หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การเดือดเป็นชั้นฟิล์มบนวัตถุทรงกลม

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน,การเดือดเป็นชั้นฟิล์มและสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับของไหล

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [5]

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนมีทั้งสิ้น 3 แบบ ได้แก่

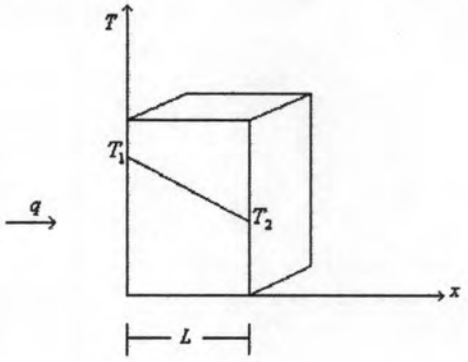
2.1.1 การนำความร้อน (conduction heat transfer)

การนำความร้อนหมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจะถ่ายเทจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลอย่างต่อเนื่องกัน ค่าฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อนในหนึ่งมิติคำนวณจาก

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของตัวกลางมีหน่วยเป็น $W/m\cdot K$

$\frac{dT}{dx}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ

2.1.2 การพาความร้อน (convention heat transfer)

การพาความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งบรรยายได้คือ

$$q''_x = \rho C_p \Delta T v_x \tag{2.2}$$

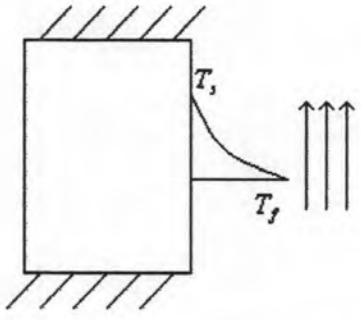
โดยเหตุที่การเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากผิวของแข็งสู่ของไหล พลังงานความร้อนจะถูกโอนถ่ายจากผิวของแข็งโดยเป็นผลมาจากการแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนที่ไปทั้งปริมาตรของของไหล ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวของแข็งถ่ายเทให้กับของไหลนี้จะสามารถคำนวณได้ตามกฎการลดอุณหภูมิของนิวตัน (Newton 's law of cooling)

$$q''_{surface} = h\left(T_s - T_f\right) \tag{2.3}$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของของแข็ง

T_f คือ อุณหภูมิตั้งต้นของของไหล



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของไหล อันเนื่องจากจากผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ

2. การพาความร้อนโดยบังคับ (forced convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลที่เป็นผลมาจากกระทำจากภายนอก เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม

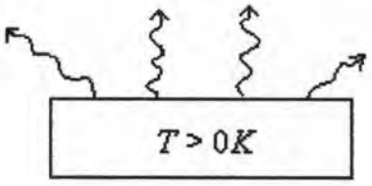
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่พลังงานความร้อนถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) โดยเหตุที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต้องการตัวกลางในการเคลื่อนที่ การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้ ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลางคำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q''_{rad} = \sigma T_s^4 \tag{2.4}$$

โดยที่ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ และมีค่าเท่ากับ $5.67\times10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

T_s คือ อุณหภูมิผิวแผ่รังสี (K)



