

## บทที่ 11

## การไหลบนพื้นผิวเรียบและบนวัตถุรูปทรงต่าง ๆ

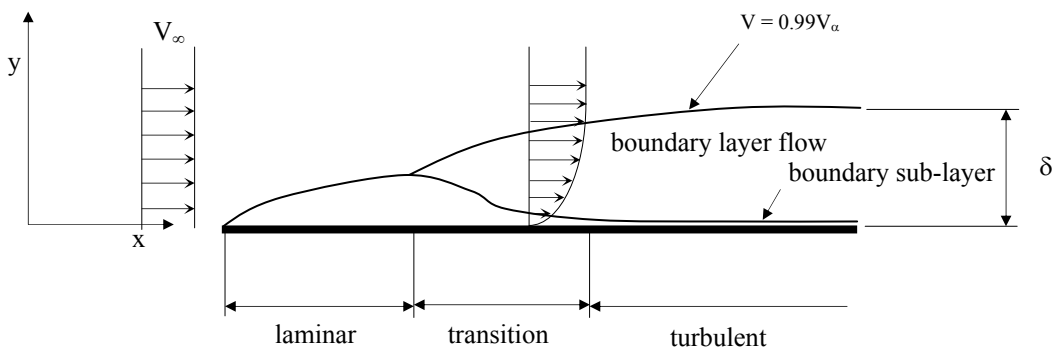
## FLOW OVER A FLAT SURFACE AND OTHER OBJECTS

จากประสบการณ์เราพบว่า ค่าคุณสมบัติของของไหล เช่น ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าความเร็วในการไหล ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อชนิดของการไหลบนพื้นผิวเรียบว่าจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ดังนั้นก่อนอื่นจึงต้องเข้าใจลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวนั้นๆ เสียก่อน เมื่อมีการไหลบนพื้นผิว การกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้พื้นผิว ส่งผลต่อการกระจายความเร็วในชั้นของของไหลชั้นอื่นๆ จึงมีการนำเอาแนวความคิดเกี่ยวกับชั้นขอบเขต (Boundary Layer) มาจำลองสนามความเร็วที่อยู่ใกล้กับพื้นผิว

## 11.1 ชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary layer)

พิจารณาการไหลของของไหลที่ไหลขนานบนพื้นผิวเรียบที่อยู่หนึ่ง ดังรูปที่ 11.1 ในกระแสการไหลอิสระ (free stream) หรือ พื้นที่ส่วนก่อนถึงขอบทางเข้าของการไหล (downstream) บนพื้นผิวเรียบ ความเร็วในการไหลมีค่า  $V_\infty$  ในชั้นของการไหลที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวเรียบ ความเร็วในการไหลจะมีค่าไม่คงที่ แต่จะมีค่าเพิ่มจากศูนย์ (ที่พื้นผิวเรียบ  $y=0$ ) จนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับ  $V_\infty$  โดยที่ความเร็วในการไหลของของไหลในชั้นที่สัมผัสกับวัตถุซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ จะหน่วงให้ของไหลในชั้น

ติดกันด้านบนให้มีความเร็วลดลงจากความเร็วในตอนไหลเข้า การหน่วงการไหลดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับชั้นของของไหลที่อยู่ติดกันด้านบนขึ้นไปเรื่อยๆ แต่อิทธิพลการหน่วงดังกล่าวจะลดลงเมื่อระยะห่างในแนวตั้งจากพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเพิ่มขึ้นถึงค่า  $y=\delta$  หลังจากระยะนี้แล้ว ความเร็วของของไหลจะมีค่าเท่ากับความเร็วของกระแสอิสระ  $V = V_\infty$



รูปที่ 11.1 ชั้นขอบเขตความเร็ว

อนึ่งการหน่วงการไหลที่เกิดขึ้นเป็นอิทธิพลจากความเค้นเฉือน (Shear stress,  $\tau$ ) อันเป็นผลจากความหนืดของของไหล ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของไหล และกระทำในระนาบที่ขนานกับการไหล ระยะความหนาที่ของไหลถูกอิทธิพลของความเค้นเฉือนกระทำ ก็คือชั้นของของไหลที่อยู่ภายใต้ความหนา  $y=\delta$  โดยชั้นความหนาดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ความหนาชั้นขอบเขตของความเร็ว (velocity boundary layer thickness) โดยที่ระยะ  $y=\delta$  นี้ถูกกำหนดจากระยะห่างจากพื้นผิวเรียบในแนวตั้งที่ทำให้  $V=0.99V_\infty$  จากรูปที่ 11.1 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาชั้นขอบเขตของความเร็ว ( $\delta$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นในแนวการไหลหรือ ในแนวแกน  $x$

รูปร่างความเร็วของชั้นขอบเขตความเร็ว (boundary layer velocity profile) หมายถึงฟังก์ชันของความเร็วของของไหลที่ขึ้นอยู่กับมิติ  $x$  และ  $y$  หรือ  $V=V(x, y)$

ในรูปที่ 11.1 ยังแสดงให้เห็นว่าภายใต้ชั้นขอบเขตความเร็วของ การไหลบนพื้นผิวเรียบนั้นมีการแบ่งรูปแบบการไหลออกได้ 3 รูปแบบด้วยกันคือ การไหลราบเรียบ (laminar), การไหลทรานซิชัน (transition), และ การไหลปั่นป่วน (turbulent) เมื่อพิจารณาลำดับของการพัฒนาของชั้นขอบเขตความเร็ว จะพบว่าเมื่อเริ่มมีการไหลจากขอบทางเข้าไปจนถึงระยะหนึ่งบนพื้นผิวเรียบ รูปแบบการไหลภายใต้ชั้นขอบเขตความเร็วในช่วงเริ่มต้นนี้จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ การเคลื่อนที่ของของไหลจะมีความราบเรียบ หลังจากระยะนี้ไปแล้วของไหลจะเริ่มมีการแกว่งตัวของอนุภาคของไหล โดยเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้น การแกว่งตัวก็จะมากขึ้นตามลำดับ การไหลในช่วงนี้เรียกว่า การไหลทรานซิชัน (transition) หลังจากนั้นการแกว่งตัวของอนุภาคจะมีความรุนแรงมากทำให้เกิด การไหลปั่นป่วน (turbulent) ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนนี้เองที่ของไหลจะมีความหนาของชั้นขอบเขตความเร็วที่มีค่าสูง หากพิจารณาในชั้นขอบเขตความเร็วที่ช่วงการไหลปั่นป่วนจะพบว่า ภายใต้ชั้นขอบเขตความเร็ว นั้น จะมีชั้นขอบเขตความเร็วย่อยแบบราบเรียบ (laminar boundary sub layer) รวมอยู่ด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะความเร็วของของไหลที่อยู่ติดกับผนังของพื้นผิวเรียบจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ

ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง แรงเฉื่อย (ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับกับค่า ความหนาแน่นและความเร็วของของไหล) จะมีค่าสูง เมื่อเทียบกับค่าของแรงหนืด ทำให้แรงหนืดไม่สามารถต้านทาน การแกว่งตัวของของไหลได้ ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น ส่วนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ค่าของแรงหนืดจะมีค่าสูงพอที่จะเอาชนะค่าแรงเฉื่อยทำให้ การแกว่งตัวของอนุภาคของไหลต่ำ ของไหลสามารถไหลได้แบบราบเรียบ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ที่การไหลมีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า ค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต critical Reynolds number

โดยปกติช่วงการไหลทรานซิชัน (transition) มักจะเกิดขึ้นในช่วงที่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number,  $Re$ ) ของการไหล อยู่ในช่วง  $2 \times 10^5 < Re_{crit} < 3 \times 10^6$ , เมื่อ  $Re_{crit}$  คือค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต อย่างไรก็ตามมักจะใช้ค่าที่  $5 \times 10^5 < Re_{crit}$  เป็นค่ามาตรฐานในการคำนวณ โดยที่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number,  $Re$ ) ได้มาจากสมการที่ 11.1 และ 11.2:

$$Re_x = \frac{\text{inertia force}}{\text{viscous force}} = \frac{\text{mass} \times \text{acceleration}}{\text{shear stress} \times \text{area}} \quad (11.1)$$

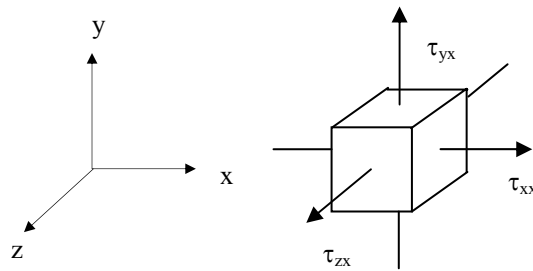
$$= \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x}{\mu} = \frac{V_\infty \cdot x}{\nu} \quad (11.2)$$

เมื่อ “x” คือระยะทางในแนวการไหลที่วัดจากขอบทางเข้า ดังนั้นสำหรับ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต  $Re_{crit}$  คำนวณได้จาก

$$Re_{crit} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x_c}{\mu} = \frac{V_\infty \cdot x_c}{\nu} = 5 \times 10^5 \quad (11.3)$$

เมื่อ “ $x_c$ ” คือระยะทางวิกฤตในแนวการไหลที่วัดจากขอบทางเข้าถึงจุดที่การไหลเริ่มอยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วน

หากพิจารณาปริมาตรเล็กๆก่อนหนึ่ง ของการไหลภายใต้ชั้นขอบเขตความเร็ว ในรูปที่ 11.2 สมการโมเมนตัมในระบบพิกัดแกน x-y-z ของปริมาตรดังกล่าว เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของสมการ Navier-Stokes equations มีรูปแบบของสมการดังแสดงในสมการที่ 11.5



รูปที่ 11.2 ปริมาตรควบคุมของการไหล

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) + \rho \cdot g_x \quad (11.5)$$

