บทที่ 2
ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับงานโครงการ

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน (Conduction) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกันแต่มีอุณหภูมิต่างกัน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ เกิดได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ส่วนในของเหลวและแก๊ส มักจะแยกไม่ออกจากการเคลื่อนที่แบบการพา เพราะมีการเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ และการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็ง (Vibration Energy) กฎพื้นฐานเกี่ยวกับการนำความร้อนนั้นได้มาจากการทดลอง ซึ่งมีชื่อเรียกว่า กฎของฟูริเยร์ (Fourier Law) และมีนิยามว่า “อัตราการไหลของความร้อนโดยการนำในทิศทางที่กำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ซึ่งตั้งได้ฉากกับทิศทางการไหลและเกรเดียนท์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น” เขียนได้ดังนี้

$$q_x = - kA(dT/dx) \qquad (2.1)$$

เมื่อ q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่ A ในแนวแกนของทิศทาง x (W)

K คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ ($W/m^2°C$)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน (m^2)

dT/dx คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (°C)

2.1.2 การพาความร้อน (Convection)

เป็นการนำความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล ไหลผ่านวัตถุแข็งหรือภายในท่อ ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง ตัวอย่างการต้มน้ำ น้ำที่อยู่ก้นกาได้รับความร้อนก่อนก็ร้อนเร็วกว่าทำให้ความหนาแน่นลดลง จึงลอยตัวขึ้นข้างบน น้ำจากส่วนบนซึ่งเย็นกว่าก็จะเคลื่อนที่ลง

ก้นกา เข้าไปแทนที่น้ำที่ลอยขึ้นข้างบนนอกจากตัวมันเองจะเคลื่อนที่แล้วยังพาเอาความร้อนขึ้นไปด้วย การพาความร้อน แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ

2. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free Convection หรือ Natural Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

สมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน คือ

$$q = hA(T_h - T_e) \qquad (2.2)$$

ความสัมพันธ์นี้รู้จักในนาม “กฎการเย็นตัวของนิวตัน” (Newton’s of Cooling)

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ ($W/m^{2\circ}C$)

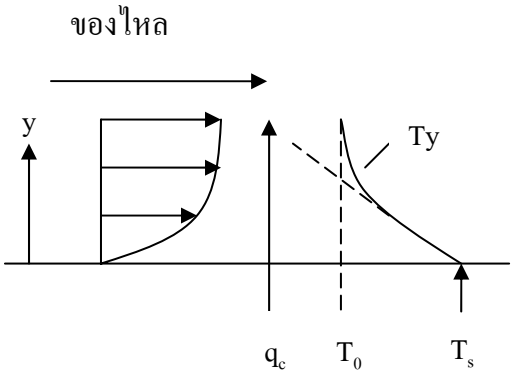
T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า ($^\circ C$)

T_e คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า ($^\circ C$)

การไหลของของไหลมี 2 แบบ คือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ของไหลไหลเป็นชั้นๆ ขนานกัน ความร้อนจะถ่ายเทจากผิวของของแข็งโดยการนำ และถ่ายเทต่อ ๆ กันไปในของไหล โดยการนำผ่านชั้นของของไหล

2. แบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ของไหลเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลด้วย

