บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบใหญ่ๆ คือ ทฤษฎีการนำความร้อน (Heat Conduction) ทฤษฎีการพาความร้อน (Heat Convection) และทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

2.1 การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อันเนื่องมาจากการชนกันของโมเลกุล ในกรณีของของไหลหยุดนิ่ง และเนื่องจากกระแสของอิเล็กตรอนในกรณีของโลหะ ดังนั้นโลหะที่นำความร้อนได้ดี จึงมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีด้วย

ทฤษฎีการนำความร้อนเบื้องต้นกล่าวไว้ว่า "อัตราการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดให้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการนำและความลาดของอุณหภูมิในทิศทางนั้น" ดังนั้นจึงได้ว่า

$$Q_X \ \alpha \ \text{A}$$

$$\alpha \ \frac{-\partial T}{\partial X}$$

$$Q_X = \frac{-KA\partial T}{\partial X}$$

$$q_X = \frac{Q_X}{A} = \frac{-K\partial T}{\partial X}$$

โดยที่

Q_X = อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน X ซึ่งมีค่าเป็นบวกหน่วยเป็น Btu/hr

q_X = อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตามแนวแกน X ซึ่งมีค่าเป็นบวก หน่วยเป็น $Btu / hr - ft^2$

k =ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) , $Btu / hr - ft$ - F หรือ w/m- c

$\frac{\partial T}{\partial X}$ =ค่าความลาดของอุณหภูมิ

จากการนำความร้อนเบื้องต้น เราสามารถประยุกต์ใช้เพื่อพิสูจน์หาสมการการนำความร้อนใน 3 มิติ โดยมีเงื่อนไขขอบเขต ต่างๆกันได้ สมการดังนี้

$$V^2T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial T}$$

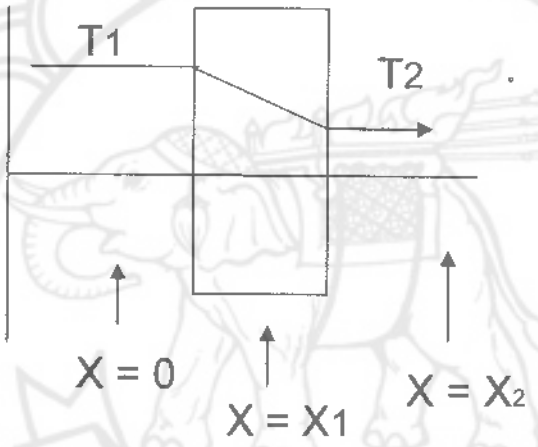
เมื่อ V^2T = The Laplacian operator

g = แหล่งพลังงานที่สร้างขึ้นโดยตัวกลาง = θ

$\frac{\partial T}{\partial t} = \theta$ เพราะฉะนั้น $\frac{d^2T}{dx^2} = \theta$

จะได้ , T = Bx + c

ผ่านผนังที่สภาวะสม่ำสมอและไม่มีแหล่งพลังงานภายในผนัง มีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้



<u>รูปแสดงเงื่อนไขการนำความร้อนผ่านผนัง</u>

$X = X_1, X_2$, $T = T_1, T_2$

จะได้

$$Q(x) = \frac{-k(T_1 - T_2)}{X_1 - X_2}$$

เมื่อ T_1 = อุณหภูมิผิวขอบเขตที่ $x = x_1$ c

T_2 = อุณหภูมิผิวขอบเขตที่ $x = x_2$ c

2.2 การพาความร้อน (Heat Convection)