↑ accretion force
↑ pressure force
↑ shear force
↑ gravity force

กรณีการไหลของของไหลบนพื้นผิวเรียบ ที่พิจารณาการไหลใน 2 มิติ (x-y) สมการ Navier-Stokes equation ในแนวแกน x คือ:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \quad (11.6)$$

ในแนวแกน y คือ:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (11.7)$$

สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) ของปริมาตรควบคุมดังกล่าวคือ:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (11.8)$$

เงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุมดังกล่าวคือ:

$$y = 0, V_x = 0$$

$$y = 0, V_y = 0$$

$$y = \infty, V_x = V_\infty$$

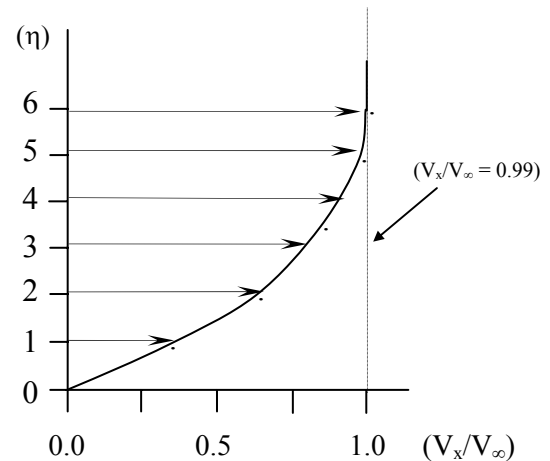
กำหนดให้

$$\eta = \sqrt{\frac{y^2 \cdot V_\infty}{\nu \cdot x}} \quad (11.9)$$

ผลเฉลยของกรณีนี้แสดงไว้ในตารางที่ 11.1

ตารางที่ 11.1 รูปร่างความเร็วภายใต้ชั้นขอบเขตความเร็ว

$\eta$	$V_x/V_\infty$	$\eta$	$V_x/V_\infty$
0.0	0.0000	2.8	0.8115
0.4	0.1328	3.2	0.8761
0.8	0.2647	3.6	0.9233
1.2	0.3938	4.0	0.9555
1.6	0.5168	4.4	0.9759
2.0	0.6298	4.8	0.9878
2.4	0.7290	5.0	0.9916



ทั้งนี้พบว่าที่  $V_x = 0.99V_\infty$  เมื่อ  $\eta = 5.0$  ดังนั้นความหนาของชั้นขอบเขตความเร็ว ที่ระยะทาง  $x$  จากขอบทางเข้า คำนวณได้จาก

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{V_\infty}} \quad (11.10)$$

หรือ

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (11.11)$$

ที่บริเวณติดกับผนังของพื้นผิวเรียบ ( $y=0$ ) ดังนั้น:

$$\left. \frac{dV}{dy} \right|_{y=0} = \frac{0.332 V_\infty}{x} \sqrt{Re_x} \quad (11.12)$$

## 11.2 การไหลราบเรียบบนพื้นผิวเรียบ (Velocity Boundary layer)

ในการไหลบนพื้นผิวเรียบนั้น จะเกิดแรงลากจูง (drag force) กระทำบนพื้นผิวเรียบ อันเนื่องมาจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง ของไหลและพื้นผิวเรียบนั้น ในช่วงการไหลราบเรียบ (laminar zone) ความเค้นเฉือนเฉพาะแห่ง (local shear stress,  $\tau_w$ ) ที่ผนังของพื้นผิวเรียบคือ:

$$\tau_w = \frac{0.332 V_\infty \mu}{x} \sqrt{\text{Re}_x} \quad (11.13)$$

แรงลากจูงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบ (total skin-friction drag,  $D_f$ ) คือ:

$$D_f = \int_0^L \tau_w w \, dx \quad (11.14)$$

$$D_f = 0.664 V_\infty w \mu \sqrt{\text{Re}_L} \quad (11.15)$$

เมื่อ  $w$  คือ ขนาดความกว้างของพื้นผิวเรียบ

ค่าแรงลากจูงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบ อาจหาได้จากสมการที่ 11.16:

$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A \quad (11.16)$$

เมื่อค่า  $C_D$  คือค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉลี่ย (average drag coefficient) และคำนวณได้จากสมการที่ 11.17:

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{\text{Re}_L}} \quad (11.17)$$

โดยตลอดการคำนวณ ค่าคุณสมบัติต่างๆของของไหลให้ใช้ค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ( $T_f$ ) โดยกำหนดให้:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (11.18)$$

## 11.3 การไหลปั่นป่วนบนพื้นผิวเรียบ

### Turbulent flow over a flat plate

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงการคำนวณที่การไหลนั้นเป็นการไหลปั่นป่วน โดยที่ค่า ตัวเลขเรย์โนลด์ Reynolds number ของการไหลนั้นมีค่ามากกว่า  $5 \times 10^5$  โดยธรรมชาติของการไหลปั่นป่วน ลักษณะการไหลจะมีความซับซ้อน การแก้ปัญหาโดยวิธีการแก้สมการชั้นขอบเขต ซึ่งแสดงไปแล้วในช่วงการไหลราบเรียบนั้นอาจไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในช่วงการไหลปั่นป่วนมักใช้วิธีสมการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการทดลองที่เรียกว่า สมการความสัมพันธ์เอมไพริคัล (empirical equation) ดังนี้

ค่าความหนาชั้นขอบเขตความเร็ว ของช่วงการไหลปั่นป่วน หาได้จาก:

$$\delta = \frac{0.368 x}{\text{Re}_x^{1/5}} \quad (11.19)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉพาะที่ (local skin-friction drag coefficient) หาได้จาก:

$$C_d = \frac{0.0573}{Re_x^{1/5}} \quad (11.20)$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉลี่ย (average drag coefficient) หาได้จาก:

$$C_D = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} \quad (11.21)$$

สำหรับการไหลปั่นป่วนบนพื้นผิวเรียบนั้น ถึงแม้ว่าจะเรียกเป็นการไหลปั่นป่วน แต่ในช่วงเริ่มต้นนั้น การไหลจะเป็นแบบราบเรียบก่อนจากนั้นจึงจะพัฒนากลายเป็นการไหลปั่นป่วนในที่สุด หากกำหนดให้การไหลแบบราบเรียบนั้นเกิดขึ้นในช่วงระยะ  $0 < x < x_c$  และการไหลปั่นป่วนนั้นเกิดขึ้นเมื่อ  $x_c < x < L$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉลี่ย ตลอดพื้นผิวเรียบสามารถหาได้จาก

$$D_{f-total} = D_{f-laminar (0 < x < x_{cri})} + D_{f-turbulent (0 < x < L)} - D_{f-turbulent (0 < x < x_{cri})} \quad (11.22)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉลี่ย ตลอดพื้นผิวเรียบคือ:

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_{cri}}} \frac{x_{cri}}{L} + \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{0.074}{Re_{cri}^{1/5}} \frac{x_{cri}}{L} \quad (11.23)$$

จาก  $Re_{cri} = 5 \times 10^5$  แทนค่าในสมการที่ 11.23 จะได้:

$$C_D = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1743}{Re_L} \quad (11.24)$$

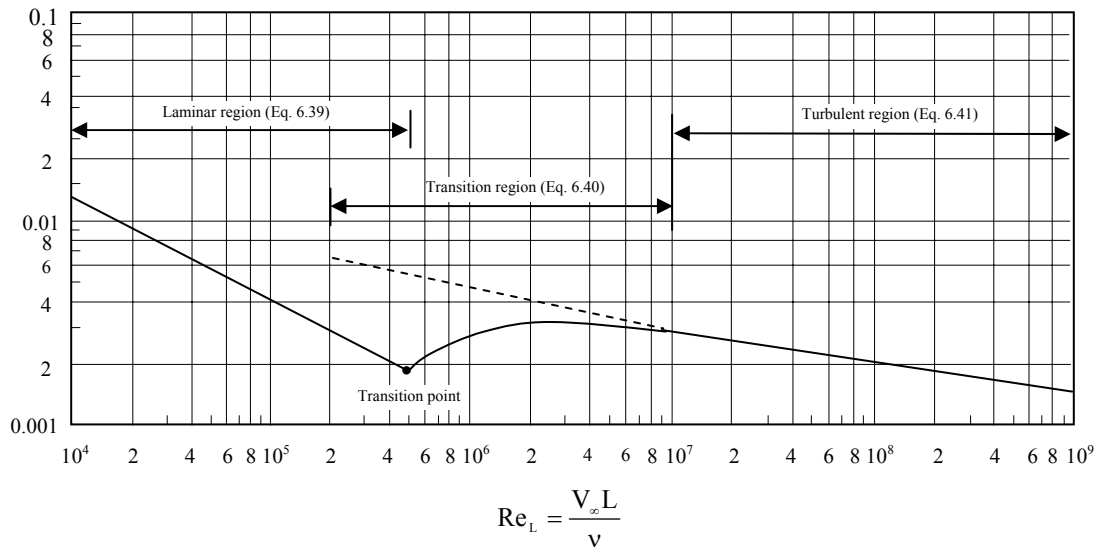
ในทางปฏิบัติมักให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูงเฉลี่ย ตลอดพื้นผิวเรียบ จากสมการ:

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad ; 0 < Re_L < 5 \times 10^5 \quad (11.25)$$

$$C_D = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} \quad ; 2 \times 10^5 < Re_L < 10^7 \quad (11.26)$$

$$C_D = \frac{0.455}{[\log Re_L]^{2.58}} - \frac{1700}{Re_L} \quad ; 10^7 < Re_L < 10^9 \quad (11.27)$$

$$C_D = \frac{2D_f}{\rho V_\infty^2 W L}$$

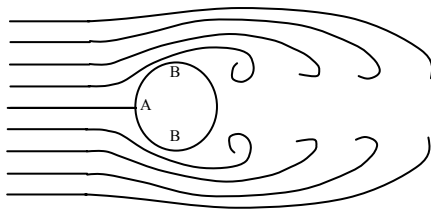


รูปที่ 11.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลบนพื้นผิวเรียบ

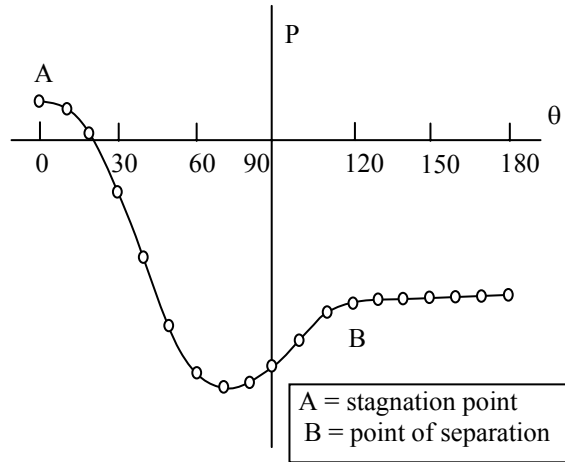
(Drag coefficient as a function of Reynolds number at plate end for flow over a flat plate)

#### 11.4 การไหลผ่านท่อหรือทรงกระบอกเดี่ยว (Flow past a cylinder)

พิจารณาการไหลของของไหลผ่านตามแนวขวางของท่อหรือทรงกระบอกเดี่ยวที่มีความยาวมาก รูปที่ 11.4 แสดงกระแสการไหลของของไหลสำหรับการไหลลักษณะนี้ จุด A คือจุดหยุดนิ่ง (*stagnation point*) จุด B คือจุดที่เกิดการแยกตัวของการไหล (*Separation point*) หลังจากจุด B ไปจะเรียกว่าบริเวณของการไหลแยกตัว (*separation region*) หรือ บริเวณการไหลกวน (*wake region*) ที่บริเวณดังกล่าวนี้ การไหลจะแยกตัวจากผิวของท่อทรงกระบอก เพราะกระแสการไหลไม่สามารถไหลตามการเปลี่ยนรูปร่างหรือตามส่วนโค้งของทรงกระบอกได้ทัน รูปร่างการกระจายตัวของความดันบนผิวของทรงกระบอกมักได้จากการวัดจากการทดลอง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 11.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่จุดหยุดนิ่ง (*stagnation point* ( $\theta=0^\circ$ )) ความดันในการไหลที่จุดดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าค่าความดันบรรยากาศซึ่งใช้เป็นความดันอ้างอิง จากนั้นเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นค่าความดันจะมีค่าลดลง จนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุด ( $70^\circ$ ) ในขณะเดียวกันกับที่ความเร็วในการไหลมีค่ามากที่สุด หลังจากการไหลผ่านจุดนี้ไป การไหลจะเกิดการแยกตัวขึ้น ( $120^\circ$ ) ขณะที่ความดันจะมีค่าเกือบจะคงที่ จะเห็นได้ว่ารูปร่างของความดันที่ด้านหน้าของทรงกระบอก กับส่วนด้านหลังจะมีความแตกต่างกัน ความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของทรงกระบอกนี้เอง (*pressure drag, form drag*) ทำให้เกิดแรงลัพธ์กระทำกับทรงกระบอกในทิศทางการไหล ที่เรียกว่าแรงลากจูงรวม

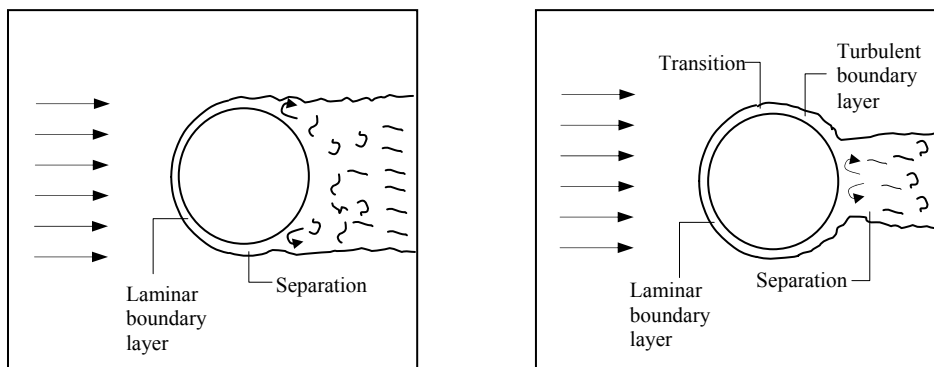


รูปที่ 11.4 กระแสการไหลรอบทรงกระบอก



รูปที่ 11.5 การกระจายตัวของความดันกับระยะทางเชิงมุมในการไหลผ่านทรงกระบอก

ลักษณะการไหลที่แตกต่างกันดังรูปที่ 11.6 (การไหลราบเรียบหรือการไหลปั่นป่วน) จะเป็นอิทธิพลต่อการกำหนดตำแหน่งของจุดแยกตัวของการไหล ซึ่งในท้ายที่สุดจะส่งผลต่อขนาดของแรงลากจูงรวมที่กระทำกับทรงกระบอก หากการไหลนั้นเป็นการไหลปั่นป่วน จะพบว่าชั้นขอบเขตความเร็วจะมีความหนาน้อยกว่าที่พบในการไหลราบเรียบ และการไหลปั่นป่วนจะมีการผสมกันของกระแสของไหลมากกว่า อันเป็นสาเหตุให้เกิดการกระจายและการถ่ายทอดของพลังงานจลน์ของการไหลที่มากกว่า ดังนั้นการไหลปั่นป่วนจึงเป็นการไหลที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงความดันที่เพิ่มขึ้นในทิศทางการไหล (*adverse pressure gradient*) ได้ดีกว่า เป็นสาเหตุให้การไหลแยกตัวเกิดขึ้นที่จุดที่ไกลกว่าห่างออกไปด้านหลังของทรงกระบอก เมื่อเทียบกับการไหลแยกตัวที่เกิดขึ้นในลักษณะการไหลราบเรียบ



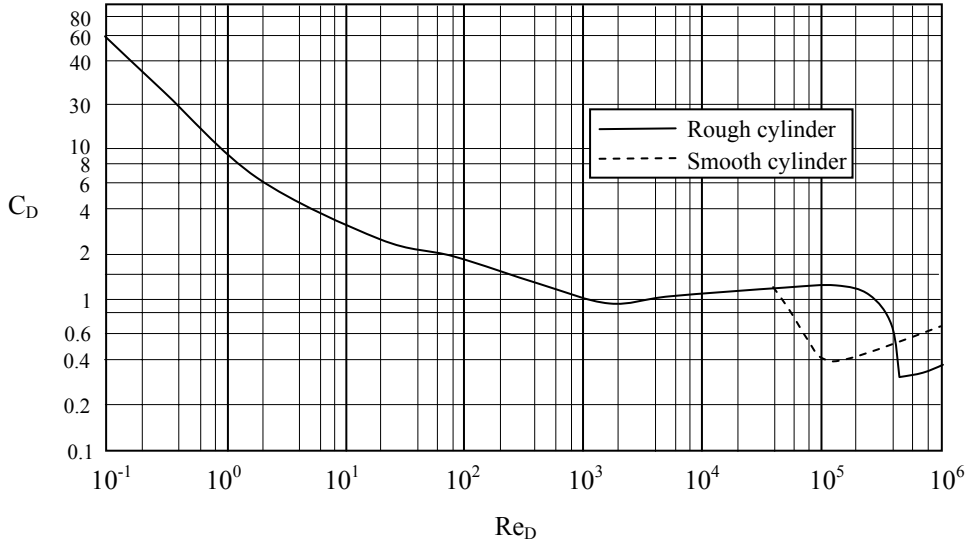
รูปที่ 11.6 เปรียบเทียบการไหลแยกตัวที่เกิดขึ้นในลักษณะการไหลราบเรียบและการไหลปั่นป่วนผ่านท่อทรงกระบอก



ขนาดของแรงลากจูงหาได้จาก:

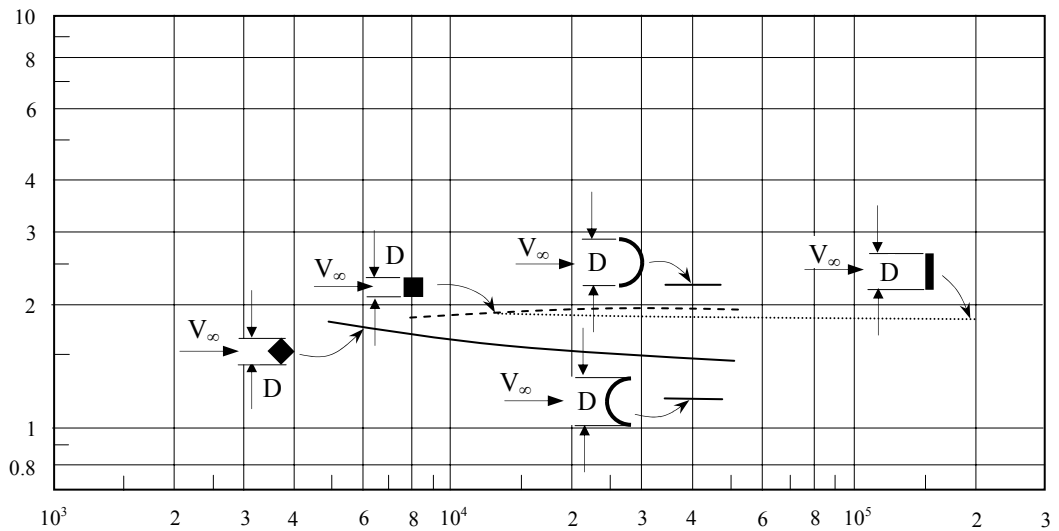
$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A \quad (11.28)$$

เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ฉายด้านหน้า (projected front area) ของทรงกระบอกขวาง ( $A=D \times L$ )  
 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง ( $C_D$ ) สามารถหาได้โดยใช้แผนภาพจากรูปที่ 11.7 และ 11.8