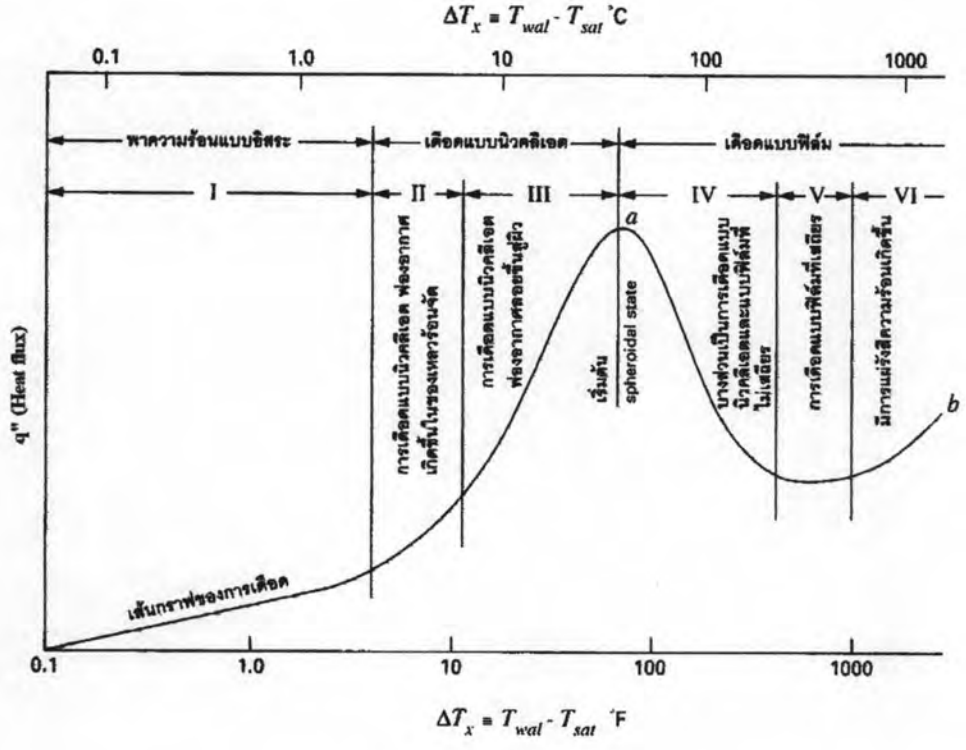
รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

2.2 การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม

การเดือดนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ กันอย่างเช่น การพาความร้อนตามธรรมชาติเกิดเนื่องจากมีแอ่งของเหลวที่อยู่นิ่งและเกิดการเคลื่อนไหวบริเวณผิวหน้า รวมถึงการแยกตัวของไอของเหลว และแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลวและไอ การเดือดลักษณะนี้เรียกว่า การเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling) การเดือดอีกลักษณะหนึ่งเกิดกับของเหลวซึ่งมีการเคลื่อนที่ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงประกอบด้วย การพาความร้อนโดยบังคับ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากกลไกภายนอก พร้อมกันนี้ยังได้รับอิทธิพลจากการพาความร้อนตามธรรมชาติและผลจากแรงลอยตัวอีกด้วย การเดือดลักษณะนี้เรียกว่า การเดือดแบบการพาบังคับ (Forced convection boiling)

2.2.1 การเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling)

เมื่อพิจารณาน้ำที่ถูกต้มภายในกาต้มน้ำจนกระทั่งเริ่มเดือดหรือตัวอย่างของการให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนที่แช่อยู่ในของเหลว เมื่อปริมาณความร้อนที่ให้กับระบบอยู่ในอัตราที่ต่ำไอของของเหลวจะเกิดขึ้นที่ผิวอิสระที่ด้านบนของของเหลว เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (heat flux) ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น จะเริ่มเกิดฟองอากาศบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนซึ่งจะหลุดลอยสู่พื้นผิวอิสระที่ด้านบนของเหลว ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเดือด โดยที่ Nukiyama [6] เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาผลกระทบของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนและของเหลวระบายความร้อน $\left(\Delta T = T_w - T_{sat}\right)$ ต่อมา Farber และ Scorah [7] ได้ทำการทดลอง โดยนำลวดทองคำขาววางในแนวนอนแช่ลงในน้ำจากนั้นให้ความร้อนแก่ลวดทองคำขาวโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวเส้นลวดกับอุณหภูมิที่ความดันไอของน้ำ จากผลการทดลองสามารถพิจารณาภาวะของการเดือดที่เกิดขึ้นได้ ตามลักษณะเส้นโค้งการเดือด (boiling curve) ซึ่งแบ่งได้เป็น 6 ช่วง



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งการเดือด (boiling curve) [8]

ช่วงที่ 1 : ΔT มีค่าน้อย การถ่ายเทความร้อนจากผิวลวดไปสู่น้ำทำได้โดยวิธีการพาความร้อนตามธรรมชาติ การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้เรียกว่า Free convention