การพาความร้อนเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านพื้นที่ของวัตถุแข็ง หรือไหลในท่อโดยขณะนั้น อุณหภูมิของของไหล และพื้นผิวดังกล่าวแตกต่างกัน จะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นระหว่างของไหลกับผิวของวัตถุแข็งอันเนื่องมาจาก การเคลื่อนที่ของของไหล สัมพันธ์กับพื้นที่ผิว ถ้าการเคลื่อนที่ของของเหลว เกิดจากแรงภายนอก มากระทำเช่นมีปั๊มหรือพัดลมมาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ จะเรียกการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวว่า "การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)" แต่การเคลื่อนที่ของของไหล เกิดจากแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่าง ของความหนาแน่น ซึ่งมีผลมาจากการที่ อุณหภูมิภายในของไหล แตกต่างกันลักษณะการถ่ายเทความร้อน ดังกล่าวเรียกว่า "การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or natural convection)"

สำหรับการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างพื้นผิวที่มีอุณหภูมิ T_w กับของไหลที่ผ่านพื้นที่ผิวดังกล่าวซึ่งมีอุณหภูมิ T_f และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h สามารถคำนวณได้จากสมการ

$g = h(T_f \sim T_w)$

g = อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ $Btu / hr - ft^2$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $Btu / hr - ft^2 F$

$\sim$ = ค่าแตกต่างระหว่างสองจำนวน ทั้ง T_f และ T_w ไม่ว่าตัวใดตัวหนึ่งมีค่ามากกว่าตัวนั้นเป็นตัวตั้งลบตัวที่น้อยกว่า

สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาข้างต้น บางครั้งเรียกว่า "Newton law of cooling" การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การพาความร้อนตามธรรมชาติ และการพาความร้อนโดยบังคับ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ แบบการไหล(พิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลดส์, (Re)การพัฒนาของชั้นขอบผิวความเร็ว (Velocity boundary layer) และชั้นขอบผิวความร้อน (พิจารณาจากตัวเลขพรันด์เทิล, Pr) รวมถึงลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวของแข็ง การวิเคราะห์เชิงมิติกับผลการทดลองมีความจำเป็นต่อการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยเช่นกัน สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็คือสมบัติของของไหลและลักษณะเฉพาะของการไหล สมบัติของของไหล ได้แก่ สภาพนำความร้อน (k, W/m.K) ความหนาแน่น (ρ,kg/m^3) ความหนืดสมบูรณ์ (μ,Pa.s) ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p, J/kg.K) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร(β, K^{-1})

ตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number) เป็นสมบัติการไหล เป็นอัตราส่วนระหว่างสภาพแพร่ทางโมเมนต์ตัมต่อสภาพแพร่ทางความร้อน

$$\Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu / \rho}{k / \rho C_p} = \frac{\mu C_p}{k}$$

ลักษณะเฉพาะของการไหลพิจารณาจาก

1.แบบของการพาความร้อน ได้แก่ การพาความร้อนตามธรรมชาติ และการพาความร้อนโดยบังคับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยบังคับมีค่ามากกว่า

2. ลักษณะการไหลผ่านผิวของแข็ง ซึ่งยังแบ่งย่อยเป็นหลายประเภท อาทิ การไหลทิศเดียวกัน (Parallel flow) การไหลสวนทาง (Counter flow) การไหลขวางตั้งฉาก (Cross flow) การไหลท่วมแผ่นราบหรือแผ่นโค้ง

3. แบบการไหล แบบการไหลจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงกว่า

แบบของการไหลพิจารณาจากค่าของตัวเลขเรย์โนลดส์(Reynolds Number) ตามสมการ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u l_c}{\mu} = \frac{u l_c}{v}$$

u คือความเร็วของของไหล (m/s)

l_c คือความยาว(m)

ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

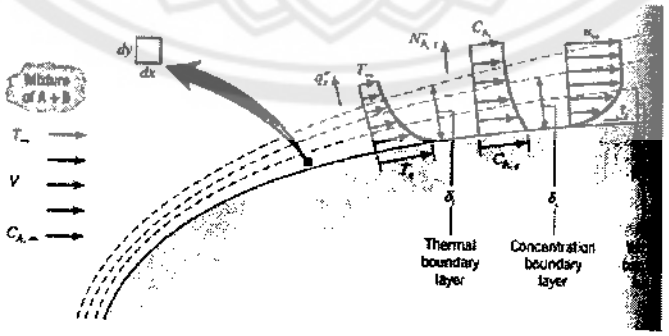
μ คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล(Pa.s)

v คือความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

แบบของการไหลแบ่งออกเป็นการไหลแบบราบเรียบ(Laminar flow) การไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent) และการไหลแบบแทรนซิชัน(transition flow) นอกจากพารามิเตอร์ไร้มิติ Pr และ Re ที่ได้กล่าวมาแล้วพารามิเตอร์อื่นๆที่มีความสำคัญต่อกรพาความร้อน คือ ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) มีสมการดังนี้

$$Nu = \frac{h l_c}{k}$$

ชั้นขอบผิวความเร็ว ขณะของไหลไหลบนแผ่นราบ ของไหลในบริเวณใกล้ๆกับผิวแผ่นราบจะมีความเร็วเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ เป็นผลมาจากความหนืดของของไหลเอง จากรูปได้ว่า



รูปที่ 2.1 ชั้นขอบผิวความเร็วบนพื้นผิวโค้ง

1.ที่ขอบนำของแผ่นราบพบว่า u = 0 ที่ x = 0, y = 0 จากนั้นชั้นชิดผิวความเร็วจึงเริ่มพัฒนาไปตามความยาวของแผ่นราบและมีความหนาของชั้นชิดผิวความเร็ว $\delta=\delta(x)$ ที่ระยะ x ใดๆ ความเร็วของของไหลที่ความหนาของชั้นชิดผิวความเร็วนี้กำหนดเป็น $u = 0.99u_\infty$ โดยที่ u_∞ คือ ความเร็วของกระแสการไหลอิสระ(free steam)

2. ภายในชั้นชิดผิวความเร็ว ความเร็วย่อยแนวแกน u(x,y) เปลี่ยนแปลงกับระยะวัดตั้งฉากกับแผ่นราบ(ระยะ y) ที่ระยะ x ใดๆ จากขอบนำ จึงทำให้เกิดพจน์ $\partial u / \partial y$ ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเค้นเฉือนระหว่างชั้นของไหลที่อยู่ใกล้ๆกัน และระหว่างของไหลกับผิวแผ่นราบ ตามสมการ

$$\tau_x = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \qquad \text{ที่ y = y}$$

ที่ผิวแผ่นราบ

$$\tau_w = \mu \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{y=0}$$

สัมประสิทธิ์การแกเฉพาะที่(C_x)พิจารณาในช่วงความยาว x = 0 ถึง x = L

$$C_m = \frac{1}{L}\int_0^L C_x dx$$

แรงฉุดกระทำต่อแผ่นราบขณะของไหลไหลผ่านแผ่นราบยาว L กว้าง w

$$F_{drag} = \tau_m A = C_m w L \frac{\rho u_\infty^2}{2} \qquad \text{หน่วยเป็น N}$$

โดย

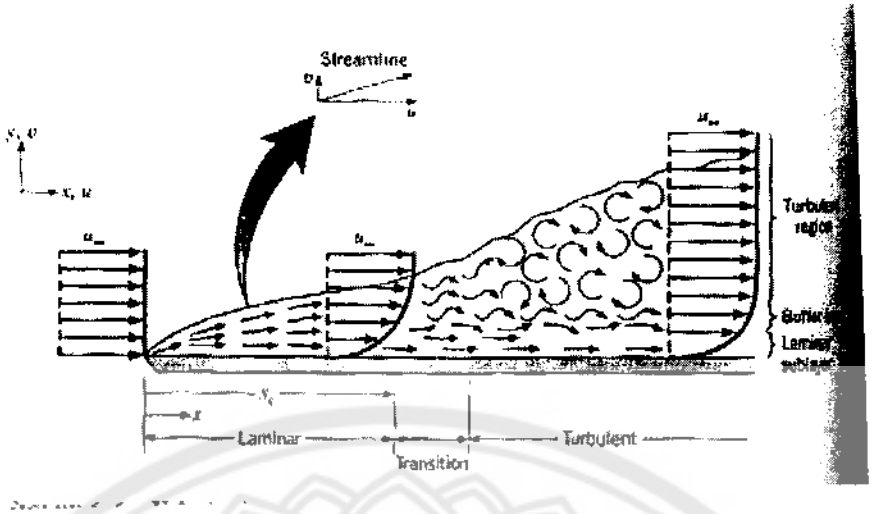
$$\tau_m = C_m \frac{\rho u_\infty^2}{2} \qquad (\tau_m \text{ คือความเค้นเฉือนที่ผิวแผ่นราบ, N/m}^2)$$