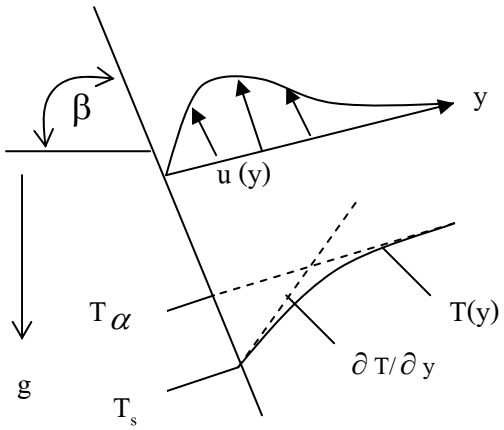


รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ ของการพาความร้อนแบบบังคับ

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าลมชั้นที่อยู่ใกล้กับผิวของแผ่นวัตถุจะมีความเร็วต่ำกว่าชั้นที่อยู่ห่างออกจากผิว เนื่องจากผลกระทบของแรงเสียดทาน โดยที่ของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุจะมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของวัตถุกับชั้นของของไหลที่ติดกับผิวจึงเป็นการถ่ายเทโดยการนำอย่างเดียว ถึงแม้ว่าจะเป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ตามก็ต้องหา dT/dy ที่ผิวของวัตถุจากอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวไปยังของไหลหลักที่อยู่ห่างออกไป เพราะอัตราการนำความร้อนที่ถ่ายเทจากผิววัตถุไปยังชั้นของของไหลที่ตัดกับผิวจะเท่ากับอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวไปยังของไหลหลัก นั่นคือ

$$q = -k_f \partial T/\partial y \Big|_{y=0} = h_c (T_s - T\alpha) \qquad (2.3)$$

ค่า dT/dy ที่ผิวของวัตถุ จึงขึ้นอยู่กับสภาพของการไหลของของไหลที่มีความเร็วสูงจะให้ค่า dT/dy สูงด้วย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าสูง นอกจากนี้ค่า k_f ของของไหลก็มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกัน เช่น ค่า k_f ของน้ำมากกว่าค่า k_f ของ อากาศ ดังนั้นผลของสมการที่ (2.2) ค่า h_c ของน้ำ จะมีค่าสูงกว่า h_c ของอากาศ



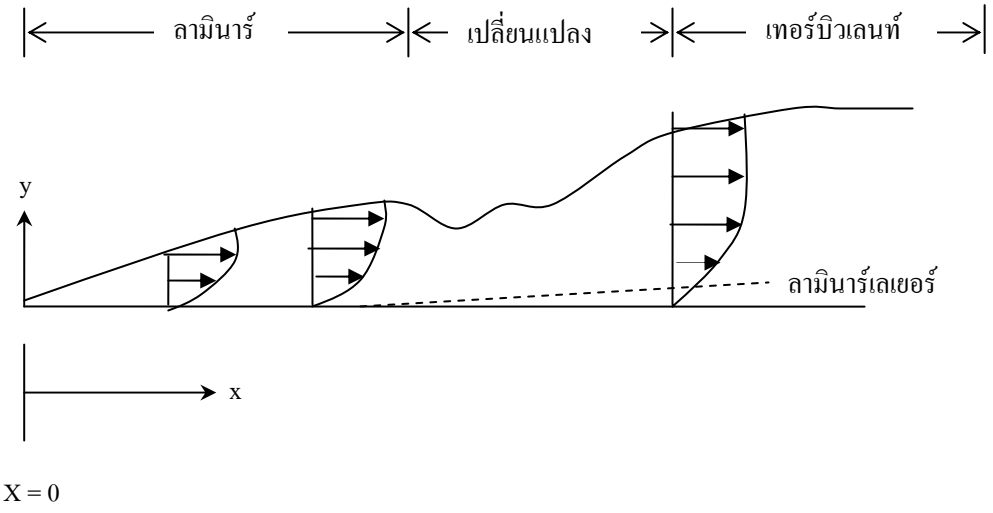
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุ ของการพาความร้อนแบบอิสระ

ความแตกต่างที่สำคัญของการพาความร้อนทั้งสองแบบ คือความเร็วของของไหลของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่วัดจากผิว เพราะว่าเมื่อของไหลห่างจากผิว ความเสียดทานลดน้อยลงอย่างรวดเร็ว แต่ของไหลตรงจุดที่ห่างจากผิวกลับมีความหนาแน่นมากขึ้น เพราะอยู่ห่างไกลจากความร้อน ดังนั้นแรงลอยตัวของของไหลในบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจากผิวมีค่าน้อยจึงทำให้ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุด เมื่อมีระยะห่างที่แน่นอนค่าหนึ่ง และความเร็วนี้จะเป็นศูนย์เมื่ออยู่ห่างจากผิวของวัตถุที่ให้ความร้อนนั้นมาก ๆ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลของการพาความร้อนทั้งสองแบบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุของการพาความร้อนต่างก็เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำทั้งคู่