ช่วงที่ 2 : ΔT สูงขึ้น ทำให้เกิดฟองไอน้ำขึ้นบนผิวของเส้นลวด แต่ฟองเหล่านี้จะควบแน่นก่อนที่จะลอยขึ้นมาถึงผิวน้ำ

ช่วงที่ 3 : ΔT ที่มากขึ้นทำให้ฟองเกิดมากขึ้น ฟองเหล่านี้จะสามารถคงอยู่ได้นานจนสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยรอบ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวลวดจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วในช่วงที่ 2 และ 3 จะถูกเรียกรวมว่า Nucleate boiling จุดที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่ามากที่สุด (Critical Heat Flux,CHF) เป็นจุดสิ้นสุดของช่วงนี้

ช่วงที่ 4 : เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมาถึงจุดที่มีค่าสูงสุด แล้วยังเพิ่มค่า ΔT ต่อไปอีก ฟองที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากจนไม่สามารถจะเคลื่อนที่ออกจากผิวลวดได้ทันและทำตัวเป็นฉนวนไม่ให้ความร้อนสามารถถ่ายเทออกจากผิวลวด ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง ขณะเดียวกันการหลุดลอยออกไปของฟองอากาศก็ทำให้มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างพื้นผิวถ่ายเทความร้อนและของเหลว ซึ่งเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ความร้อนมีขนาดสูงขึ้นอยู่ช่วงขณะสั้นๆลักษณะเช่นนี้ทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อนในช่วงนี้มีขนาดไม่แน่นอนเป็นอย่างมาก

ช่วงที่ 5 : ในช่วงนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงมีค่าต่ำสุด การเดือดในช่วงนี้มีชื่อว่า Stable film boiling ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นสามารถเคลือบปิดผิวถ่ายเทความร้อนได้ทั้งหมดและมีสภาพคงตัว

ช่วงที่ 6 : ลักษณะพิเศษของการเดือดในช่วงนี้คือ ΔT มีค่าสูงมาก ในช่วงนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

2.2.2 การเดือดแบบพาบังคับ (Forced convention boiling)

สำหรับการเดือดแบบพาบังคับนั้นการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวของวัตถุและของไหล ซึ่งการไหลของของไหลนี้จะถูกบังคับจากภายนอกเช่น จากการใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นต้น โดยทั่วไปสิ่งสำคัญของปัญหาการพาความร้อนคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตและสภาวะการไหลของของไหล การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือวิธีแรกโดยวิธีวิเคราะห์โดยตั้งสมการ ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่สนใจและดำเนินการแก้สมการที่ตั้งขึ้น สำหรับวิธีที่สองนั้น ทำได้โดยอาศัยผลการทดลองเพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ในรูปของพารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับการพาความร้อนโดยบังคับ มักจะเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}) \tag{2.5}$$

พารามิเตอร์ไร้มิติดังกล่าวมีความสำคัญต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยจะจำแนกดังนี้

นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number,Nu)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่บอกถึงการถ่ายเทความร้อนข้ามรอยต่อของตัวกลาง โดยเป็นอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนต่อการนำความร้อนผ่านชั้นของไหลที่มีขนาดของระบบถ่ายเทความร้อนคือ L นั่นคือ

$$Nu = \frac{hL}{k} \tag{2.6}$$

โดย L แทนความยาวเฉพาะ (characteristic length) ของระบบถ่ายเทความร้อน

k แทนค่าการนำความร้อนของของไหล

h แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,Re)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่ระบุรูปแบบการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน โดยเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหน่วงเนื่องจากความหนืด สามารถเขียนได้คือ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{2.7}$$

โดย ρ แทนความหนาแน่นของของไหล

v แทนความเร็วของของไหล

μ แทนความหนืดพลศาสตร์ของของไหล

พรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number,Pr)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่เปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยการพาบังคับกับการนำความร้อน หาได้จากสมการ

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\upsilon}{\alpha} \tag{2.8}$$

โดย C_p แทนความร้อนจำเพาะของของไหลเมื่อความดันคงที่

υ แทนความหนืดจลน์ศาสตร์ของของไหล (μ/ρ)