ส่วนการไหลภายนอกชั้นชิดผิวความเร็วซึ่งเรียกว่า บริเวณการไหลแบบโพเทนเชียล (Potential flow region) บริเวณนี้จะไม่คำนึงถึงผลของ $\partial u / \partial y$ และไม่เกิดความเคนเฉือนในของไหล

3. การไหลเริ่มเปลี่ยนจากบริเวณของการไหลแบบราบเรียบเป็นบริเวณองการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อของไหลเคลื่อนที่ไปในระยะความยาวกฤตบนแผ่นราบ(x_{cr}) ถูกกำหนดด้วยตัวเลขเรย์โนลดส์วิกฤต(Re_{cr})

$$\mathrm{Re}_{cr} = \frac{u_\infty x_{cr}}{\nu} = 5\times10^5$$

จากสมการนี้จะให้ Re_{cr} ในกรณีของสภาพการไหลที่คำนึงถึงผลของสภาพความขรุขระของผิวแผ่น ราบและมีระดับความปั่นป่วนของกระแสการไหลอิสระ



รูปที่ 2.2 ชั้นชิดผิวความเร็วสำหรับการไหลบนแผ่นราบ

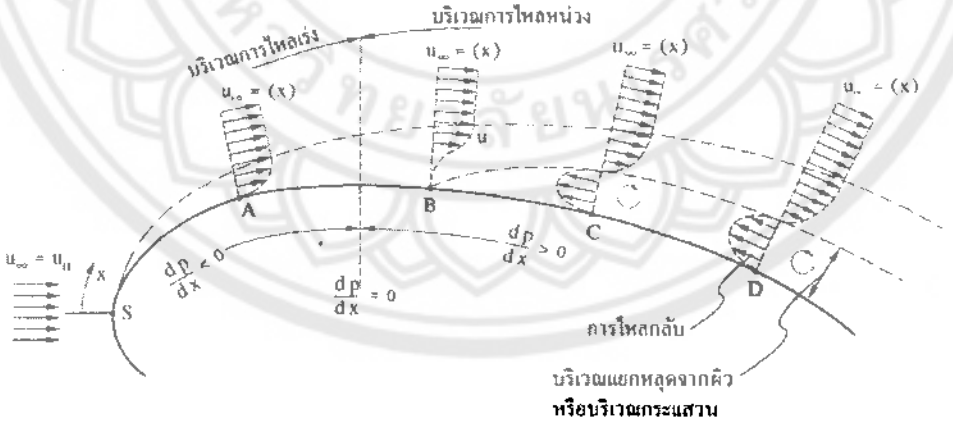
ชั้นชิดผิวความเร็วในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยชั้นการไหล 3 ส่วนได้แก่

1. ชั้นความหนืด เป็นชั้นชิดผิวด้านล่างสุดอยู่ชิดผิวแผ่นราบ มีความหนาน้อยมากบางทีเรียกว่า ชั้น ความหนาแบบราบเรียบ (Laminar sublayer)

2. ชั้นบัฟเฟอร์ เป็นชั้นท่าอยู่ถัดจากชั้นความหนืดขึ้นไป มีความปั่นป่วนขนาดเบาบาง ความเร็วของของ ไหลเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับระยะ y

3. ชั้นปั่นป่วน ในชั้นนี้จะมีความปั่นป่วนขนาดรุนแรง ความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไม่มากกับ ระยะ y