รูปที่ 11.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง ( $C_D$ ) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_D$ ) สำหรับการไหลผ่านท่อทรงกระบอก

$$C_{D_s} = \frac{D_f}{\rho V_\infty^2 DL}$$



$$Re_D = \frac{\rho V_\infty D}{\mu}$$

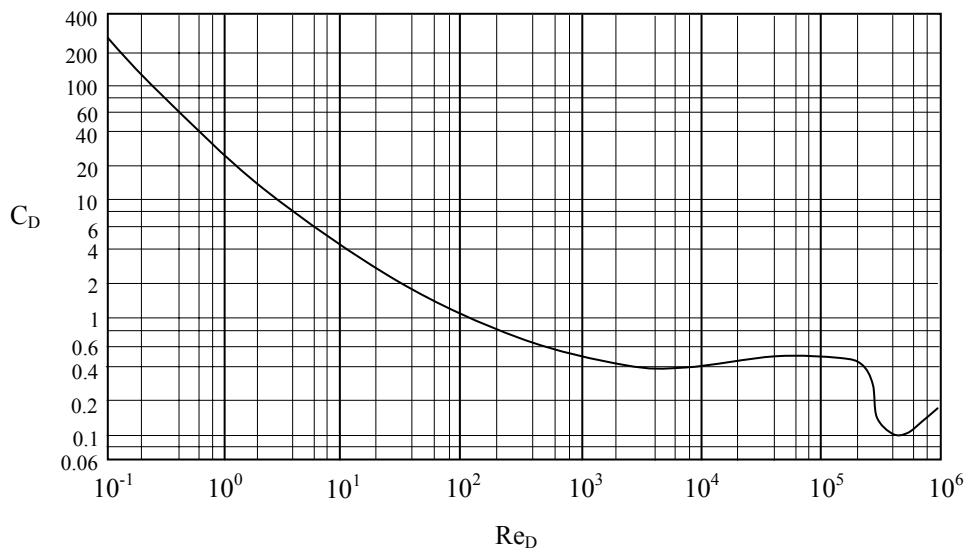
รูปที่ 11.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง ( $C_D$ ) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_D$ ) สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรง 2 มิติ อื่นๆ

### 11.5 การไหลผ่านวัตถุทรงกลม (Flow past a sphere)

ลักษณะการไหลผ่านวัตถุทรงกลมนั้นจะคล้ายกับการไหลผ่านท่อหรือทรงกระบอกเดี่ยว โดยในระหว่างการไหลจะมีการพัฒนาชั้นขอบเขตความเร็วจนกระทั่งเกิดการไหลแยกตัวขึ้น รูปร่างของความดันที่ด้านหน้าของทรงกลม กับส่วนด้านหลังจะมีความแตกต่างกัน ความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง ทำให้เกิดแรงลัพธ์กระทำกับทรงกลมในทิศทางการไหล ที่เรียกว่าแรงลากจูง (*Drag force*) โดยที่ขนาดของแรงลากจูงที่กระทำกับทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11.29)

$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A \quad (11.29)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง ( $C_D$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหล สามารถหาได้โดยใช้แผนภาพจากรูปที่ 11.9



$$Re_D = \frac{\rho V_\infty D}{\mu}$$

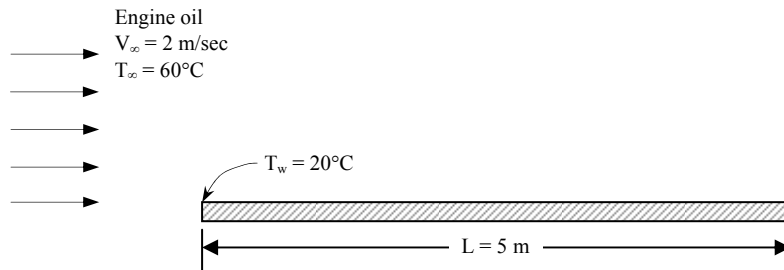
$$C_D = \frac{D_f}{2V_\infty^2 A}$$

$\rho$  = density of fluid  
 $V_\infty$  = free stream velocity  
 $D$  = diameter of sphere  
 $\mu$  = viscosity of fluid  
 $D_f$  = drag force exerted on sphere  
 $A$  = projected frontal area

รูปที่ 11.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลากจูง ( $C_D$ ) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ( $Re_D$ ) สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรงกลม

**ตัวอย่างที่ 11.1**

น้ำมันเครื่อง (Engine oil) ที่กระแสการไหลอิสระมีอุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  และไหลด้วยความเร็ว  $2\text{ m/sec}$  หลังจากนั้นเกิดการไหลไปบนพื้นผิวเรียบที่มีความยาว  $5\text{ m}$  หากพื้นผิวเรียบมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$  จงคำนวณหาค่าแรงลากจูงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบดังกล่าว

**วิธีทำ**

หาอุณหภูมิเฉลี่ย  $T_f = (T_\infty + T_w)/2 = (60 + 20)/2 = 40^{\circ}\text{C}$

คุณสมบัติของน้ำมันเครื่อง ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$ :

$$\rho = 877.9\text{ kg/m}^3, \nu = 288 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s},$$

คำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยตลอดพื้นผิว;  $Re_L = \frac{V_\infty \cdot L}{\nu}$

$$Re_L = \frac{2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times 5 [\text{m}]}{288 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 0.347 \times 10^5 \text{ แสดงว่าค่า เรย์โนลด์เฉลี่ยตลอดพื้นผิว: } Re_L < Re_{\text{cri}} = 5 \times 10^5$$

ดังนั้นตลอดการไหลบนพื้นผิวเรียบดังกล่าวจึงเป็นการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น

$$\text{หาค่าแรงลากจูง; } D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A$$

$$\text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ } C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} = \frac{1.328}{\sqrt{0.347 \times 10^5}} = 0.007129$$

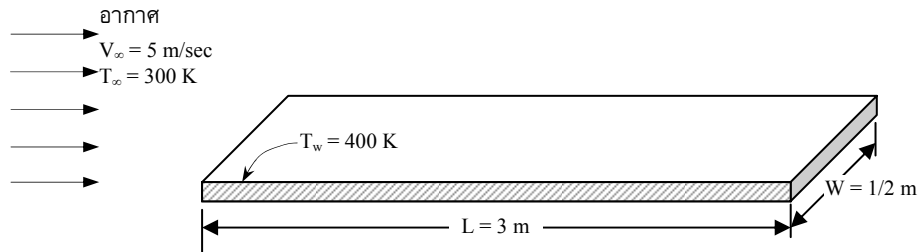
$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A = \frac{1}{2} \times 0.007129 \times 877.9 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \left( 2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2 \times W \times L$$

$$\frac{D_f}{W} = \frac{1}{2} \times 0.007129 \times 877.9 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \left( 2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2 \times W \times 5 [\text{m}]$$

$$= 62.59 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right] = 62.59 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

**ตัวอย่างที่ 11.2**

อากาศที่อุณหภูมิ 300 K ไหลด้วยความเร็ว 5 m/sec ไหลไปบนพื้นผิวเรียบมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 400 K หากพื้นผิวเรียบนั้นมีความยาว 3 m มีความกว้าง  $\frac{1}{2}$  m จงคำนวณหาแรงลากจูงตลอดการไหลบนพื้นผิวเรียบ และ ค่าความหนาชั้นขอบเขตความเร็ว

**วิธีทำ**

หาอุณหภูมิเฉลี่ย  $T_f = (T_\infty + T_w)/2 = (400 + 300)/2 = 350 \text{ K}$

คุณสมบัติของอากาศ ที่อุณหภูมิ 350 K:

$$\rho = \text{kg/m}^3, \nu = 2.88 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

คำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยตลอดพื้นผิว;  $Re_L = \frac{V_\infty \cdot L}{\nu}$

$$Re_L = \frac{2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times 5 [\text{m}]}{2.88 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 0.347 \times 10^5 \text{ แสดงว่าค่า เรย์โนลด์เฉลี่ยตลอดพื้นผิว: } Re_L < Re_{\text{cri}} = 5 \times 10^5$$

ดังนั้นตลอดการไหลบนพื้นผิวเรียบดังกล่าวจึงเป็นการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น

ก) หาค่าแรงลากจูง;  $D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A$

$$\text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ } C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} = \frac{1.328}{\sqrt{0.347 \times 10^5}} = 0.007129$$

$$D_f = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 A = \frac{1}{2} \times 0.007129 \times 877.9 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \left( 2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2 \times W \times L$$

$$\frac{D_f}{W} = \frac{1}{2} \times 0.007129 \times 877.9 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \left( 2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2 \times W \times 5 [\text{m}]$$

$$= 62.59 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right] = 62.59 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