จากที่ผ่านมา ค่า h_c ขึ้นกับค่าความหนาแน่น (ρ) , ความหนืด (μ) และความเร็ว (v) ของของไหล นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านความร้อน เช่น ค่าการนำความร้อน (k_f) และค่าความจุความร้อน (C_p) ของของไหล

เพื่อให้เราเข้าใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการพาความร้อนแบบบังคับ จึงควรที่จะศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับการไหลแบบบังคับ ตามรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นสภาพการไหลที่จุดต่างๆ ที่อยู่ห่างจากขอบทางด้านต้นของของไหลที่แตกต่างกันของแผ่นวัตถุ



รูปที่ 2.3 ช่วงการไหลแบบ Laminar ช่วง Transient และช่วงการไหลแบบ Turbrlent ของชั้นBoundary – Layer ของไหลบนแผ่นวัตถุ

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความเสียดทานมากทำให้ของไหลไหลช้าลง บริเวณดังกล่าวนี้เริ่มเกิดขึ้นจากขอบทางด้านต้นของของไหลบนแผ่นวัตถุ แรงจากความเสียดทานขึ้นอยู่กับค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่เกิดขึ้นในชั้นของของไหล ในของไหลที่ขนานกับแผ่นวัตถุ กรณีที่เป็น Boundary Layer ของ Laminar มีค่าเป็น

$$\tau = \mu \, (du/dy) \qquad (2.4)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน (N/m^2)

du/dy คือ ความลาดชันของความเร็ว (s^{-1})

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของไหล ($N.s/m^2$)

ชั้นของของไหลในบริเวณใกล้ผิววัตถุที่ความเร็วลดน้อยลงด้วยผลกระทบของแรงจากความเสียดทาน เรียกว่า ชั้น “Boundary Layer” และเรียกระยะห่างที่วัดจากผิววัตถุถึงชั้นของไหลที่มีความเร็วเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วของของไหลอิสระว่า ความหนาของ Boundary Layer (Boundary Layer Thickness) ส่วนชั้นที่ถัดออกไปจากชั้นของไหลดังกล่าวเรียกว่า บริเวณที่ไหลอิสระ (Potential Flow Region)

การไหลของชั้น Boundary Layer ในช่วงแรกบนแผ่นวัตถุจะเป็น Laminar และชั้น Laminar Boundary Layer จะค่อย ๆ เพิ่มความหนา จากของทางด้านต้นของที่ไหล และเมื่อถึง

ระยะที่แน่นอนค่าหนึ่ง เรียกว่า “ระยะวิกฤติ” (X_c) แรงจากความเฉื่อยก็จะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงจากความหนืดที่มาหน่วงการไหล ดังนั้นของไหลที่อยู่ถัดจากจุดวิกฤตินี้จะถูกรบกวนมากขึ้น ทำให้การไหลแบบ Laminar ได้รับการรบกวนรุนแรง การไหลจึงเปลี่ยนเป็น Turbulent

ของไหลในบริเวณที่มีการไหลแบบ Turbulent จะเคลื่อนที่ข้าม Streamlines และพาเอาความร้อนกับโมเมนตัมข้าม Streamline ไปด้วย

จากวิชากลศาสตร์ของไหลนั้นพารามิเตอร์ ที่ใช้เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงจากความเฉื่อยที่มาทำให้การไหลเปลี่ยนจาก Laminar ไปเป็น Turbulent คือ Reynolds Number มีค่าเป็น

$$Re_x = (\rho v_\alpha X) / \mu = (v_\alpha X) \qquad (2.5)$$

เมื่อ Re_x คือ Reynolds Number ตรงจุดที่อยู่ห่างจากต้นของไหลเป็นระยะทาง x

v_α คือ ความเร็วของของไหลอิสระ (m/s)

x คือ ระยะที่วัดจากขอบทางด้านต้นของของไหล (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (m/s)

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ ($N.s/m^2$)

