipe) เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะทำงานโดยอาศัยแรงดึงดูดโลก (Gravitational Assisted Two-Phase Closed Thermosyphon) ฯลฯ แต่อย่างไรก็ดี ท่อความร้อนที่ควรรู้จักแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ท่อที่อยู่ในประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุน (Wick) หรือที่เรียกว่า “ท่อความร้อนธรรมดา” (Conventional Heat Pipe) และท่อที่อยู่ในไม่มีโครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุนและอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อ หรือเรียกว่า “เทอร์โมไซฟอน” (Thermosyphon) โดยมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

2.1.1.1 ตัวท่อความร้อน (Container) ซึ่งทำหน้าที่เป็นที่บรรจุสารทำงานและโครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุน โดยปรกติจะใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงดันของสารทำงานที่จะเกิดขึ้นจากภายในตัวท่อ และต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารทำงานภายในท่อและสิ่งแวดล้อม ภายนอกท่อการบรรจุสารทำงานลงในตัวท่อความร้อนทำโดยการทำให้ตัวท่อความร้อนเป็นสุญญากาศ จากนั้นจึงเริ่มบรรจุสารทำงานลงในท่อ

2.1.1.2 สารทำงาน (Working fluids) ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยเมื่อสารทำงานที่อยู่ในส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงก็จะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ โดยอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ทำให้สารทำงานเกิดการระเหยจะเป็นอุณหภูมิอิ่มตัวที่สอดคล้องกับความดันภายในท่อความร้อน ไอสารทำงานที่เกิดจากการระเหยจะไหลไปยังส่วนควบแน่น และเมื่อไอสารทำงานสัมผัสกับเปลือกท่อที่อยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ก็จะสูญเสียความร้อนให้กับเปลือกท่อนั้นและควบแน่นกลายเป็นของเหลว แล้วไหลกลับมายังส่วนควบแน่น

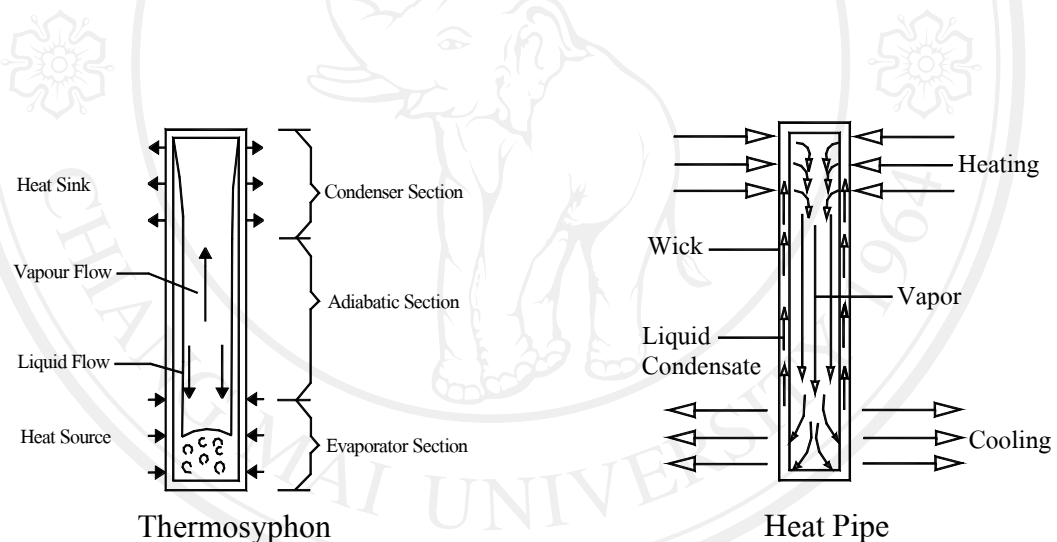
2.1.1.3 โครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุน (Wick Structure) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงสาร-ทำงานที่ควบแน่นในส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหย โดยใช้หลักการของแรงคาпилลารี(Capillary force) ด้วยหลักการนี้เองทำให้ท่อความร้อนธรรมดาสามารถส่งผ่านความร้อนได้ในทุกทิศทาง แม้ว่าจะวางตัวท่อตามแนวราบหรือให้ความร้อนที่ส่วนบนของท่อ (Top heat mode) สำหรับท่อความร้อนที่สร้างขึ้นโดยไม่มีส่วนของโครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุน ก็จะเรียกท่อความร้อนแบบนี้ว่าเทอร์โมไซฟอนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื่องจากเทอร์โมไซฟอนไม่มีโครงสร้างที่เป็นวัสดุพรุน ดังนั้นการที่สารทำงานควบแน่นจะไหลกลับมายังส่วนทำระเหยได้นั้น จึงต้องอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเพียงอย่างเดียว ทำให้เทอร์โมไซฟอนทำงานได้ดีเมื่อวางตัวท่อในแนวตั้ง หรือใกล้แนวตั้ง และให้ความร้อนจากด้านล่างของท่อ (Bottom heat mode) เท่านั้น และท่อจะไม่สามารถทำงานได้ดีที่การวางตัวท่อในแนวราบ และไม่สามารถทำงานได้เลยหากให้ความร้อนที่ด้านบนของเทอร์โมไซฟอน โครงสร้างของท่อความร้อน และเทอร์โมไซฟอนเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.3 ท่อความร้อนแบบธรรมดา

ท่อความร้อนแบบธรรมดาหรือท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกสามารถทำงานโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากค่าความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อความร้อน จึงสามารถจะระเหยตัวโดยการรับความร้อนจากแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง และถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่น โดยการถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า รูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงส่วนประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งมีลักษณะท่อเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น

หลักการการทำงานของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ คือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนที่มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่น ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อสารทำงานถ่ายเทความร้อนออกจะทำให้เกิดการควบแน่นของสารทำงาน และไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เพื่อกลับมารับความร้อนในส่วนทำระเหยอีกครั้ง และจะทำงานเป็นวัฏจักรแบบนี้เรื่อยไป เนื่องจากค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อน มีค่าสูงมากดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นของท่อความร้อนนั้น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้านด้วยกัน สามารถแยกออกได้ดังนี้ เช่น รูปร่าง ความยาวของท่อความร้อน ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน ลักษณะการติดตั้งท่อความร้อน ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนและแหล่งระบายความร้อน รวมถึงขีดจำกัดการทำงานต่าง ๆ ของท่อความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 รูปแสดงโครงสร้างของท่อความร้อน และเทอร์โมไซฟอน
ประดิษฐ์ เทอดทูล (2536)

2.1.4 หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสัน

ท่อความร้อนแบบสันเป็นเทคโนโลยีของท่อความร้อนที่ใหม่ และมีหลักการทำงานที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสันอย่างแท้จริง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลักการ ลักษณะสำคัญและการนำไปใช้งานของท่อความร้อนแบบสัน Akachi et al.(1996) พบว่ากลไกพื้นฐานในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันคือการทำให้เป็นสูญญากาศ แล้วเติมสารทำงานจำนวนที่เพียงพอภายในท่อจะเกิดมีฟองไอ (Vapor bubbles) และแท่งของเหลว(Liquid plugs) รวมตัวกันอยู่ภายในท่อตามแนวยาว เมื่อด้านใดด้านหนึ่งของท่อได้รับความร้อน(ส่วนทำระเหย)ฟองไอจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดแรงดันขึ้น เมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นแรงดันก็จะสูงขึ้นและจะเกิดแรงขับ(Driving force) ผลักเอาแท่งของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำ(ส่วนควบแน่น) และเนื่องจากท่อมีความยาวที่ต่อกันจึงส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟองไอและแท่งของเหลวในท่อนั้นๆ ความร้อนจะถูกส่งถ่ายออกและก็จะเกิดการกลั่นตัวที่ส่วนนี้ ฟองไอก็จะยุบตัวลงแล้วแรงดันก็จะลดลงซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างด้านทั้งสอง ในขณะเดียวกันเมื่อแรงดันในส่วนที่อุณหภูมิต่ำลดลง จะเกิดแรงย้อนกลับ(Restoring force) ส่งผลให้ไอเกิดการเคลื่อนที่ไปผลักแท่งของเหลวให้ไหลกลับไปยังส่วนที่อุณหภูมิสูง เมื่อแรงดันในส่วนอุณหภูมิต่ำลดลงอีกครั้ง ก็จะเกิดแรงขับไปผลักแท่งของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำอีก การทำงานของท่อความร้อนแบบสันจะต่อเนื่องกันเป็นวัฏจักรซึ่งการเคลื่อนไหวที่ติดต่อกันระหว่างแรงขับและแรงย้อนกลับ จะทำให้ฟองไอและแท่งของเหลวเกิดการสั่นขึ้นในทิศทางตามแนวแกน ต่อมา Soponpongpip et al. (2006) ได้มีการนำเสนอแนวคิดใหม่เกี่ยวกับการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบพบว่าท่อความร้อนนี้สามารถทำงานภายใต้ความดันคงที่ค่าหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ของสารทำงานเกิดจากการขยายตัวของก้อนไอในส่วนทำระเหยและการหดตัวของก้อนไอในส่วนควบแน่น เนื่องจากความดันในท่อคงที่จึงทำให้เกิดสถานะเสมือนสมดุล ซึ่งในสภาวะนี้แรงที่ทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวมีค่าเท่ากับแรงต้านการขยายตัวและยุบตัวของระบบ ดังนั้นการขยายตัวและการหดตัวที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการไหลเวียนอย่างต่อเนื่องในท่อความร้อนชนิดนี้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการไหลของสารทำงานในท่อความร้อนชนิดนี้ไม่ได้ไหลในทิศทางเดียวตลอดเวลา แต่พบการกลับทิศทางของสารทำงานในท่อความร้อนอีกด้วย ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้มีสาเหตุมาจากการควบแน่นไม่หมดของไอในส่วนควบแน่นโดยการขยายตัวของไอในส่วนทำระเหยจะขยายตัวในทิศทางที่ทดแทนการหดตัวของไอในส่วนควบแน่น ดังนั้นอัตราการควบแน่นที่ปลายท่อทั้งสองข้างในโค้งเลี้ยวเดียวกันของส่วนควบแน่นจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของสารทำงาน โดยหากปลายทั้งสองของส่วนควบแน่น ควบแน่นด้วยอัตราการควบแน่นเท่าๆกันสารทำงานก็จะหยุดไหลชั่วขณะหนึ่ง และถ้าหากปลายด้านหนึ่งควบแน่นได้มากกว่าอีกด้านหนึ่ง ฟองไอในส่วนทำระเหยก็จะขยายตัวผลักสารทำงานไปทดแทนส่วนที่ควบแน่นนั้นได้มากกว่าอีกด้านซึ่งก็จะทำให้ฟองไอในส่วนทำระเหยมีแนวโน้มจะขยายตัวไปทางด้านที่ควบแน่นได้มากกว่า ซึ่งทำให้เกิดทิศทางการไหลเวียนขึ้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.2.1 รูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อน