สำหรับการไหลบนวัตถุโค้ง ความเร็วของกระแสการไหลอิสระจะเป็นฟังก์ชันกับระยะเคลื่อนที่ (x)



รูปที่2.3 ชั้นชิดผิวความเร็วในบริเวณที่เกิดจุดสแตกเนชัน

$u_\infty = u_\infty(x)$ เริ่มวัดระยะ x ที่จุดสแตกเนชัน (Stagnation point) ผลของความโค้งของพื้นผิวทำให้ได้ชั้นชิดผิวความเร็วที่ $\delta=\delta(x)$ ดังรูป ที่ระยะ x หนึ่ง ความเร็วของไหลที่ผิววัตถุมีความชัน $\partial u / \partial y|_{y=0}$

ซึ่งเรียกว่า จุดเปลี่ยนความโค้ง (Point of inflection) หลังจากของไหลไหลพ้นจุดนี้ไปแล้ว ชั้นขอบผิวความเร็วจะเริ่มแยกหายไปจากพื้นผิวและเกิดการไหลย้อนกลับทาง

2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

เมื่อวัตถุสองวัตถุมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ถูกแยกออกจากกันโดยสุญญากาศ การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุทั้งสองไม่สามารถเกิดขึ้น โดยการนำและการพาความร้อนได้ กรณีดังกล่าววัตถุจะถ่ายเทความร้อน ได้โดยการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยพลังงานที่ให้ออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ของวัตถุนั้นๆ เช่น ถ้าวัตถุดำ (black body) ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ A และมีอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็น T_1 ถูกล้อมรอบด้วยวัตถุอีกวัตถุหนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิ T_2 และเป็น black body เช่นกัน พลังงานที่วัตถุอันแรกให้ออกมาโดยการแผ่รังสี จะเท่ากับ $A\sigma T_1^4$ Btu/h หรือ ในขณะเดียวกันจะรับพลังงานจากวัตถุที่ล้อมรอบเท่ากับ $A\sigma T_2^4$ ดังนั้นปริมาณพลังงานสุทธิที่ออกจากวัตถุอันแรกโดยการแผ่รังสีคือ

$$Q = A\sigma T_1^4 \ (A\sigma T_2^4) \ \text{Btu/h}$$

โดย

Q = ปริมาณพลังงานสุทธิที่ออกจากวัตถุอันแรกโดยการแผ่รังสี

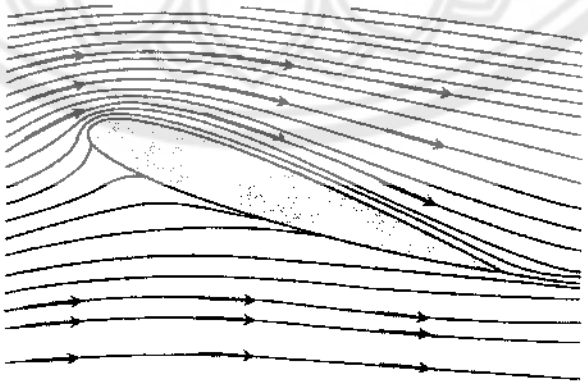
σ = Stefan-Boatman constant

$= 0.1714 \times 10^{-8}$ Btu/h-ft^2-R^4

$= 5.6697 \times 10^{-8}$ w/M^2-K^4

2.4 สนามเวคเตอร์

หมายถึงที่ที่ทุกๆจุดใน Space มี vector กำกับไว้เสมอ ในธรรมชาติมีตัวอย่างของสนามเวคเตอร์ เช่นสนามความเร็ว (Velocity Field) ของกระแสลมที่ไหลผ่านปีกเครื่องบิน ในรูป หรือสนามแรงโน้มถ่วงก็จัดว่าเป็นสนามเวคเตอร์ในรูป vector แต่ละตัวแทน ความเร็วของลม ณ จุดนั้นๆจะเห็นว่าทุกๆจุดจะมีเวคเตอร์ความเร็วของลมกำกับอยู่