α แทนค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) ของของไหล ซึ่งเป็นอัตราส่วนของการนำความร้อนกับความสามารถในการจุความร้อน ดังสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \tag{2.9}$$

ขณะที่ของเหลวไหลผ่านบริเวณที่ร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการเดือดตามระยะทางที่ไหลผ่าน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลและความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลกับผนังที่ให้ความร้อน สำหรับรูปแบบการเดือดที่น่าสนใจคือการไหลขึ้นของของเหลวในท่อซึ่งวางอยู่ในแนวตั้งที่มีการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1: Convection heat transfer to liquid คือช่วงตั้งแต่ทางเข้าจนถึงจุดที่เริ่มเกิดฟอง ซึ่งเป็นการไหลในสถานะของเหลวเท่านั้น

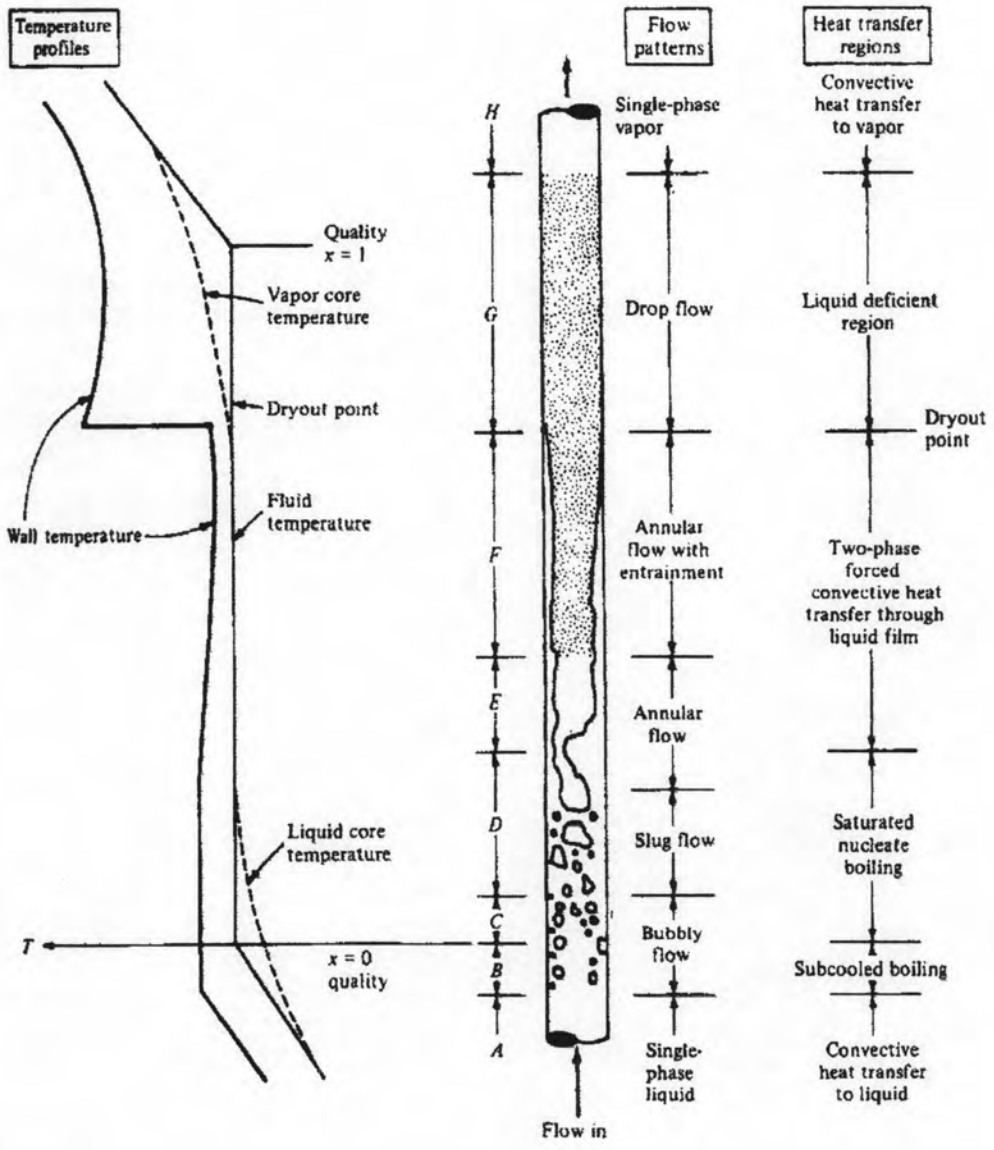
ช่วงที่ 2: Subcooled nucleate boiling คือช่วงตั้งแต่ของเหลวเริ่มเกิดฟองไปจนถึงจุดที่ของเหลวเริ่มเดือด