2.2.1.1 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวตั้ง จะมีรูปแบบการไหล ทั้งก๊าซ และของเหลวไหลขึ้นด้านบนดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังนี้

- การไหลแบบเป็นฟอง (Bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีทั้งฟองก๊าซเล็กๆกระจาย เป็นจุดๆ ไหลปะปนกับของเหลว และสถานะของเหลวจะต่อเนื่อง
- การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow or Plug flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซที่มี รูปร่างคล้ายกระสุนไหลขึ้นสู่ด้านบน โดยมีของเหลวชั้นกลางพร้อมกับมีก๊าซปะปนบ้าง โดย ณะเดียวกันมีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองก๊าซรูปกระสุน
- การไหลแบบเป็นโพรง (Churn flow) รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิด- เบี้ยวไป เนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้จะไม่มีการ- ลัดขึ้นของของเหลวให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ
- การไหลแบบวงแหวน (Annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลของก๊าซอยู่ใน แกนกลางท่อมีหยดของเหลวเล็กๆ ปะปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ
- การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้น ของก๊าซอยู่แกนกลางท่อ โดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกับก๊าซนั้น ได้รวมตัวกันเป็นริ้วปนกันไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการเกิดการรวมตัวของหยดของเหลว เล็กๆ เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้น ด้วย



Bubble flow



Slug or Plug flow



Churn flow



Annular flow



Wispy annular flow

รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวตั้ง

ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)

2.2.1.2 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ จะแบ่งออกได้ 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

- การไหลแบบแยกชั้น (Stratified flow) รูปแบบการไหลจะมีการแยกตัวออกจากกันเนื่องจากแรงดึงดูด โดยที่ก๊าซจะไหลไปตามด้านบนท่อ และของเหลวจะไหลไปที่แนวด้านล่างของท่อ

- การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified wavy flow) รูปแบบการไหลที่มีความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบแยกชั้น ทำให้เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

- การไหลแบบฟองฟุ้ง (Dispersed bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซกระจายปะปนในของเหลวมีแนวโน้มของฟองก๊าซจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้นฟองก๊าซจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

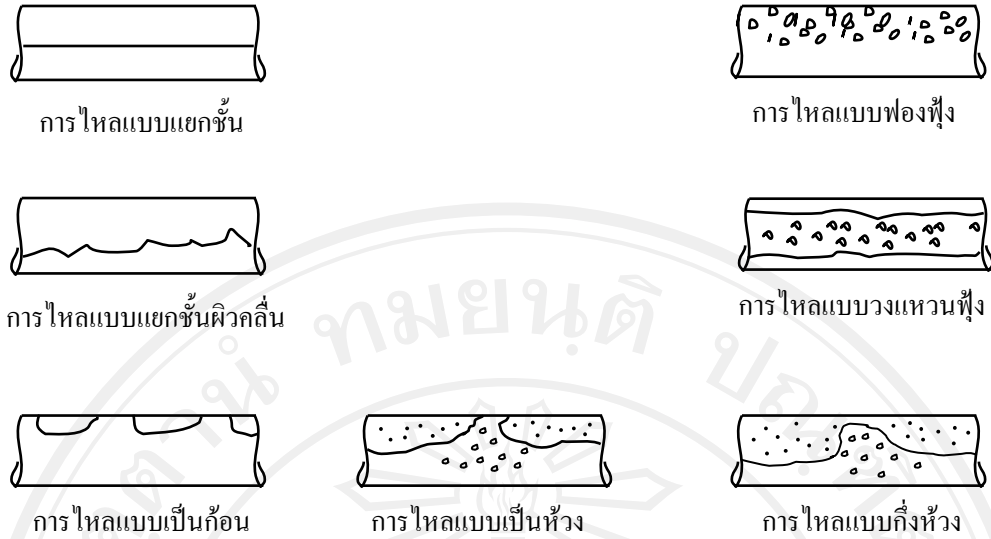
- การไหลแบบวงแหวนฟุ้ง (Annular - dispersed flow) รูปแบบการไหลก็คล้ายกับท่อที่อยู่ในแนวตั้ง แต่ความหนาของแผ่นฟิล์มจะสม่ำเสมอ โดยที่ด้านล่างของท่อความหนาของแผ่นฟิล์มก็จะมากกว่า

- การไหลแบบเป็นช่วง (Intermittent flow) รูปแบบการไหลนี้แบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกัน

ก. การไหลแบบเป็นก้อน (Plug flow) รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อในแนวตั้งแต่จะแนบชิดกับผิวท่อด้านบน

ข. การไหลแบบเป็นห้วง (Slug flow) รูปแบบการไหลที่ของเหลวที่มีสภาพเป็นชั้นไปกั้นหน้าท่อนั้นจะมีฟองก๊าซปะปนไปด้วย

ค. การไหลแบบกึ่งห้วง (Semi-slug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเกิดขึ้นที่คลื่น โดยคลื่นไม่สามารถที่จะก่อตัวเป็นก้อนของเหลวไปปิดกั้นท่อหรือสัมผัสกับผนังท่อด้านบนได้



รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ
ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)

2.2.2 ลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น(OHP)

เมื่อท่อความร้อนทำงาน สารทำงานจะรับความร้อนจากส่วนทำระเหย และระเหยพาความร้อนไปทิ้งให้กับส่วนควบแน่น โดยการกลั่นตัวจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) ต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ซึ่งในที่นี้เรียกว่า ลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นดังสมการที่ (2.1)