รูปที่ 2.4 สนามเวคเตอร์ความเร็วของการไหล

2.5 ผลกระทบเกรเดียนต์ความดันต่อการไหล

จากการวิเคราะห์แรงฉุดเนื่องจากความเสียดทานสำหรับการไหลบนแผ่นระนาบที่ผ่านมาเป็นผลมาจากการเกิดความเค้นเฉือนในของไหลที่มีความหนืด โดยไม่คิดผลของแรงอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันหรือเกรเดียนต์ความดันเป็นศูนย์ ($dp/dx = 0$) ขนาดของเกรเดียนต์ความดันนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุที่จมในของไหลนั้น การไหลที่มีเกรเดียนต์ความดันบนวัตถุผิวโค้งส่งผลทำให้เกิดการไหลเร่ง ($dp/dx < 0$) และการไหลหน่วง ($dp/dx > 0$) รวมถึงการเกิดปรากฏการณ์ของการแยกหลุดจากผิว (separation) ในขณะไหล

ในรูปที่ 2.3 พิจารณาการไหลของกระแสอิสระซึ่งไหลด้วยความเร็ว $u_{\infty} = u_0$ (คงตัว) เข้าชนกับส่วนโค้งด้านหน้าของวัตถุที่จุดแสตกเนชั่น (ที่จุด S ของไหลมีความเร็วกระแสอิสระเป็นศูนย์($u_{\infty} = 0$) ทำให้ของไหลมีความดันสูงสุดที่จุดนี้ ของไหลแบบชั้นชิดผิวไปตามผิวโค้งตามพิกัด X จากนั้นของไหลจะไหลไปด้วยความเร่งอันเป็นผลมาจากแรงเนื่องจากความดันสุทธิกระทำต่อของไหลในทิศเดียวกับการไหล บริเวณนี้พบว่าความดันของของไหลลดลงในทิศทางการไหลของกระแสอิสระ (หรือเกรเดียนต์ความดันมีเครื่องหมายเป็นลบ $dp/dx < 0$ หรือ $du_{\infty}/dx > 0$) เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณการไหลเร่ง ของไหลจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดค่าหนึ่ง และที่จุดนี้จะพบว่า $dp/dx = 0$ จากนั้นของไหลจะไหลเข้าสู่ บริเวณการไหลหน่วง สำหรับในบริเวรนี้ความดันของของไหลจะเพิ่มขึ้นในทิศทางการไหลของกระแสอิสระ (หรือเกรเดียนต์ความดันมีเครื่องหมายเป็นบวก $dp/dx > 0$ หรือ $du_{\infty}/dx < 0$) ในบริเวณนี้พบว่าแรงเนื่องจากความดันสุทธิกระทำต่อของไหลในทิศตรงข้ามกับทิศการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งของไหลบริเวณชั้นชิดผิวโค้งของวัตถุนั้นมีโมเมนตัมไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเนื่องจากความดันสุทธิในทิศตรงข้ามการไหลได้ ทำให้โมเมนตัมของของไหลลดลงจนกระทั่งความเร็วของของไหลนั้นเป็นศูนย์ และจะไหลไปตามทิศของแรงเนื่องจากความดันสุทธิ (ในทิศตรงข้ามกับการไหลของกระแสอิสระ) จุด B เป็นจุดแยกหลุดจากผิวและจุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของบริเวณแยกหลุดจากผิว ซึ่งพบว่าที่ผิวนั้น $du/dy = 0$ ถ้าเลยพ้นจุดนี้ไปแล้วของไหลจะมีการไหลกลับทิศทางและทำให้โพรไฟล์ความเร็ววกกลับที่จุด C และ D ดังรูป และจะเกิดการไหลวนด้ายท้ายบริเวณแยกหลุดจากผิว บริเวณส่วนท้ายนี้เรียกว่า บริเวณกระแสวน (wake region)