ค่า Critical Reynolds Number $(Re_x)_c$ ตรงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลขึ้นอยู่กับความเรียบของผิววัตถุ และระดับความเป็น Turbulent มากการเปลี่ยนการไหลจะเริ่มที่ค่า $Re_x = 10^5$ แต่ถ้าหากของไหลอิสระมีความเป็น Turbulent ต่ำการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มที่ $Re_x = 2 \times 10^6$

ได้มีการกำหนดค่าของ Reynolds Number สำหรับ Boundary Layer แบบต่างๆ ในกรณีของการไหลขนานกับผนังราบไว้ดังนี้

Boundary Layer แบบ laminar $0 < Re_x < 5 \times 10^5$

Boundary Layer แบบ Transitions $5 \times 10^5 < Re_x < 3 \times 10^6$

Boundary Layer แบบ Turbulent $3 \times 10^6 < Re_x$

รูปร่างของ Profile ความเร็วใน Boundary Layer แบบ Laminar และแบบ Turbulent มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 จะพบว่า Profile ของความเร็วของ Boundary Layer แบบ Laminar มีลักษณะเกือบเป็นรูปพาราโบลา ส่วนช่วงที่มีการไหลแบบ Turbulent จะมีของไหลบาง ๆ เกิดซ้อนในบริเวณที่อยู่ใกล้กับผิววัตถุอีกชั้นหนึ่ง เรียกว่า Laminar Boundary Sublayer ชั้น Laminar Boundary

Sublayer มี Profile ของความเร็วเกือบเป็นเส้นตรงส่วนของไหลที่อยู่เหนือชั้นนี้ขึ้นไป Profile ของความเร็วเกือบจะแบนราบ

การไหลในท่อเป็นการไหลที่สำคัญมาก การไหลในท่อจะเป็น Laminar หรือ Turbulent ขึ้นกับค่า Reynolds Number

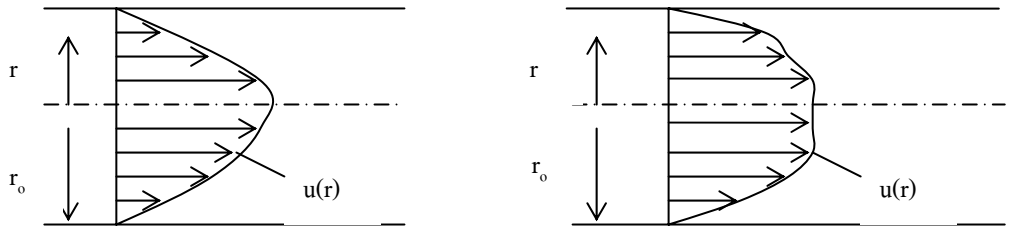
$$Re_D = (\rho v D) / \mu \qquad (2.6)$$

เมื่อ Re_D คือ Reynolds Number ที่หาจากเส้นผ่าศูนย์กลาง D ของท่อ

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (m)

กรณีการไหลในท่อจะเปลี่ยนจาก Laminar เมื่อ $Re_D = 2300$ และเมื่อ $Re_D = 6000$ แล้วการไหลจะเป็น Turbulent โดยสมบูรณ์และ $2000 < Re_D < 4000$ เป็นช่วงTransitions ปกติค่า Reynolds Number ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวท่อ และระดับความเป็น Turbulent ของของไหล



(a) (b)

รูปที่ 2.4 Profile ความเร็วของการไหลในท่อที่มีการไหลแบบ
(a) แบบ Laminar (b) แบบ Turbulent

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็น Profile ความเร็วของการไหลในท่อที่มีการไหลแบบ Laminar และ Turbulent จะเห็นได้ว่า ชั้น Boundary Layer จะเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าของท่อและค่อยๆ เพิ่มความหนาเมื่อลึกเข้าไปในท่อ ถ้าเป็นการไหลแบบ Laminar Profile ของการไหลเป็นรูปพาราโบลา แต่เมื่อเป็นการไหลแบบ Turbulent Profile จะเป็นพาราโบลายอดทู่ดังรูปที่ 2.4 (b) และจะมีความเร็วประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วกลางท่อ