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \tag{2.1}$$

ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนนั้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุม การส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนด้วย คือ ค่าความต้านทานความร้อน แสดงไว้ในสมการที่ (2.2)

$$Z = \frac{(T_{evap} - T_{cond})}{Q} \tag{2.2}$$

และในการที่จะหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สารหล่อเย็น ได้รับที่ส่วนควบแน่นโดยวัดค่า อุณหภูมิของสารหล่อเย็นทั้งขาเข้า ขาออก และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.3)

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.3)$$

2.2.3 ประเภทของการเดือด

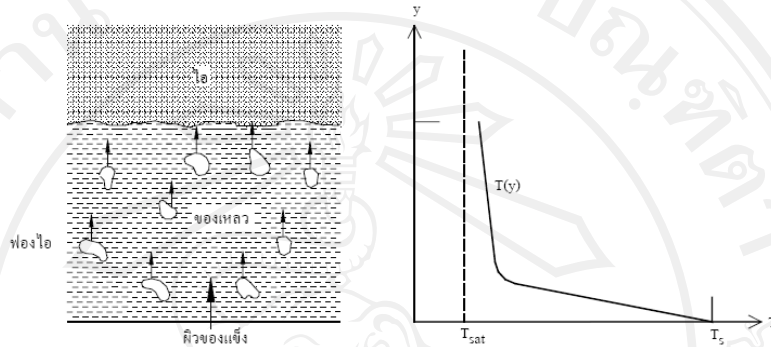
การเดือดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการระเหย(Evaporation) ในผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลว ขบวนการจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผิว T_s มีค่าเกินอุณหภูมิอิ่มตัว T_{sat} ที่สอดคล้องกับความดันของของเหลว นั้น หลังจากนั้นจะเริ่มมีการถ่ายเทความร้อนจากผิวของแข็ง ไปสู่ของเหลว หากใช้กฎของ Newton เกี่ยวกับการทำเย็นมาพิจารณาปัญหานี้ จะได้ว่า

$$q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e \quad (2.4)$$

โดยที่ $\Delta T_e = T_s - T_{sat}$ เป็นอุณหภูมิส่วนเกิน(Excess temperature) ขบวนการนี้จะควบคุมโดยการเกิดฟอง (Bubble formation) ที่เติบโตขึ้นและแยกตัว(Detach) ออกไปจากผิว การเติบโตและพลศาสตร์ของฟอง นั้นจะมีลักษณะที่ซับซ้อนมากโดยขึ้นกับอุณหภูมิส่วนเกิน ลักษณะของผิว และคุณลักษณะทางกายภาพ ความร้อนของของไหล เช่น แรงตึงผิว เป็นต้น นอกจากนี้พลศาสตร์ของการเกิดฟองก็มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหวยของของไหลที่ใกล้ๆกับผิว และมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างมาก การเดือดอาจเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆกัน ตัวอย่างเช่น การเดือดแบบแอ่ง(Pool boiling) จะเกิดขึ้นโดยที่มีแอ่งของเหลวที่อยู่นิ่ง มีการเคลื่อนไหวที่รอบๆผิว เนื่องจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ หรือการผสมกันเนื่องจากการเติบโต(Growth) และการแยกตัวของฟอง(Departure) ส่วนการเดือดแบบพาบังคับ (Forced convection boiling) จะเกิดขึ้นโดยใช้สื่อค้ำานนอกทำให้เกิดการเคลื่อนไหวยของของไหลพร้อมกับการพาธรรมชาติและการผสมของฟอง อาจแยกการเดือดออกเป็น การเดือดแบบใต้เย็น(Subcooled boiling) หรือการเดือดอิ่มตัว(Saturated boiling) ในการเดือดแบบใต้เย็นนั้นอุณหภูมิของของเหลวจะต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว และฟองที่เกิดขึ้นที่ผิวจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวได้ แต่การเดือดอิ่มตัวนั้นจะเกิดโดยที่อุณหภูมิของของเหลวเกินค่าอุณหภูมิอิ่มตัว ฟองที่เกิดที่ผิวนั้นจะถูกของเหลวดันขึ้นไปด้วยแรงลอยตัว และหนีไปถึงผิวอิสระ (Free surface)

2.2.3.1 การเดือดแบบแอ่ง

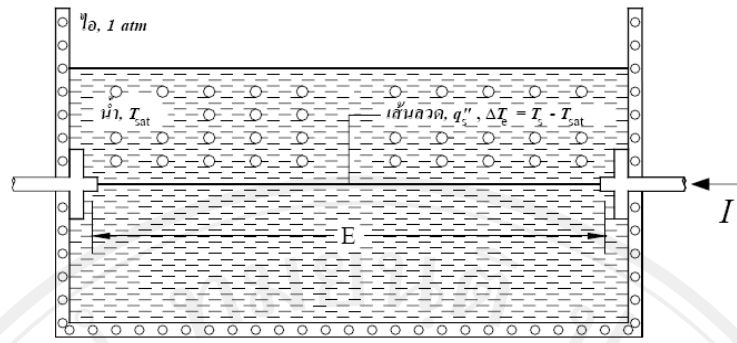
รูปที่ 2.4 แสดงการศึกษาการเดือดแบบแอ่งอิ่มตัว(Saturated pool boiling) ตั้งแต่ว่า แม้อุณหภูมิเฉพาะจุด(Local temperature) ของของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อออกห่างผิวของแข็งก็ตาม อุณหภูมิของเหลวส่วนใหญ่(Bulk temperature) จะอยู่ที่ค่าสูงกว่าค่าอิ่มตัว ฟองที่เกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของเหลว-ของแข็งนั้นจะลอยขึ้น และมีของเหลวไหลเข้าแทนที่ที่ที่รอยต่อนั้น จะเข้าใจกลไกการเดือดเช่นนี้ได้ง่ายขึ้นหากเราพิจารณาเส้นกราฟของการเดือด(Boiling curve)