ข) ค่าความหนาชั้นขอบเขตความเร็ว

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}}$$

ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางความร้อนของก๊าซชนิดต่างๆที่ความดัน 1 บรรยากาศ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p</sub> (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.S/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	P <sub>r</sub>
<b>อากาศ</b>							
100	3.5562	1.032	71.1*10 <sup>-7</sup>	2*10 <sup>-6</sup>	2.54*10 <sup>-6</sup>	0.0093	0.786
150	2.3364	1.012	103.4*10 <sup>-7</sup>	4.426*10 <sup>-6</sup>	5.84*10 <sup>-6</sup>	0.0138	0.758
200	1.7458	1.007	132.5*10 <sup>-7</sup>	7.59*10 <sup>-6</sup>	10.3*10 <sup>-6</sup>	0.0181	0.737
250	1.3947	1.006	159.6*10 <sup>-7</sup>	11.44*10 <sup>-6</sup>	15.9*10 <sup>-6</sup>	0.0223	0.720
300	1.1614	1.007	184.6*10 <sup>-7</sup>	15.89*10 <sup>-6</sup>	22.5*10 <sup>-6</sup>	0.0263	0.707
350	0.9950	1.009	208.2*10 <sup>-7</sup>	20.92*10 <sup>-6</sup>	29.9*10 <sup>-6</sup>	0.0300	0.700
400	0.8711	1.014	230.1*10 <sup>-7</sup>	26.41*10 <sup>-6</sup>	38.3*10 <sup>-6</sup>	0.0338	0.690
450	0.7740	1.021	250.7*10 <sup>-7</sup>	32.39*10 <sup>-6</sup>	47.2*10 <sup>-6</sup>	0.0373	0.686
500	0.6964	1.030	270.1*10 <sup>-7</sup>	38.79*10 <sup>-6</sup>	56.7*10 <sup>-6</sup>	0.0407	0.684
550	0.6329	1.040	288.4*10 <sup>-7</sup>	45.57*10 <sup>-6</sup>	66.7*10 <sup>-6</sup>	0.0439	0.683
600	0.5804	1.051	305.8*10 <sup>-7</sup>	52.69*10 <sup>-6</sup>	76.9*10 <sup>-6</sup>	0.0469	0.685
650	0.5356	1.063	322.5*10 <sup>-7</sup>	60.21*10 <sup>-6</sup>	87.3*10 <sup>-6</sup>	0.0497	0.690
700	0.4975	1.075	338.8*10 <sup>-7</sup>	68.1*10 <sup>-6</sup>	98*10 <sup>-6</sup>	0.0524	0.695
750	0.4643	1.087	354.6*10 <sup>-7</sup>	76.37*10 <sup>-6</sup>	109*10 <sup>-6</sup>	0.0549	0.702
800	0.4354	1.099	369.8*10 <sup>-7</sup>	84.93*10 <sup>-6</sup>	120*10 <sup>-6</sup>	0.0573	0.709
850	0.4097	1.110	384.3*10 <sup>-7</sup>	93.8*10 <sup>-6</sup>	131*10 <sup>-6</sup>	0.0596	0.716
900	0.3868	1.121	398.1*10 <sup>-7</sup>	102.9*10 <sup>-6</sup>	143*10 <sup>-6</sup>	0.0620	0.720
950	0.3666	1.131	411.3*10 <sup>-7</sup>	112.2*10 <sup>-6</sup>	155*10 <sup>-6</sup>	0.0643	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4*10 <sup>-7</sup>	121.9*10 <sup>-6</sup>	168*10 <sup>-6</sup>	0.0667	0.726
1100	0.3166	1.159	449*10 <sup>-7</sup>	141.8*10 <sup>-6</sup>	195*10 <sup>-6</sup>	0.0715	0.728
1200	0.2902	1.175	473*10 <sup>-7</sup>	162.9*10 <sup>-6</sup>	224*10 <sup>-6</sup>	0.0763	0.728
1300	0.2679	1.189	496*10 <sup>-7</sup>	185.1*10 <sup>-6</sup>	238*10 <sup>-6</sup>	0.0820	0.719
1400	0.2488	1.207	530*10 <sup>-7</sup>	213*10 <sup>-6</sup>	303*10 <sup>-6</sup>	0.0910	0.703
1500	0.2322	1.230	557*10 <sup>-7</sup>	240*10 <sup>-6</sup>	350*10 <sup>-6</sup>	0.1000	0.685
1600	0.2177	1.248	584*10 <sup>-7</sup>	268*10 <sup>-6</sup>	390*10 <sup>-6</sup>	0.1060	0.688
1700	0.2049	1.267	611*10 <sup>-7</sup>	298*10 <sup>-6</sup>	435*10 <sup>-6</sup>	0.1130	0.685
1800	0.1935	1.286	637*10 <sup>-7</sup>	329*10 <sup>-6</sup>	482*10 <sup>-6</sup>	0.1200	0.683
1900	0.1833	1.307	663*10 <sup>-7</sup>	362*10 <sup>-6</sup>	534*10 <sup>-6</sup>	0.1280	0.677
2000	0.1741	1.337	689*10 <sup>-7</sup>	396*10 <sup>-6</sup>	589*10 <sup>-6</sup>	0.1370	0.672
2100	0.1658	1.372	715*10 <sup>-7</sup>	431*10 <sup>-6</sup>	646*10 <sup>-6</sup>	0.1470	0.667
2200	0.1582	1.417	740*10 <sup>-7</sup>	468*10 <sup>-6</sup>	714*10 <sup>-6</sup>	0.1600	0.655
2300	0.1513	1.478	766*10 <sup>-7</sup>	506*10 <sup>-6</sup>	783*10 <sup>-6</sup>	0.1750	0.647
2400	0.1448	1.558	792*10 <sup>-7</sup>	547*10 <sup>-6</sup>	869*10 <sup>-6</sup>	0.1960	0.630
2500	0.1389	1.665	818*10 <sup>-7</sup>	589*10 <sup>-6</sup>	960*10 <sup>-6</sup>	0.2220	0.613
3000	0.1135	2.726	955*10 <sup>-7</sup>	841*10 <sup>-6</sup>	1570*10 <sup>-6</sup>	0.4860	0.536
<b>แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>)</b>							
300	0.6894	2.158	101.5*10 <sup>-7</sup>	14.7*10 <sup>-6</sup>	16.6*10 <sup>-6</sup>	0.0247	0.887
320	0.6448	2.170	109*10 <sup>-7</sup>	16.9*10 <sup>-6</sup>	19.4*10 <sup>-6</sup>	0.0272	0.870
340	0.6059	2.192	116.5*10 <sup>-7</sup>	19.2*10 <sup>-6</sup>	22.1*10 <sup>-6</sup>	0.0293	0.872
360	0.5716	2.221	124*10 <sup>-7</sup>	21.7*10 <sup>-6</sup>	24.9*10 <sup>-6</sup>	0.0316	0.872

380      0.5410      2.254       $131 * 10^{-7}$        $24.2 * 10^{-6}$        $27.9 * 10^{-6}$       0.0340      0.869

ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางความร้อนของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ต่อ)

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.S/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	$P_r$
<b>แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>)</b>							
400	0.5136	2.287	138*10 <sup>-7</sup>	26.9*10 <sup>-6</sup>	31.5*10 <sup>-6</sup>	0.0370	0.853
420	0.4888	2.322	145*10 <sup>-7</sup>	29.7*10 <sup>-6</sup>	35.6*10 <sup>-6</sup>	0.0404	0.833
440	0.4664	2.357	152.5*10 <sup>-7</sup>	32.7*10 <sup>-6</sup>	39.6*10 <sup>-6</sup>	0.0435	0.826
460	0.4460	2.393	159*10 <sup>-7</sup>	35.7*10 <sup>-6</sup>	43.4*10 <sup>-6</sup>	0.0463	0.822
480	0.4273	2.430	166.5*10 <sup>-7</sup>	39*10 <sup>-6</sup>	47.4*10 <sup>-6</sup>	0.0492	0.822
500	0.4101	2.467	173*10 <sup>-7</sup>	42.2*10 <sup>-6</sup>	51.9*10 <sup>-6</sup>	0.0525	0.813
520	0.3942	2.504	180*10 <sup>-7</sup>	45.7*10 <sup>-6</sup>	55.2*10 <sup>-6</sup>	0.0545	0.827
540	0.3795	2.540	186.5*10 <sup>-7</sup>	49.1*10 <sup>-6</sup>	59.7*10 <sup>-6</sup>	0.0575	0.824
560	0.3708	2.577	193*10 <sup>-7</sup>	52*10 <sup>-6</sup>	63.4*10 <sup>-6</sup>	0.0606	0.827
580	0.3533	2.613	199.5*10 <sup>-7</sup>	56.5*10 <sup>-6</sup>	69.1*10 <sup>-6</sup>	0.0638	0.817
<b>คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)</b>							
280	1.9022	0.830	140*10 <sup>-7</sup>	7.36*10 <sup>-6</sup>	9.63*10 <sup>-6</sup>	0.0152	0.765
300	1.7730	0.851	149*10 <sup>-7</sup>	8.4*10 <sup>-6</sup>	11*10 <sup>-6</sup>	0.01655	0.766
320	1.6609	0.872	156*10 <sup>-7</sup>	9.39*10 <sup>-6</sup>	12.5*10 <sup>-6</sup>	0.01805	0.754
340	1.5618	0.891	165*10 <sup>-7</sup>	10.6*10 <sup>-6</sup>	14.2*10 <sup>-6</sup>	0.0197	0.746
360	1.4743	0.908	173*10 <sup>-7</sup>	11.7*10 <sup>-6</sup>	15.8*10 <sup>-6</sup>	0.0212	0.741
380	1.3961	0.926	181*10 <sup>-7</sup>	13*10 <sup>-6</sup>	17.6*10 <sup>-6</sup>	0.02275	0.737
400	1.3257	0.942	190*10 <sup>-7</sup>	14.3*10 <sup>-6</sup>	19.5*10 <sup>-6</sup>	0.0243	0.737
450	1.1782	0.981	210*10 <sup>-7</sup>	17.8*10 <sup>-6</sup>	24.5*10 <sup>-6</sup>	0.0283	0.728
500	1.0594	1.02	231*10 <sup>-7</sup>	21.8*10 <sup>-6</sup>	30.1*10 <sup>-6</sup>	0.0325	0.725
550	0.9625	1.05	251*10 <sup>-7</sup>	26.1*10 <sup>-6</sup>	36.2*10 <sup>-6</sup>	0.0366	0.721
600	0.8826	1.08	270*10 <sup>-7</sup>	30.6*10 <sup>-6</sup>	42.7*10 <sup>-6</sup>	0.0407	0.717
650	0.8143	1.10	288*10 <sup>-7</sup>	35.4*10 <sup>-6</sup>	49.7*10 <sup>-6</sup>	0.0445	0.712
700	0.7564	1.13	305*10 <sup>-7</sup>	40.3*10 <sup>-6</sup>	56.3*10 <sup>-6</sup>	0.0481	0.717
750	0.7057	1.15	321*10 <sup>-7</sup>	45.5*10 <sup>-6</sup>	63.7*10 <sup>-6</sup>	0.0517	0.714
800	0.6614	1.17	337*10 <sup>-7</sup>	51*10 <sup>-6</sup>	71.2*10 <sup>-6</sup>	0.0551	0.716
<b>คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)</b>							
200	1.6888	1.045	127*10 <sup>-7</sup>	7.52*10 <sup>-6</sup>	9.63*10 <sup>-6</sup>	0.0170	0.781
220	1.5341	1.044	137*10 <sup>-7</sup>	8.93*10 <sup>-6</sup>	11.9*10 <sup>-6</sup>	0.0190	0.753
240	1.4055	1.043	147*10 <sup>-7</sup>	10.5*10 <sup>-6</sup>	14.1*10 <sup>-6</sup>	0.0206	0.744
260	1.2967	1.043	157*10 <sup>-7</sup>	12.1*10 <sup>-6</sup>	16.3*10 <sup>-6</sup>	0.0221	0.741
280	1.2038	1.042	166*10 <sup>-7</sup>	13.8*10 <sup>-6</sup>	18.8*10 <sup>-6</sup>	0.0236	0.733
300	1.1233	1.043	175*10 <sup>-7</sup>	15.6*10 <sup>-6</sup>	21.3*10 <sup>-6</sup>	0.0250	0.730
320	1.0529	1.043	184*10 <sup>-7</sup>	17.5*10 <sup>-6</sup>	23.9*10 <sup>-6</sup>	0.0263	0.730
340	0.9909	1.044	193*10 <sup>-7</sup>	19.5*10 <sup>-6</sup>	26.9*10 <sup>-6</sup>	0.0278	0.725
360	0.9357	1.045	202*10 <sup>-7</sup>	21.6*10 <sup>-6</sup>	29.8*10 <sup>-6</sup>	0.0291	0.725
380	0.8864	1.047	210*10 <sup>-7</sup>	23.7*10 <sup>-6</sup>	32.9*10 <sup>-6</sup>	0.0305	0.729
400	0.8421	1.049	218*10 <sup>-7</sup>	25.9*10 <sup>-6</sup>	36*10 <sup>-6</sup>	0.0318	0.719
450	0.7483	1.055	237*10 <sup>-7</sup>	31.7*10 <sup>-6</sup>	44.3*10 <sup>-6</sup>	0.0350	0.714
500	0.67352	1.065	254*10 <sup>-7</sup>	37.7*10 <sup>-6</sup>	53.1*10 <sup>-6</sup>	0.0381	0.710