ช่วงที่ 3: Saturated nucleate boiling ของเหลวในช่วงนี้จะเดือด ซึ่งทำให้ฟองที่เกิดขึ้นสามารถคงตัวอยู่ได้

ช่วงที่ 4: Two-phase forced convective heat transfer through liquid film ในช่วงนี้เป็นการไหลแบบ 2 สถานะโดยจะเกิดช่องว่างของไอน้ำขึ้นที่แกนกลางท่อ และจะขยายตัวขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของฟองกลายเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ที่แกนกลางท่อ

ช่วงที่ 5: Liquid deficient region เป็นช่วงสุดท้ายของการระเหยของฟิล์มของเหลวที่ด้านข้างของผนังท่อ เมื่อถัดจากช่วงนี้ไปจะไม่มีของเหลวภายในท่ออีก

ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงในช่วงต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของการเดือดแบบพาบังคับภายในท่อร้อนแนวตั้ง [9]

พระบรมราชาน ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ [10]

สำหรับการคำนวณเกี่ยวกับการไหลนั้น จะต้องคำนวณระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งประกอบด้วย 3 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกันคือ

1. สมการการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)
2. สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum)
3. สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy)

2.3.1 สมการการอนุรักษ์มวลสำหรับของไหลสถานะเดียว

เมื่อพิจารณาถึงปริมาตรเล็กๆอันหนึ่งซึ่งมีของไหล ไหลเข้าสู่ปริมาตรเล็กๆนี้พบว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตร	=	อัตราการไหลของมวลของของเหลวเข้าสู่ปริมาตร	- อัตราการไหลของมวลของของเหลวออกจากปริมาตร	(2.10)

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left(\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v}\right) \tag{2.11}$$

โดยที่เวกเตอร์ $\rho\vec{v}$ คือการไหลของมวลซึ่งเป็นอัตราสุทธิของมวลที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

และ $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นภายในปริมาตรเล็กๆนั้น

2.3.2 สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลสถานะเดียว

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาปริมาตรเล็กๆหนึ่งจะสามารถดุลโมเมนตัมคือ

อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม	=	อัตราโมเมนตัมที่เข้าสู่ปริมาตร	- อัตราของโมเมนตัมที่ออกจากปริมาตร	- ผลรวมของแรงที่กระทำบนปริมาตร	(2.12)

จะเห็นได้ว่าโมเมนตัมที่เข้าและออกจากปริมาตรของของไหลมีความเร็วทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายเข้าออกในปริมาตรที่พิจารณา ซึ่งอาศัยกลไกลหลัก 2 อย่างคือกลไกลจากการพา (convention) โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นกลุ่มก้อน (bulk fluid flow) เป็นหลัก และกลไกที่สองคือการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของไหล ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้คือความหนืด (viscosity)

แรงที่กระทำบนปริมาตรนี้มีทั้งแรงที่กระทำกับวัตถุทั้งหมด(Body force) และแรงที่ผิว (Surface force) แรงที่กระทำกับวัตถุทั้งหมดเป็นแรงที่กระทำกับวัตถุโดยไม่มีการสัมผัส เช่นแรงโน้มถ่วง ความดัน แรงแม่เหล็ก และแรงทางไฟฟ้า แรงที่สำคัญและมักนำมาพิจารณาโดยทั่วไปก็คือแรงโน้มถ่วงและความดันในระบบ ส่วนแรงที่ผิวเป็นแรงที่กระทำบนพื้นผิววัตถุโดยตรงได้แก่ แรงเนื่องจากความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือน
จากสมการที่2.12 สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} = -\left[\vec{\nabla}\cdot\rho\vec{v}\vec{v}\right] - \vec{\nabla}P - \vec{\nabla}\cdot\vec{\tau} + \rho\vec{g} \qquad (2.13)$$