เพื่อความสะดวกให้ค่า Re_D อยู่ในเทอมอัตราการไหลโดยมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Mass Velocity), G โดยที่

$$G = \rho v / A = \dot{m} / a \quad (2.7)$$

เมื่อ G คือ อัตราการไหลโดยมวลต่อพื้นที่ ($kg/m^2.s$)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

เพราะฉะนั้น

Re_D จะมีรูปเป็น

$$Re_D = (G.D) / \mu \quad (2.8)$$

กรณีไม่ใช่ท่อกลม ต้องเอาเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) มาใช้ แทนเส้นผ่านศูนย์กลาง D ของท่อ เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก D_H มีนิยามว่า

$$D_H = 4 \text{ (พื้นที่หน้าตัด / เส้นขอบเปียก)} \quad (2.9)$$

ตัวอย่างเช่น หากเป็นการไหลในพันที่รูปวงแหวนระหว่างท่อสองท่อมีแกนร่วมกันโดย D_0 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อในและ D_1 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อนอก ช่องทางที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปวงแหวนจะมี D_H เป็น

$$D_H = 4 \{[\pi (D_1^2 - D_0^2)/4] / [4\pi (D_1 + D_0)] \} = D_1 - D_0 \quad (2.10)$$

ช่องทางการไหลเป็นพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง w สูง h แล้วจะมี D_H เป็น

$$D_H = 4[(w \times h) / (2[wh / (w+h))] \quad (2.11)$$

2.1.3 หลักการถ่ายเทมวลเบื้องต้น

ในกระบวนการแปรรูปอาหาร เราจำเป็นต้องสร้างสภาวะที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีให้วัสดุอาหารผลิตสารประกอบที่เราต้องการ บ่อยครั้งที่การปรุงแต่งสารลงไปกลับไม่ได้ผลตามที่ต้องการ โดยเกิด By Product ขึ้นมาแทน โดยตัว By Product นี้อาจสร้างกลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาจึงจำเป็นต้องมีการแยกสารกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์นั้นด้วยวิธีเฉพาะ ซึ่งก็มีต้นทุนในการปฏิบัติงาน

กระบวนการถ่ายเทมวลสารจึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ความเข้าใจเรื่องกระบวนการถ่ายโอนมวลสารจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ตัวอย่างของการศึกษาการถ่ายโอนมวลสารได้แก่ การศึกษาการกระจายตัวของหยดหมึกในน้ำ ตอนแรกนั้นน้ำหมึกจะมีความเข้มข้นมาก จะเห็นว่าสีหมึกจะค่อยๆ แพร่กระจายทีละช้าๆ จนในที่สุดความเข้มข้นของน้ำหมึกเป็นศูนย์ในกรณีที่มีน้ำมากพอ

เช่นเดียวกับการศึกษาในเรื่องการถ่ายโอนความร้อน กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนก็คือความแตกต่างของอุณหภูมิ ส่วนในกระบวนการถ่ายโอนมวลสารนั้น ความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของระบบเป็นกลไกสำคัญ อันเรียกได้ว่าเป็นแรงขับเคลื่อนของกระบวนการ โดยทั่วไปการถ่ายโอนมวลสารจะเกิดจากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นต่ำกว่า

2.1.4 กระบวนการแพร่

ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลสารนั้นจะอาศัยกฎของฟิกส์ ที่กล่าวว่าอัตราการแพร่ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Mass Flux) ขององค์ประกอบหนึ่งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเข้มข้น ดังนั้นสำหรับองค์ประกอบในสภาวะคงตัว (Steady State) เมื่ออุณหภูมิคงที่และความดันคงที่ จะได้ว่า

$$M_A/A = - D \partial C_A / \partial x \qquad (2.12)$$

เมื่อ

m_A คือ อัตราการแพร่ของมวลองค์ประกอบ A (kg/hr หรือ kg/s)