550	0.61226	1.076	$271 \cdot 10^{-7}$	$44.3 \cdot 10^{-6}$	$62.4 \cdot 10^{-6}$	0.0411	0.710
600	0.56126	1.088	$286 \cdot 10^{-7}$	$51 \cdot 10^{-6}$	$72.1 \cdot 10^{-6}$	0.0440	0.707

ก-16

ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางความร้อนของก๊าซชนิดต่างๆที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ต่อ)

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.S/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	$P_r$
<b>คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)</b>							
650	0.51806	1.101	$301 \cdot 10^{-7}$	$58.1 \cdot 10^{-6}$	$82.4 \cdot 10^{-6}$	0.0470	0.705
700	0.48102	1.114	$315 \cdot 10^{-7}$	$65.5 \cdot 10^{-6}$	$93.3 \cdot 10^{-6}$	0.0500	0.702
750	0.44899	1.127	$329 \cdot 10^{-7}$	$73.3 \cdot 10^{-6}$	$104 \cdot 10^{-6}$	0.0528	0.702
800	0.42095	1.140	$343 \cdot 10^{-7}$	$81.5 \cdot 10^{-6}$	$116 \cdot 10^{-6}$	0.0555	0.705
<b>ฮีเลียม (He)</b>							
100	0.48710	5.193	$96.3 \cdot 10^{-7}$	$19.8 \cdot 10^{-6}$	$28.9 \cdot 10^{-6}$	0.0730	0.686
120	0.40600	5.193	$107 \cdot 10^{-7}$	$26.4 \cdot 10^{-6}$	$38.8 \cdot 10^{-6}$	0.0819	0.679
140	0.34810	5.193	$118 \cdot 10^{-7}$	$33.9 \cdot 10^{-6}$	$50.2 \cdot 10^{-6}$	0.0907	0.676
160	-	5.193	$129 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.0992	-
180	0.27080	5.193	$139 \cdot 10^{-7}$	$51.3 \cdot 10^{-6}$	$76.2 \cdot 10^{-6}$	0.1072	0.673
200	-	5.193	$150 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.1151	-
220	0.22160	5.193	$160 \cdot 10^{-7}$	$72.2 \cdot 10^{-6}$	$107 \cdot 10^{-6}$	0.1231	0.675
240	-	5.193	$170 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.1300	-
260	0.18750	5.193	$180 \cdot 10^{-7}$	$96 \cdot 10^{-6}$	$141 \cdot 10^{-6}$	0.1370	0.682
280	-	5.193	$190 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.1450	-
300	0.16250	5.193	$199 \cdot 10^{-7}$	$122 \cdot 10^{-6}$	$180 \cdot 10^{-6}$	0.1520	0.680
350	-	5.193	$221 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.1700	-
400	0.12190	5.193	$243 \cdot 10^{-7}$	$199 \cdot 10^{-6}$	$295 \cdot 10^{-6}$	0.1870	0.675
450	-	5.193	$263 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.2040	-
500	0.09754	5.193	$283 \cdot 10^{-7}$	$290 \cdot 10^{-6}$	$434 \cdot 10^{-6}$	0.2200	0.668
550	-	5.193	-	-	-	-	-
600	-	5.193	$320 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.2520	-
650	-	5.193	$332 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.2640	-
700	0.06969	5.193	$350 \cdot 10^{-7}$	$502 \cdot 10^{-6}$	$768 \cdot 10^{-6}$	0.2780	0.654
750	-	5.193	$364 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.2910	-
800	-	5.193	$382 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.3040	-
900	-	5.193	$414 \cdot 10^{-7}$	-	-	0.3300	-
1000	0.04879	5.193	$446 \cdot 10^{-7}$	$914 \cdot 10^{-6}$	$1400 \cdot 10^{-6}$	0.3540	0.654
<b>ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>)</b>							
100	0.24255	11.23	$42.1 \cdot 10^{-7}$	$17.4 \cdot 10^{-6}$	$24.6 \cdot 10^{-6}$	0.0670	0.707
150	0.16156	12.60	$56 \cdot 10^{-7}$	$34.7 \cdot 10^{-6}$	$49.6 \cdot 10^{-6}$	0.1010	0.699
200	0.12115	13.54	$68.1 \cdot 10^{-7}$	$56.2 \cdot 10^{-6}$	$79.9 \cdot 10^{-6}$	0.1310	0.704
250	0.09693	14.06	$78.9 \cdot 10^{-7}$	$81.4 \cdot 10^{-6}$	$115 \cdot 10^{-6}$	0.1570	0.707
300	0.08078	14.31	$89.6 \cdot 10^{-7}$	$111 \cdot 10^{-6}$	$158 \cdot 10^{-6}$	0.1830	0.701
350	0.06924	14.43	$98.8 \cdot 10^{-7}$	$143 \cdot 10^{-6}$	$204 \cdot 10^{-6}$	0.2040	0.700
400	0.06059	14.48	$108.2 \cdot 10^{-7}$	$179 \cdot 10^{-6}$	$258 \cdot 10^{-6}$	0.2260	0.695
450	0.05386	14.50	$117.2 \cdot 10^{-7}$	$218 \cdot 10^{-6}$	$316 \cdot 10^{-6}$	0.2470	0.689
500	0.04848	14.52	$126.4 \cdot 10^{-7}$	$261 \cdot 10^{-6}$	$378 \cdot 10^{-6}$	0.2660	0.691
550	0.04407	14.53	$134.3 \cdot 10^{-7}$	$305 \cdot 10^{-6}$	$445 \cdot 10^{-6}$	0.2850	0.685





ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางความร้อนของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ต่อ)