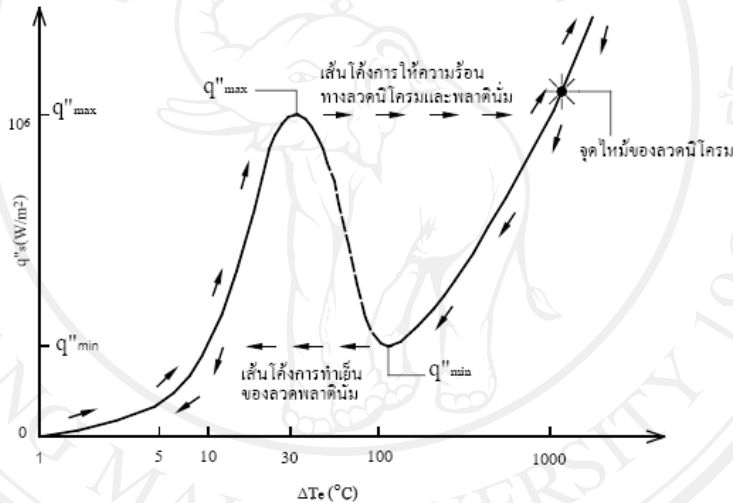
รูปที่ 2.4 การกระจายอุณหภูมิในกานเดือดแบบแอ่งที่ผิวรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ
ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)

2.2.3.2 เส้นกราฟของการเดือด

Nukiyama (1934) เป็นคนแรกที่แบ่งการเดือดแบบแอ่งเป็นช่วงการเดือดต่างๆ กันโดยทำการหาอัตราการความร้อนจากเส้นลวดนิโครม ที่วางตัวในแนวนอนไปสู่น้ำอิ่มตัว(Saturated water) โดยการวัดกระแสที่ไหล I และศักย์ไฟฟ้า E โดยอาศัยเครื่องมือทดลองตามรูป 2.5 หากค่าอุณหภูมิของเส้นลวดได้จากหลักการที่ว่าความต้านทานความร้อนของเส้นลวดจะแปรกับอุณหภูมิ ซึ่งเรียกกันว่า การให้ความร้อนแบบควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้า(Power-controlled heating) อุณหภูมิเส้นลวด T_s ไม่ใช่ตัวแปรอิสระ แต่กำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไว้เป็นตัวแปรอิสระ เมื่อสร้างกราฟตามรูป 2.6 และดูตามทฤษฎีของลูกศรของเส้นโค้งการให้ความร้อน(Heating curve) นั้นพบว่า เมื่อให้กำลังไฟฟ้าเข้าไป อัตราความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในตอนแรก ต่อมาจะเพิ่มอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิส่วนเกิน(Excess temperature) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 เครื่องมือให้ความร้อนโดยคัมกำลังไฟฟ้าของ Nukiyama
ในการหาเส้นกราฟการเดือด ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟการเดือดของ Nukiyama ในกรณีน้ำอ้อมตัว
ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)

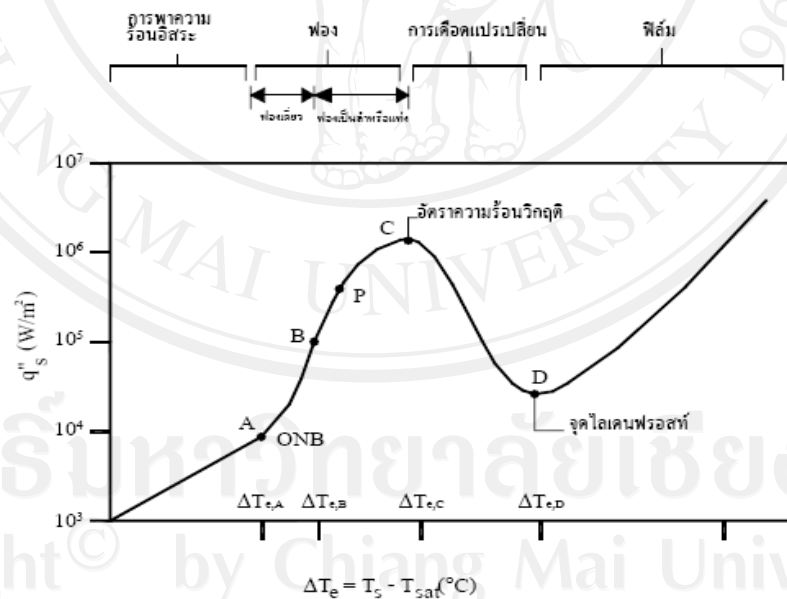
Nukiyama ตั้งเกตว่าจะไม่เกิดการเดือดแบบฟองขึ้นจนกว่า $\Delta T_e \approx 5^\circ\text{C}$ หากเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้น อัตราความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกินขีดจำกัดหนึ่งคือ q''_{max} อุณหภูมิจะกระโดดไปสู่อุณหภูมิหลอมเหลวของลวดอย่างรวดเร็วและเกิดการไหม้(Burnout) ขึ้น อย่างไรก็ตาม หากทดลองซ้ำโดยใช้เส้นลวดทองคำขาว(Platinum) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าแล้ว (2045 K) สามารถจะควบคุมการเดือดให้อยู่เหนือค่าสูงสุดนั้นได้โดยไม่เกิดการไหม้ เมื่อลดกำลังไฟฟ้าลงเรื่อยๆ ค่า ΔT_e จะแปรเปลี่ยนไปกับ q''_s ตามเส้นโค้งแห่งการทำความเย็น(Cooling curve) ตามรูป 2.6 เมื่ออัตราความร้อนถึงจุดต่ำสุด