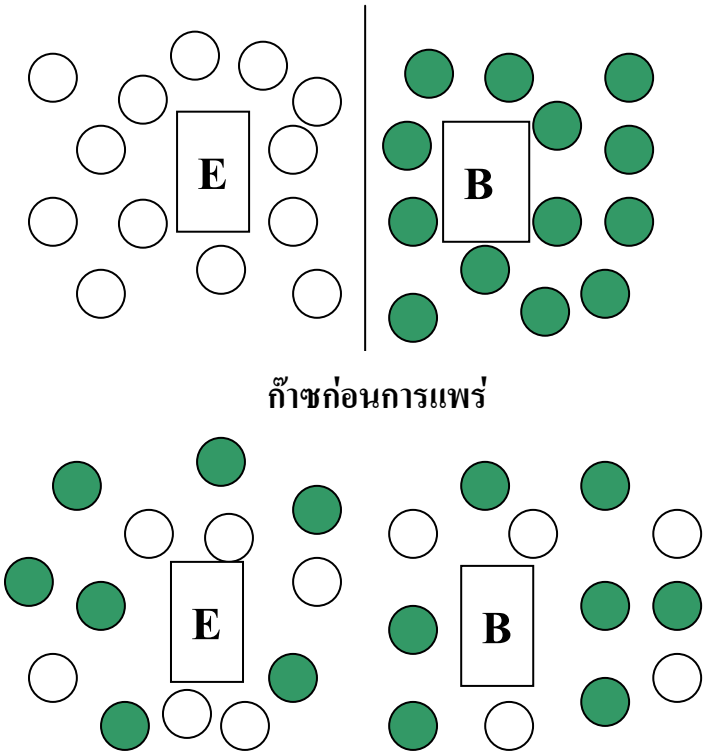
A คือ พื้นที่ (m^2)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

c_A คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ

x คือ ระยะทางระหว่างความเข้มข้น 2 จุดที่กำลังพัฒนา (m)

การแพร่ของแก๊สสองชนิดสวนทางกัน (Equimolar Counter Diffusion)

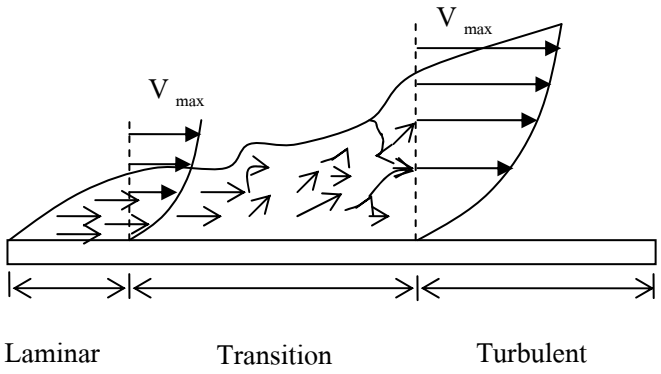


รูปที่ 2.5 การแพร่ของแก๊สสองชนิดสวนทางกัน

2.1.5 การแพร่ของแก๊สผ่านชั้นของแข็งแบบพาภายใต้สภาวะคงตัว

ในการขนถ่ายองค์ประกอบต่างๆ โดยการพาจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ของการขนถ่ายแมสฟลักซ์จะมีค่าสูงกว่าการแพร่แบบ Molecular Diffusion การแพร่ในลักษณะนี้จะปรากฏกับของเหลวและแก๊ส และไม่พบในโครงร่างของของแข็ง ความสามารถใน การแพร่ของโมเลกุลและการถ่ายเทมวลสารแบบพานี้ขึ้นกับพารามิเตอร์หลายตัวของของเหลวและแก๊ส

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารแบบพาสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Dimensional Analysis คล้าย ๆ กับการหาค่า h ของการถ่ายโอนความร้อนแบบพา ซึ่งมีพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่สำคัญหลายตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนมวลสาร



รูปที่ 2.6 ลักษณะของการบาวดารีเลเยอร์ที่เกิดบนแผ่นเรียบ

จากการถ่ายโอนมวลสาร และการแพร่ของโมเลกุลอันเกิดภายใต้สภาวะบังคับ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากองค์ประกอบ A ไปยัง B (D_{AB}), ความเร็วของไหล (v), ความหนาแน่นของมวล (r), ความหนืดของมวล (m), เส้นผ่านศูนย์กลางที่ของไหลไหลผ่าน (d_c), และค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของการพา (k_m) ส่วนการแพร่โดยธรรมชาตินั้นจะมีตัวแปรอื่นๆ เพิ่มเติม ประกอบด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) และผลต่างของความหนาแน่นเชิงมวล (Δr) โดยทำการจัดกลุ่มของตัวแปรต่างๆ ในรูปเลขไร้หน่วยได้

2.2 รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาที่มีอยู่ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่าง การทำความเย็น การแช่แข็ง และการเก็บรักษาของเนื้อและผลิตภัณฑ์จากเนื้อ [Tocci, 1900] ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเนื้อก้อนกลมและแฮมเบอร์เกอร์สามารถหาได้จากการทดลองในแบบที่ใช้แช่แข็งในการวัดจะวัดที่ความแตกต่างของความเร็วลมและทิศทางการไหลของอากาศในแต่ละกรณีของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยเหตุนี้จึงได้นำเอาค่ามาแสดงความสัมพันธ์ในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งการถ่ายเทมวลจากกรณีก่อนหน้านี้จะหาจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้

หลักการในการคำนวณ

การนำความร้อนของแฮมเบอร์เกอร์จะมีทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมีแต่สำหรับเนื้อจะมีแต่ในแนวรัศมีเท่านั้น ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$\rho_m C_{pm} \partial T/\partial t = k_m[(\partial^2 T/\partial x^2) + (\partial T/r\partial r) + (\partial^2 T/\partial r^2)]$ ⟶ สำหรับแฮมเบอร์เกอร์

เงื่อนไขขอบเขตของ แฮมเบอร์เกอร์

$k_m \partial T/\partial r = h_c(T_a - T_c)$ ⟶ สำหรับพื้นที่รอบ ๆ ด้านข้าง

$k_m \partial T/\partial x = h_{pj}(T_a - T_j)$ ⟶ สำหรับผิวหน้าทั้งสองด้าน

$\partial T/\partial r_r \big|_{r=0} = 0$ ⟶ สำหรับจุดศูนย์กลาง

$h/K = c_p (Sc/Pr)^a$ โดยสมการนี้ใช้หลักการของ Pham and Willis และค่า a มีค่าเท่ากับ 2/3 ซึ่งใช้หลักการของ Kukupa (1965) และค่า k_a, ρ_a, μ_a, C_{pa} and D_a ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$k_a = \frac{2.646 \times 10^{-3} T_a^{1.5}}{T_a + 245.4 \times 10^{(-12/Ta)}} \quad (2.13)$$

$$\rho_a = \frac{349.43}{T_a} \quad (2.14)$$

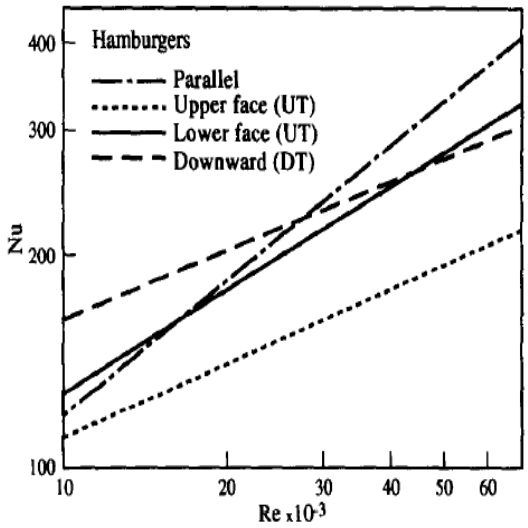
$$D_a = 1.4047 \times 10^{-9} T_a^{1.75} \quad (2.15)$$

$$\mu_a = \frac{1.458 \times 10^{-6} T_a^{1.5}}{T_a + 110.4} \quad (2.16)$$

$$C_{pa} = \left(1025.75 + 0.07724 T_a + 1.488 \times 10^{-5} T_a^2 - \frac{5.7135 \times 10^6}{T_a^2} \right) \quad (2.17)$$