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p</sub> (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.S/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	P <sub>r</sub>
<b>ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>)</b>							
600	0.04040	14.55	142.4*10 <sup>-7</sup>	352*10 <sup>-6</sup>	519*10 <sup>-6</sup>	0.3050	0.678
700	0.03463	14.61	157.8*10 <sup>-7</sup>	456*10 <sup>-6</sup>	676*10 <sup>-6</sup>	0.3420	0.675
800	0.03030	14.70	172.4*10 <sup>-7</sup>	569*10 <sup>-6</sup>	849*10 <sup>-6</sup>	0.3780	0.670
900	0.02694	14.83	186.5*10 <sup>-7</sup>	692*10 <sup>-6</sup>	1030*10 <sup>-6</sup>	0.4120	0.671
1000	0.02424	14.99	201.3*10 <sup>-7</sup>	830*10 <sup>-6</sup>	1230*10 <sup>-6</sup>	0.4480	0.673
1100	0.02204	15.17	213*10 <sup>-7</sup>	966*10 <sup>-6</sup>	1460*10 <sup>-6</sup>	0.4880	0.662
1200	0.02020	15.37	226.2*10 <sup>-7</sup>	1120*10 <sup>-6</sup>	1700*10 <sup>-6</sup>	0.5280	0.659
1300	0.01865	15.59	238.5*10 <sup>-7</sup>	1279*10 <sup>-6</sup>	1955*10 <sup>-6</sup>	0.5680	0.655
1400	0.01732	15.81	250.7*10 <sup>-7</sup>	1447*10 <sup>-6</sup>	2230*10 <sup>-6</sup>	0.6100	0.650
1500	0.01616	16.02	262.7*10 <sup>-7</sup>	1626*10 <sup>-6</sup>	2530*10 <sup>-6</sup>	0.6550	0.643
1600	0.01520	16.28	273.7*10 <sup>-7</sup>	1801*10 <sup>-6</sup>	2815*10 <sup>-6</sup>	0.6970	0.639
1700	0.01430	16.58	284.9*10 <sup>-7</sup>	1992*10 <sup>-6</sup>	3130*10 <sup>-6</sup>	0.7420	0.637
1800	0.01350	16.96	296.1*10 <sup>-7</sup>	2193*10 <sup>-6</sup>	3435*10 <sup>-6</sup>	0.7860	0.639
1900	0.01280	17.49	307.2*10 <sup>-7</sup>	2400*10 <sup>-6</sup>	3730*10 <sup>-6</sup>	0.8350	0.643
2000	0.01210	18.25	318.2*10 <sup>-7</sup>	2630*10 <sup>-6</sup>	3975*10 <sup>-6</sup>	0.8780	0.661
<b>ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)</b>							
100	3.4388	1.070	68.8*10 <sup>-7</sup>	2*10 <sup>-6</sup>	2.6*10 <sup>-6</sup>	0.00958	0.768
150	2.2594	1.050	100.6*10 <sup>-7</sup>	4.45*10 <sup>-6</sup>	5.86*10 <sup>-6</sup>	0.0139	0.759
200	1.6883	1.043	129.2*10 <sup>-7</sup>	7.65*10 <sup>-6</sup>	10.4*10 <sup>-6</sup>	0.0183	0.736
250	1.3488	1.042	154.9*10 <sup>-7</sup>	11.48*10 <sup>-6</sup>	15.8*10 <sup>-6</sup>	0.0222	0.727
300	1.1233	1.041	178.2*10 <sup>-7</sup>	15.86*10 <sup>-6</sup>	22.1*10 <sup>-6</sup>	0.0259	0.716
350	0.9625	1.042	200*10 <sup>-7</sup>	20.78*10 <sup>-6</sup>	29.2*10 <sup>-6</sup>	0.0293	0.711
400	0.8425	1.045	220.4*10 <sup>-7</sup>	26.16*10 <sup>-6</sup>	37.1*10 <sup>-6</sup>	0.0327	0.704
450	0.7485	1.050	239.6*10 <sup>-7</sup>	32.01*10 <sup>-6</sup>	45.6*10 <sup>-6</sup>	0.0358	0.703
500	0.6739	1.056	257.7*10 <sup>-7</sup>	38.24*10 <sup>-6</sup>	54.7*10 <sup>-6</sup>	0.0389	0.700
550	0.6124	1.065	274.7*10 <sup>-7</sup>	44.86*10 <sup>-6</sup>	63.9*10 <sup>-6</sup>	0.0417	0.702
600	0.5615	1.075	290.8*10 <sup>-7</sup>	51.79*10 <sup>-6</sup>	73.9*10 <sup>-6</sup>	0.0446	0.701
700	0.4812	1.098	321*10 <sup>-7</sup>	66.71*10 <sup>-6</sup>	94.4*10 <sup>-6</sup>	0.0499	0.706
800	0.4211	1.220	349.1*10 <sup>-7</sup>	82.9*10 <sup>-6</sup>	116*10 <sup>-6</sup>	0.0480	0.715
900	0.3743	1.146	375.3*10 <sup>-7</sup>	100.3*10 <sup>-6</sup>	139*10 <sup>-6</sup>	0.0597	0.721
1000	0.3368	1.167	399.9*10 <sup>-7</sup>	118.7*10 <sup>-6</sup>	165*10 <sup>-6</sup>	0.0647	0.721
1100	0.3062	1.187	423.2*10 <sup>-7</sup>	138.2*10 <sup>-6</sup>	193*10 <sup>-6</sup>	0.0700	0.718
1200	0.2807	1.204	445.3*10 <sup>-7</sup>	158.6*10 <sup>-6</sup>	224*10 <sup>-6</sup>	0.0758	0.707
1300	0.2591	1.219	466.2*10 <sup>-7</sup>	179.9*10 <sup>-6</sup>	256*10 <sup>-6</sup>	0.0810	0.701
<b>ออกซิเจน (O<sub>2</sub>)</b>							
100	3.954	0.962	76.4*10 <sup>-7</sup>	1.94*10 <sup>-6</sup>	2.44*10 <sup>-6</sup>	0.00925	0.796
150	2.585	0.921	114.8*10 <sup>-7</sup>	4.44*10 <sup>-6</sup>	5.8*10 <sup>-6</sup>	0.0138	0.766
200	1.930	0.915	147.5*10 <sup>-7</sup>	7.64*10 <sup>-6</sup>	10.4*10 <sup>-6</sup>	0.0183	0.737
250	1.542	0.915	178.6*10 <sup>-7</sup>	11.58*10 <sup>-6</sup>	16*10 <sup>-6</sup>	0.0226	0.723
300	1.284	0.920	207.2*10 <sup>-7</sup>	16.14*10 <sup>-6</sup>	22.7*10 <sup>-6</sup>	0.0268	0.711



ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางความร้อนของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ต่อ)

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.S/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	$P_r$
<b>ออกซิเจน (O<sub>2</sub>)</b>							
350	1.1000	0.929	233.5*10 <sup>-7</sup>	21.23*10 <sup>-6</sup>	29*10 <sup>-6</sup>	0.0296	0.733
400	0.9620	0.942	258.2*10 <sup>-7</sup>	26.84*10 <sup>-6</sup>	36.4*10 <sup>-6</sup>	0.0330	0.737
450	0.8554	0.956	281.4*10 <sup>-7</sup>	32.9*10 <sup>-6</sup>	44.4*10 <sup>-6</sup>	0.0363	0.741
500	0.7698	0.972	303.3*10 <sup>-7</sup>	39.4*10 <sup>-6</sup>	55.1*10 <sup>-6</sup>	0.0412	0.716
550	0.6998	0.988	324*10 <sup>-7</sup>	46.3*10 <sup>-6</sup>	63.8*10 <sup>-6</sup>	0.0441	0.726
600	0.6414	1.003	343.7*10 <sup>-7</sup>	53.59*10 <sup>-6</sup>	73.5*10 <sup>-6</sup>	0.0473	0.729
700	0.5498	1.031	380.8*10 <sup>-7</sup>	69.26*10 <sup>-6</sup>	93.1*10 <sup>-6</sup>	0.0528	0.744
800	0.4810	1.054	415.2*10 <sup>-7</sup>	86.32*10 <sup>-6</sup>	116*10 <sup>-6</sup>	0.0589	0.743
900	0.4275	1.074	447.2*10 <sup>-7</sup>	104.6*10 <sup>-6</sup>	141*10 <sup>-6</sup>	0.0649	0.740
1000	0.3848	1.090	477*10 <sup>-7</sup>	124*10 <sup>-6</sup>	169*10 <sup>-6</sup>	0.0710	0.733
1100	0.3498	1.103	505.5*10 <sup>-7</sup>	144.5*10 <sup>-6</sup>	196*10 <sup>-6</sup>	0.0758	0.736
1200	0.3206	1.115	532.5*10 <sup>-7</sup>	166.1*10 <sup>-6</sup>	229*10 <sup>-6</sup>	0.0819	0.725
1300	0.2960	1.125	588.4*10 <sup>-7</sup>	188.6*10 <sup>-6</sup>	262*10 <sup>-6</sup>	0.0871	0.721
<b>ไอน้ำ (steam)</b>							
380	0.5863	2.060	127.1*10 <sup>-7</sup>	21.68*10 <sup>-6</sup>	20.4*10 <sup>-6</sup>	0.0246	1.060
400	0.5542	2.014	134.4*10 <sup>-7</sup>	24.25*10 <sup>-6</sup>	23.4*10 <sup>-6</sup>	0.0261	1.040
450	0.4902	1.980	152.5*10 <sup>-7</sup>	31.11*10 <sup>-6</sup>	30.8*10 <sup>-6</sup>	0.0299	1.010
500	0.4405	1.985	170.4*10 <sup>-7</sup>	38.68*10 <sup>-6</sup>	30.8*10 <sup>-6</sup>	0.0339	0.998
550	0.4005	1.997	188.4*10 <sup>-7</sup>	47.04*10 <sup>-6</sup>	47.4*10 <sup>-6</sup>	0.0379	0.993
600	0.3652	2.026	206.7*10 <sup>-7</sup>	56.6*10 <sup>-6</sup>	57*10 <sup>-6</sup>	0.0422	0.993
650	0.3380	2.056	224.7*10 <sup>-7</sup>	66.48*10 <sup>-6</sup>	66.8*10 <sup>-6</sup>	0.0464	0.996
700	0.3140	2.085	242.6*10 <sup>-7</sup>	77.26*10 <sup>-6</sup>	77.1*10 <sup>-6</sup>	0.0505	1.000
750	0.2931	2.119	260.4*10 <sup>-7</sup>	88.84*10 <sup>-6</sup>	88.4*10 <sup>-6</sup>	0.0549	1.000
800	0.2739	2.152	278.6*10 <sup>-7</sup>	101.7*10 <sup>-6</sup>	100*10 <sup>-6</sup>	0.0592	1.010
850	0.2579	2.186	296.9*10 <sup>-7</sup>	115.1*10 <sup>-6</sup>	113*10 <sup>-6</sup>	0.0637	1.020