(Minimum point) q''_{min} แล้ว หากลดกำลังลงไปอีกจะทำให้อุณหภูมิส่วนเกินนั้นตกลงอย่างรวดเร็ว ขบวนการจะวิ่งไปตามเส้นโค้งเริ่มแรกกลับไปสู่จุดอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่ง

Nukiyama เชื่อว่าลักษณะการไม่ซ้ำทางเดิม(Hysteresis effect) ตามรูปที่ 2.6 นั้นเป็นผลจากวิธีการควบคุมกำลังความร้อนของเขาเองซึ่ง ΔT_c ไม่เป็นตัวแปรอิสระ และยังเชื่อว่าหากใช้ขบวนการให้ความร้อนที่ทำให้ ΔT_c เป็นตัวแปรอิสระแล้วจะหาส่วนที่ยังขาด(เส้นประ) ของเส้นโค้งนี้ได้ ต่อมา Drew and Mueller (1937) ได้ยืนยันความจริงนี้โดยทดลองใช้ท่อที่มีไอน้ำไหลภายในที่ความดันต่างๆกัน จึงสามารถควบคุมค่าของ ΔT_c ในการเดือดของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่างๆได้ และเติมเส้นกราฟการเดือดนี้จนครบ

2.2.3.3 ชนิดของการเดือดแบบแอ่ง

หากพิจารณาการเดือดแบบแอ่งนี้อย่างถี่ถ้วนจะสามารถแบ่งออกเป็นช่วงต่างๆได้ ช่วงต่างๆนี้แยกตามเส้นโค้งแห่งการเดือดในรูป 2.7 ซึ่งเป็นการเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ จากสมการ 2.4 สังเกตว่า q''_s ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h และอุณหภูมิส่วนเกิน ΔT_c ดังนั้นจะแบ่งช่วงการเดือดต่างๆได้ตามค่าของ ΔT_c คือ



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟการเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ

ซึ่งแสดงอัตราความร้อนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ประดิษฐ์ เทอดทูล (2544)

ก. การเดือดแบบพาความร้อนธรรมชาติ(Free convection boiling) เกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_c < \Delta T_{c,A}$ ประมาณ 5°C ในช่วงนี้ไอที่เกิดขึ้นไม่มากพอที่จะสัมผัสกับผิวของเหลวจนทำให้เกิดการเดือดได้ที่อุณหภูมิอิ่มตัว หากเพิ่มอุณหภูมิส่วนเกินขึ้นอีกจะเกิดการรวมตัวของไอเป็นฟองขึ้น แต่ที่จุด A (ซึ่งมักเรียกกันว่า จุดเกิดการเดือดแบบฟอง (Onset of nucleate boiling, ONB)) นั้น ของไหลจะเกิดการเคลื่อนไหวโดยผลของการพาความร้อนธรรมชาติอยู่แล้ว แต่จะเป็นแบบราบเรียบ(Laminar) หรือปั่นป่วน (Turbulence) ก็ได้ ค่า h จะแปรกับ ΔT_c ยกกำลัง $1/4$ หรือ $1/3$ ดังนั้นค่า q''_s จะแปรกับ ΔT_c กำลัง $5/4$ หรือ $4/3$ ตามลำดับ

ข. การเดือดแบบฟอง(Nucleate boiling) การเดือดแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_{c,A} < \Delta T_c \leq \Delta T_{c,c}$ โดยที่ $\Delta T_{c,c} \approx 30^\circ\text{C}$ ในช่วงนี้จะแบ่งชนิดการไหลเป็นชนิดย่อยได้อีกสองชนิด โดยในช่วง A-B นั้น ที่ตำแหน่งการเกิดฟอง(Nucleation site) จะเกิดฟองเดี่ยว (Isolate bubble) แยกกันอยู่ที่ผิวตามรูป 2.5 การแยกนี้จะทำให้ของไหลที่ใกล้ผิวเกิดการผสมกัน ทำให้ค่า h กับ q''_s เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้การถ่ายเทความร้อนจะผ่านจากผิวไปสู่ของเหลวโดยตรง ไม่ได้ผ่านฟองที่ลอยตัวขึ้นไป หากเพิ่มค่า ΔT_c ไปจนถึง $\Delta T_{c,B}$ แล้วจะเกิดฟองขึ้นที่ตำแหน่งการเกิดฟองอีกหลายตำแหน่งทำให้ฟองไอบนกันไปมาและรวมตัวกัน ในช่วง B-C ไอจะลอยขึ้นไปเป็นลำ(Jet) หรือเป็นเสา(Column) ซึ่งจะเข้าประสานกันเป็นก้อนไอ(Slug of vapour) ตามรูปที่ 2.7 เมื่อฟองหนาแน่นมากขึ้นจะแทรกซ้อนกันจนทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของของเหลว จะเห็นจุดหักเหของเส้นกราฟการเดือดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุด P ที่จุดนี้หากเพิ่ม ΔT_c ขึ้น h จะลดลง แม้ว่า q''_s ซึ่งเป็นผลคูณของ h กับ ΔT_c จะเพิ่มขึ้นก็ตาม แนวโน้มนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก ในช่วงที่ $\Delta T_c > \Delta T_{c,p}$ นั้น ค่า ΔT_c ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมากกว่าค่า h ที่ลดลง ที่จุด C หากเพิ่มค่า ΔT_c ไปอีกจะสมดุลกับค่า h ที่ลดลงพอดี จนเกิดค่าอัตราความร้อนวิกฤต (Critical heat flux) ขึ้น ซึ่ง $q''_{s,C} = q''_{max}$ ในกรณีของน้ำนั้นมีค่าเกิน 1 MW/m^2 ที่จุดสูงสุดนี้ จะเกิดฟองมากจนของเหลวไม่สามารถเข้าไปเปียกผิวถ่ายเทความร้อนได้