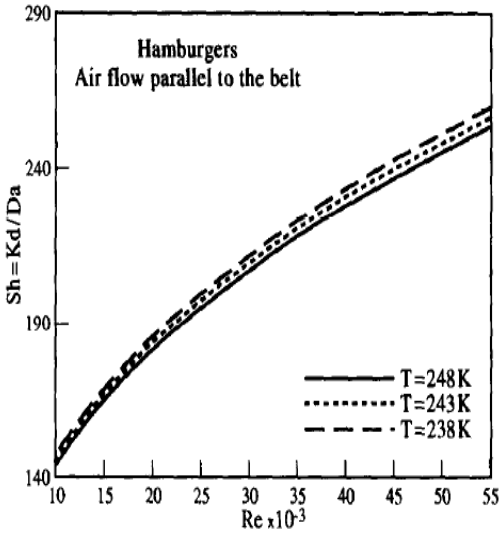
โดยสมการข้างต้นนี้จะใช้หลักการทฤษฎีของ Perry and Chilton (1973), Weast (1975), and Bolz and Tuve (1980)

ผลที่ได้จากการทดลองของแฮมเบอร์เกอร์

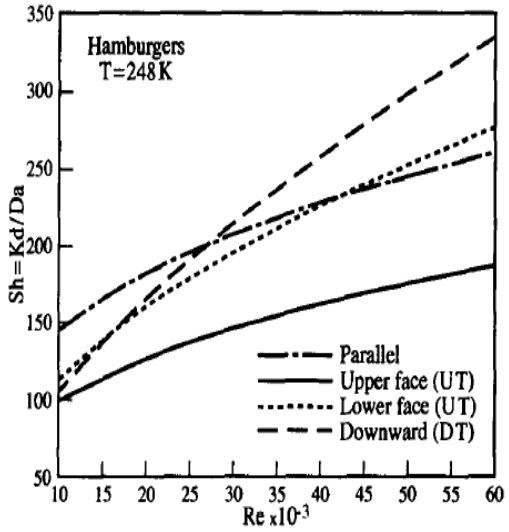


รูปที่ 2.7 Regression curves of Nu vs Re for hamburger in belt freezers for different types of air flow , at T_a = 248 K

กรณีที่เป็นตามแนวแกนและการไหลของอากาศเป็นแบบ Downward จะได้ว่าค่า h ที่ได้จะมีค่าเท่ากันทั้งสองด้านของผิวหน้าแต่ไม่เป็นเช่นนี้ทั้งหมด เพราะเนื่องจากยังมีกรณีที่เป็นแบบ Upward Flow ในแฮมเบอร์เกอร์หน้าผิวสัมผัสซึ่งติดกับ Belt จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ประมาณ 40 – 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าพื้นผิวหน้าด้านอื่น ๆ



รูปที่ 2.8 Predicted variation of Sh vs Re Hamburgers at different air temperatures and for air flow parallel to the belt



รูปที่ 2.12 Predicted variation of Sh vs Re hamburger at T_a = 248 K and for different types of air flow

เห็นได้ชัดว่าในทุกกรณีเมื่อเราเพิ่มความเร็วลมจะทำให้ h และ K เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นความจริงและอัตราการถ่ายเทมวลในระยะเวลาการแช่เย็นก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเป็นการแช่เย็นในระยะเวลาสั้น ค่าทั้งสองจะสมดุลกันบางส่วน ด้วยเหตุนี้ความเร็วลมจึงมีผลต่อการสูญเสียของมวล

ซึ่งจากงานวิจัยของ Tocci นี้ เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับโครงงานการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ด้วยเหตุนี้จึงนำเอาทฤษฎีและการออกแบบการทดลองมาใช้วิเคราะห์ในการทดลอง เนื่องจากการทดลองมีความคล้ายคลึงกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของเนื้อวัว ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลว่าเป็นไปในทิศทางใด ซึ่งจะนำไปสู่ในการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้ทั้งหมดจากการทดลอง