โดยที่ $\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร

$\vec{\nabla}\cdot\rho\vec{v}\vec{v}$ คือ ผลจากการไหลของโมเมนตัมโดยการพาต่อหน่วยปริมาตร

$\vec{\nabla}\cdot P$ คือ ผลจากการเปลี่ยนแปลงของความดันที่กระทำลงบนปริมาตรที่สนใจต่อหน่วยปริมาตร

$\vec{\nabla}\cdot\vec{\tau}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเนื่องมาจากความหนืดต่อหน่วยปริมาตร

$\rho\vec{g}$ คือ แรงโน้มถ่วงของปริมาตรที่สนใจต่อหน่วยปริมาตร

สมการที่ 2.13 มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์(Navier-Stokes equation)

2.3.3 สมการการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของไหลสถานะเดียว

เมื่อพิจารณาปริมาตรคงที่อันหนึ่งซึ่งมีของไหลไหลเข้าออก สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานความร้อนสำหรับของไหลบรรจุภายในปริมาตรนี้ ที่เวลาใดๆดังนี้

$$E_{inc_k} = E_{i_k_conv} - E_{o_k_conv} + E_{i_cond} + E_{w} \qquad (2.14)$$

โดยที่ E_{inc_k} แทนอัตราการสะสมของพลังงานความร้อนภายในปริมาตร

$E_{i_k_conv}$ แทนอัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนโดยการพา

$E_{o_k_conv}$ แทนอัตราการไหลออกของพลังงานความร้อนโดยการพา

E_{i_cond} แทนอัตราสุทธิของความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการนำ

E_w แทนอัตราการทำงานของระบบต่อสิ่งแวดล้อม

สมการที่ 2.14 นี้คือกฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิดในสภาวะที่ไม่คงที่ (open unsteady state system) แต่ยังไม่สมบูรณ์เพราะพิจารณาเพียงพลังงานกลแต่ไม่ได้รวมรูปแบบการถ่ายเทพลังงานในลักษณะอื่น เช่นการเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ หรือการแผ่รังสี ในสมการนี้พลังงานจลน์เป็นพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลโดยรวม (คือ $\frac{1}{2}\rho v^2$ เป็นค่าต่อหน่วยปริมาตร) พลังงานภายใน (internal energy) เป็นพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ (translation) ของโมเลกุล รวมถึงพลังงานเนื่องจากการอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ดังนั้นจะพบว่าพลังงานภายในขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉพาะจุดและความหนาแน่นของของไหล สำหรับพลังงานศักย์นั้นจะพิจารณาว่ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยและจะไม่พิจารณา

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_0} = \rho_g h_{fg}\frac{\partial \delta}{\partial t} - \rho_f v_r C_p\left(T_{fg} - T_0\right)\Big|_{r=r_0+\delta} \qquad (2.16)$$

k = ค่าการนำความร้อนของวัตถุทรงกลม (W/m-K)

h_{fg} = ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (J/kg)

δ = ความหนาของชั้นไอ (m)

T_0 = ค่าอุณหภูมิตั้งต้นของของเหลว (K)

T_{fg} = ค่าอุณหภูมิที่จุดเดือดของของเหลว (K)

v_r = ความเร็วของของเหลวตามแนวรัศมี (m/s)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg-K)

ρ_g, ρ_f = ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มและของเหลว ตามลำดับ (kg/m^3)

2.4 ข้อสมมุติฐานสำหรับการคำนวณการนำความร้อนภายในทรงกลมตัน

สำหรับสมการพลังงานความร้อน จะสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนของวัตถุทรงกลมภายใต้สมมติฐานดังนี้