ค. การเดือดแปรเปลี่ยน(Transition boiling) ช่วงนี้จะมี $\Delta T_{c,c} \leq \Delta T_c \leq \Delta T_{c,d}$ ซึ่ง $\Delta T_{c,d} \approx 120^\circ\text{C}$ อาจเรียกว่าการเดือดแบบแปรเปลี่ยน หรือการเดือดฟิล์มไม่เสถียร (Unstable film boiling) หรือการเดือดแบบฟิล์มบางส่วน (Partial film boiling) จะเกิดฟองเร็วมากจนมีแผ่นฟิล์มไอบปกคลุมอยู่ที่จุดใดๆของผิวนั้น ลักษณะการเดือดจะเปลี่ยนไปมาระหว่างการเดือดแบบฟองและการเดือดแบบฟิล์ม แต่หาก ΔT_c เพิ่มขึ้น สัดส่วนของผิวน้ำที่ปกคลุมโดยฟิล์มนั้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำความร้อนของไอจะน้อยกว่าของเหลวมาก h จะลดลงเมื่อ ΔT_c เพิ่มขึ้น (รวมทั้ง q''_s)

ง. การเดือดแบบฟิล์ม(Film boiling) ช่วงนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_c > \Delta T_{c,D}$ คือที่จุด D ของเส้นโค้ง เรียกกันว่าจุดไลเดนฟรอสท์(Leidenfrost point) จะมีค่าอัตราการความร้อนต่ำสุด $q''_{s,D} = q''_{min}$ ผิวจะปกคลุมด้วยแผ่นไอ (Vapour blanket) การถ่ายเทความร้อนจากผิวไปสู่ของเหลวเกิดขึ้นโดยการนำผ่านแผ่นไอนี้ Leidenfrost ค้นพบปรากฏการณ์นี้ครั้งแรกในปี 1756 โดยสังเกตหยดน้ำที่เคลื่อนตัวไปมาบนผิวร้อน หากเพิ่มอุณหภูมิผิวขึ้นอีกจะมีการแผ่รังสีผ่านฟิล์มไอมากขึ้น และอัตราการความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อ ΔT_c เพิ่มขึ้น

2.2.4 ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อน (Performance limits)

เมื่อท่อความร้อนแบบทั่วไปทำงาน สารทำงานที่บรรจุอยู่ในท่อความร้อนก็จะเกิดการระเหย ควบแน่น และไหลเวียนไปมาภายในท่อความร้อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อท่อความร้อนส่งผ่านความร้อนที่ค่าความร้อนค่าหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างที่ทำให้สารทำงานไม่สามารถรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ ทำให้การส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงผ่านตัวท่อความร้อนเกิดขึ้นไม่ได้ และพื้นผิวส่วนที่ระเหยจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับแหล่งให้ความร้อนในที่สุด ค่าความร้อนที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ข้างต้น เรียกว่า ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อน โดยขีดจำกัดต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

- ขีดจำกัดคาปิลลารี หรือขีดจำกัดwick (Capillary limit or Wick limit) เกิดขึ้นเมื่อแรงดันคาปิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะผลักดันให้ของเหลวในส่วนควบแน่น ไหลกลับมายังส่วนที่ระเหย ก็จะทำให้ของเหลวที่ส่วนที่ระเหยไม่เพียงพอในการระเหย ทำให้เกิดการแห้ง (Dry out) ที่ส่วนที่ระเหย และทำให้อุณหภูมิผิวท่อในส่วนที่ระเหยสูงขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิแหล่งความร้อน

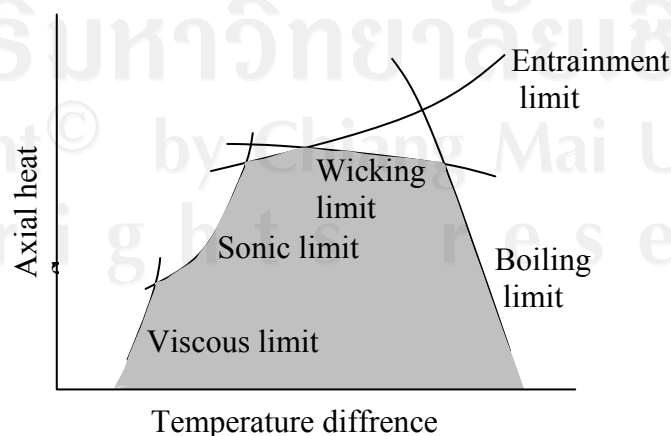
- ขีดจำกัดการหอบพา หรือขีดจำกัดการท่วม (Entrainment limit or Flooding limit) เมื่อเพิ่มค่าความร้อนเข้าไปในตัวท่อความร้อน ไอสารทำงานจะมีความเร็วสูงขึ้น เมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้น แรงเฉือนที่ผิวสัมผัสไอ-ของเหลวก็จะมีค่าสูงขึ้น ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดการหอบพาและการท่วม เกิดขึ้นเมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้นจนแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสไอ-ของเหลวมีค่าเพียงพอ ที่จะต้านการไหลกลับของของเหลว กรณีที่เป็นท่อความร้อนที่มีwick แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของโครงสร้างwick ทำให้ของเหลวไม่สามารถไหลกลับไปยังส่วนที่ระเหยได้ และเกิดการแห้งขึ้น ในที่สุดการส่งผ่านความร้อนก็ไม่สามารถทำได้อีกต่อไป