1 สมการการนำความร้อนภายในวัตถุทรงกลม กำหนดให้อุณหภูมิภายในทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีและแนวมุม อีกทั้งยังมีการพิจารณาถึงอุณหภูมิที่กระจายภายในทรงกลมเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{k}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T}{\partial \theta}\right) \qquad (2.17)$$

2 ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากผิวทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก

$$q'' = -k\left.\frac{dT}{dr}\right|_{r=r_0} = -k\frac{T_s - T_{s-1}}{\Delta r} \qquad (2.18)$$

โดยที่ T_s เป็นอุณหภูมิที่ผิวทรงกลม

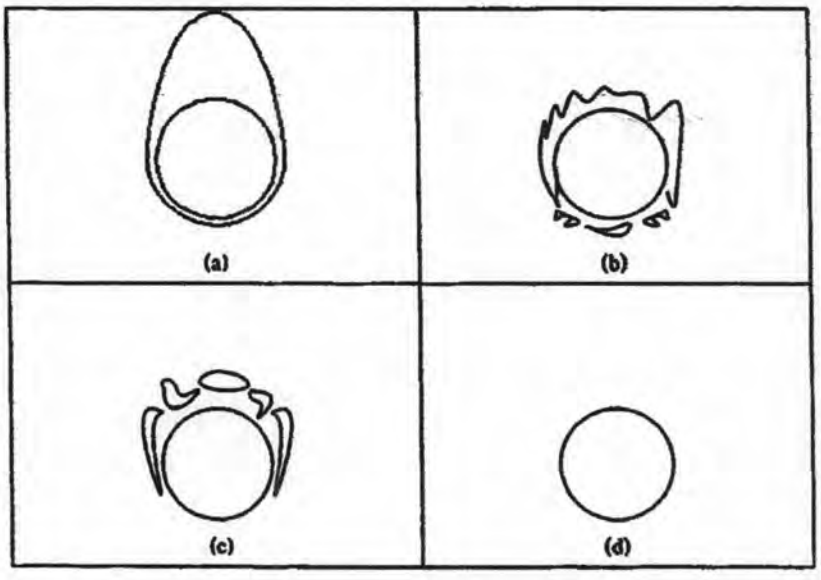
T_{s-1} เป็นอุณหภูมิที่ถัดเข้ามาจากผิวทรงกลมเป็นระยะทาง Δr ตามแนวรัศมี

3 อัตราการนำความร้อนระหว่างผิวทรงกลมกับชั้นของไหลที่เกาะติดกับผิวทรงกลมมีค่าเท่าอัตราการพาความร้อนจากปริมาตรของของไหลที่เกาะติดอยู่กับผิวทรงกลมไปยังปริมาตรของของไหลหลักที่อยู่ห่างออกไป

$$-k\left.\frac{dT}{dr}\right|_{r=r_0} = h\left(T_s - T_f\right) \tag{2.19}$$

2.5 การหลุดลอกของชั้นฟิล์ม

เมื่อวัตถุทรงกลมที่มีอุณหภูมิสูงมากสัมผัสกับของเหลวระบายความร้อน วัตถุทรงกลมนี้จะการถ่ายเทความร้อนออกมาสู่ของเหลวระบายความร้อน เกิดการเดือดเป็นชั้นฟิล์ม ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน แต่การเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มจะคงรูปอยู่ได้ที่ความหนาและช่วงเวลาจำกัดดังแสดงในรูป (2.6.a) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่นานขึ้นจะพบว่ามีการหลุดลอกและการยุบตัวของชั้นฟิล์ม ซึ่งเกิดเนื่องจากชั้นฟิล์มไม่สามารถรักษาสมดุลภายในตัวเอง ทำให้เกิดการควบแน่นกลับลงมาซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นฟิล์มดังแสดงในรูป (2.6.b) และเกิดมีการแยกตัวออกจากชั้นฟิล์มของฟองไอน้ำดังแสดงในรูป (2.6.c) ในที่สุดแล้วชั้นฟิล์มก็จะหลุดลอกจนหมดดังแสดงในรูป (2.6.d)



รูปที่ 2.6 การจำลองการหลุดลอกของชั้นฟิล์ม