- **ขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit)** จากที่ทราบในตอนต้นว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนในท่อความร้อนเกิดจากการระเหย และความดันของสารทำงาน ดังนั้นจะพบว่ามีการเดือดของสารทำงานเกิดขึ้นในส่วนทำระเหยเสมอ เมื่อเพิ่มค่าความร้อนเข้าไปในท่อความร้อน การเดือดก็จะรุนแรงขึ้น และจะพบว่าฟิล์มไอเคลือบที่ผิวส่วนทำระเหย ฟิล์มไอนี้จะเป็นชั้นระหว่างผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและของเหลวในส่วนทำระเหย ทำให้ของเหลวในส่วนทำระเหยไม่สามารถสัมผัสกับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และการส่งผ่านความร้อนจากผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนทำระเหยไปยังสารทำงานก็จะลดลงอย่างมาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไอน้อยกว่าของเหลวมากทำให้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนพอไอก็จะเกิดขึ้นในตัววัสดุพรุนในส่วนทำระเหย และแทนที่ของเหลวในวัสดุพรุนทำให้เกิดการแห้งขึ้นเช่นกัน

- **ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit)** เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนกับท่อความร้อนแบบธรรมดาด้วยอุณหภูมิสูงๆ ที่เงื่อนไขการทำงานนี้ความเร็วไอจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบความเร็วเสียงในไอ ซึ่งจะทำให้เห็นว่าการส่งผ่านความร้อนจะไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเมื่อความเร็วไอมีค่าใกล้เคียงความเร็วเสียง ดังนั้นการส่งผ่านความร้อนจึงถูกจำกัดที่ค่าความเร็วไอกำหนดหนึ่งซึ่งไม่เกินความเร็วเสียง

- **ขีดจำกัดความหนืด หรือขีดจำกัดความดันไอ (Viscous limit or Vapor pressure limit)** เกิดขึ้นเมื่อท่อความร้อนแบบธรรมดาทำงานที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิต่ำ ความดันตกคร่อมในการไหลเนื่องจากความหนืดของไอจะมีผลสำคัญทำให้ไอไม่สามารถไหลได้ เนื่องจากความดันไอในส่วนทำระเหยน้อยกว่าความดันตกคร่อมทำให้การไหลเวียนของสารทำงานไม่เกิดขึ้น และการส่งผ่านความร้อนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วย

ดังนั้นในการออกแบบท่อความร้อน จึงต้องมีการพิจารณาในเรื่องของขีดจำกัดดังกล่าว เพื่อตรวจสอบสถานะที่จะนำท่อความร้อนนั้นๆ ไปใช้งานว่าเกินกว่าขีดจำกัดใดขีดจำกัดหนึ่งหรือไม่ จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความหนาแน่นความร้อนตามแนวแกน พบว่าการออกแบบท่อความร้อนต้องออกแบบให้อยู่ในพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน Dunn and Reay (1982)

ที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อนแบบธรรมดา แต่สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นนั้นจะมีขีดจำกัดดังนี้ ขีดจำกัดความหนืด ขีดจำกัดการเดือด ขีดจำกัดการหอบพา และ ยังมีขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ซึ่งเป็นขีดจำกัดการทำงานของท่อที่จะเริ่มต้นทำงาน โดยที่ขีดจำกัดล่างนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำงานของท่อความร้อน และที่ผ่านมายังหาข้อสรุปเกี่ยวกับขีดจำกัดล่างของท่อความร้อนแบบสั้นยังไม่ชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการทดลองเชิงปริมาณเพื่อหาขีดจำกัดล่างของท่อความร้อนแบบสั้นต่อไป

2.2.5 ตัวแปรไร้มิติ

คือ กลุ่มของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่สำคัญมีดังนี้

2.2.5.1 ตัวเลขบอนด์ (Bond number, Bo) เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิว ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักได้แก่ ชนิดของสารทำงานและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ Bo คือ แรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นเป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศนั้นเกิดจากการเดือดของของเหลวพยายามที่จะลอยขึ้นไปสู่ผิวด้านบน ส่วนด้านล่างคือแรงตึงผิวของของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ของเหลวพยายามไม่ให้ฟองอากาศหลุดไปจากผนังท่อ

เมื่อ Bo เพิ่มขึ้นทำให้แรงลอยตัวมากขึ้น แรงตึงผิวน้อย ฟองไอจะเคลื่อนที่ไปที่ส่วนควบแน่นได้ง่ายเนื่องจากมีแรงตึงผิวน้อยลง ขณะที่แรงลอยตัวเพิ่มมากขึ้นฟลักซ์ความร้อนก็เพิ่มมากขึ้นด้วยสามารถนิยามได้ดังนี้

$$Bo = Di \left[g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma} \right) \right]^{0.5} \quad (2.5)$$

2.2.5.2 ตัวเลข Jacob number (Ja) เป็นอัตราส่วนของความร้อนสัมผัสต่อความร้อนแฝงของสารทำงาน คือปรากฏการณ์การระเหยของสารทำงานเมื่อให้ความร้อนแก่ท่อความร้อน ความร้อนบางส่วนจะทำให้ฟิล์มของเหลวบริเวณผนังท่อเกิดการระเหยสามารถนิยามได้ดังนี้

$$Ja = \frac{h_{fg}}{C_p T_v} \quad (2.6)$$