ตาราง ก.5 คุณสมบัติทางความร้อนของของไหลอัดตัว

## ของเหลวอัดตัว

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	P <sub>r</sub>	$\beta$ (k <sup>-1</sup> )
<b>น้ำมันเครื่อง (ยังไม่ผ่านการใช้งาน)</b>								
273	899.1	1.796	385*10 <sup>-2</sup>	4820*10 <sup>-6</sup>	0.91*10 <sup>-7</sup>	0.147	47000	0.7*10 <sup>-3</sup>
280	895.3	1.827	217*10 <sup>-2</sup>	2430*10 <sup>-6</sup>	0.88*10 <sup>-7</sup>	0.144	27500	0.7*10 <sup>-3</sup>
290	890.0	1.868	99.9*10 <sup>-2</sup>	1120*10 <sup>-6</sup>	0.872*10 <sup>-7</sup>	0.145	12900	0.7*10 <sup>-3</sup>
300	884.1	1.909	48.6*10 <sup>-2</sup>	550*10 <sup>-6</sup>	0.859*10 <sup>-7</sup>	0.145	6400	0.7*10 <sup>-3</sup>
310	877.9	1.951	25.3*10 <sup>-2</sup>	288*10 <sup>-6</sup>	0.847*10 <sup>-7</sup>	0.145	3400	0.7*10 <sup>-3</sup>
320	871.8	1.993	14.1*10 <sup>-2</sup>	161*10 <sup>-6</sup>	0.823*10 <sup>-7</sup>	0.143	1965	0.7*10 <sup>-3</sup>
330	865.8	2.035	8.36*10 <sup>-2</sup>	96.6*10 <sup>-6</sup>	0.8*10 <sup>-7</sup>	0.141	1205	0.7*10 <sup>-3</sup>
340	859.9	2.076	5.31*10 <sup>-2</sup>	61.7*10 <sup>-6</sup>	0.779*10 <sup>-7</sup>	0.139	793	0.7*10 <sup>-3</sup>
350	853.9	2.118	3.56*10 <sup>-2</sup>	41.7*10 <sup>-6</sup>	0.763*10 <sup>-7</sup>	0.138	546	0.7*10 <sup>-3</sup>
360	847.8	2.161	2.52*10 <sup>-2</sup>	29.7*10 <sup>-6</sup>	0.753*10 <sup>-7</sup>	0.138	395	0.7*10 <sup>-3</sup>
370	841.8	2.206	1.86*10 <sup>-2</sup>	22*10 <sup>-6</sup>	0.738*10 <sup>-7</sup>	0.137	300	0.7*10 <sup>-3</sup>
380	836.0		1.41*10 <sup>-2</sup>	16.9*10 <sup>-6</sup>	0.723*10 <sup>-7</sup>	0.136	233	0.7*10 <sup>-3</sup>
390	830.6	2.294	1.1*10 <sup>-2</sup>	13.3*10 <sup>-6</sup>	0.709*10 <sup>-7</sup>	0.135	187	0.7*10 <sup>-3</sup>
400	825.1	2.337	0.874*10 <sup>-2</sup>	10.6*10 <sup>-6</sup>	0.695*10 <sup>-7</sup>	0.134	152	0.7*10 <sup>-3</sup>
410	818.9	2.381	0.698*10 <sup>-2</sup>	8.52*10 <sup>-6</sup>	0.682*10 <sup>-7</sup>	0.133	125	0.7*10 <sup>-3</sup>
420	812.1	2.427	0.564*10 <sup>-2</sup>	6.94*10 <sup>-6</sup>	0.675*10 <sup>-7</sup>	0.133	103	0.7*10 <sup>-3</sup>
430	806.5	2.471	0.47*10 <sup>-2</sup>	5.83*10 <sup>-6</sup>	0.662*10 <sup>-7</sup>	0.132	88	0.7*10 <sup>-3</sup>
<b>เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>])</b>								
273	1130.8	2.294	6.51*10 <sup>-2</sup>	57.6*10 <sup>-6</sup>	0.933*10 <sup>-7</sup>	0.242	617	0.65*10 <sup>-3</sup>
280	1125.8	2.323	4.2*10 <sup>-2</sup>	37.3*10 <sup>-6</sup>	0.933*10 <sup>-7</sup>	0.244	400	0.65*10 <sup>-3</sup>
290	1118.8	2.368	2.47*10 <sup>-2</sup>	22.1*10 <sup>-6</sup>	0.936*10 <sup>-7</sup>	0.248	236	0.65*10 <sup>-3</sup>
300	1114.4	2.415	1.57*10 <sup>-2</sup>	14.1*10 <sup>-6</sup>	0.939*10 <sup>-7</sup>	0.252	151	0.65*10 <sup>-3</sup>
310	1103.7	2.460	1.07*10 <sup>-2</sup>	9.65*10 <sup>-6</sup>	0.939*10 <sup>-7</sup>	0.255	103	0.65*10 <sup>-3</sup>
320	1096.2	2.505	0.757*10 <sup>-2</sup>	6.91*10 <sup>-6</sup>	0.94*10 <sup>-7</sup>	0.258	73.5	0.65*10 <sup>-3</sup>
330	1089.5	2.549	0.561*10 <sup>-2</sup>	5.15*10 <sup>-6</sup>	0.936*10 <sup>-7</sup>	0.26	55.0	0.65*10 <sup>-3</sup>
340	1083.8	2.592	0.431*10 <sup>-2</sup>	3.98*10 <sup>-6</sup>	0.929*10 <sup>-7</sup>	0.261	42.8	0.65*10 <sup>-3</sup>
350	1079.0	2.637	0.342*10 <sup>-2</sup>	3.17*10 <sup>-6</sup>	0.917*10 <sup>-7</sup>	0.261	34.6	0.65*10 <sup>-3</sup>
360	1074.0	2.682	0.278*10 <sup>-2</sup>	2.59*10 <sup>-6</sup>	0.906*10 <sup>-7</sup>	0.261	28.6	0.65*10 <sup>-3</sup>
370	1066.7	2.728	0.228*10 <sup>-2</sup>	2.14*10 <sup>-6</sup>	0.9*10 <sup>-7</sup>	0.262	23.7	0.65*10 <sup>-3</sup>
373	1058.5	2.742	0.215*10 <sup>-2</sup>	2.03*10 <sup>-6</sup>	0.906*10 <sup>-7</sup>	0.263	22.4	0.65*10 <sup>-3</sup>
<b>กลีเซอริน [C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>(OH)<sub>3</sub>]</b>								
273	1276.0	2.261	1060*10 <sup>-2</sup>	8310*10 <sup>-6</sup>	0.977*10 <sup>-7</sup>	0.282	85000	0.47*10 <sup>-3</sup>
280	1271.9	2.298	534*10 <sup>-2</sup>	4200*10 <sup>-6</sup>	0.972*10 <sup>-7</sup>	0.284	43200	0.47*10 <sup>-3</sup>
290	1265.8	2.367	185*10 <sup>-2</sup>	1460*10 <sup>-6</sup>	0.955*10 <sup>-7</sup>	0.286	15300	0.48*10 <sup>-3</sup>
300	1259.9	2.427	79.9*10 <sup>-2</sup>	634*10 <sup>-6</sup>	0.935*10 <sup>-7</sup>	0.286	6780	0.48*10 <sup>-3</sup>
310	1253.9	2.490	35.2*10 <sup>-2</sup>	281*10 <sup>-6</sup>	0.916*10 <sup>-7</sup>	0.286	3060	0.49*10 <sup>-3</sup>
320	1247.2	2.564	21*10 <sup>-2</sup>	168*10 <sup>-6</sup>	0.897*10 <sup>-7</sup>	0.287	1870	0.5*10 <sup>-3</sup>

ตาราง ก.5 คุณสมบัติทางความร้อนของของไหลอัดตัว (ต่อ)

ของเหลวอัดตัว (ต่อ)

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p</sub> (kJ/kg.K)	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)	P <sub>r</sub>	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
<b>สารทำความเย็น R-134a (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)</b>								
230	1426.8	1.249	0.04912*10 <sup>-2</sup>	0.0443*10 <sup>-6</sup>	0.629*10 <sup>-7</sup>	0.1121	5.5	2.02*10 <sup>-3</sup>
240	1397.7	1.267	0.04202*10 <sup>-2</sup>	0.3006*10 <sup>-6</sup>	0.606*10 <sup>-7</sup>	0.1073	5.0	2.11*10 <sup>-3</sup>
250	1367.9	1.287	0.03633*10 <sup>-2</sup>	0.2656*10 <sup>-6</sup>	0.583*10 <sup>-7</sup>	0.1025	4.6	2.23*10 <sup>-3</sup>
260	1337.1	1.308	0.03166*10 <sup>-2</sup>	0.2368*10 <sup>-6</sup>	0.56*10 <sup>-7</sup>	0.0979	4.2	2.36*10 <sup>-3</sup>
270	1305.1	1.333	0.02775*10 <sup>-2</sup>	0.2127*10 <sup>-6</sup>	0.537*10 <sup>-7</sup>	0.0934	4.0	2.53*10 <sup>-3</sup>
280	1271.8	1.361	0.02443*10 <sup>-2</sup>	0.1921*10 <sup>-6</sup>	0.514*10 <sup>-7</sup>	0.8900	3.7	2.73*10 <sup>-3</sup>
290	1236.8	1.393	0.02156*10 <sup>-2</sup>	0.1744*10 <sup>-6</sup>	0.491*10 <sup>-7</sup>	0.0846	3.5	2.98*10 <sup>-3</sup>
300	1199.7	1.432	0.01905*10 <sup>-2</sup>	0.1588*10 <sup>-6</sup>	0.468*10 <sup>-7</sup>	0.0803	3.4	3.3*10 <sup>-3</sup>
310	1159.9	1.481	0.0168*10 <sup>-2</sup>	0.1449*10 <sup>-6</sup>	0.443*10 <sup>-7</sup>	0.0761	3.3	3.73*10 <sup>-3</sup>
320	1116.8	1.543	0.01478*10 <sup>-2</sup>	0.1323*10 <sup>-6</sup>	0.417*10 <sup>-7</sup>	0.0718	3.2	4.33*10 <sup>-3</sup>
330	1069.1	1.627	0.01292*10 <sup>-2</sup>	0.1209*10 <sup>-6</sup>	0.388*10 <sup>-7</sup>	0.0675	3.1	5.19*10 <sup>-3</sup>
340	1015.0	1.751	0.01118*10 <sup>-2</sup>	0.1102*10 <sup>-6</sup>	0.355*10 <sup>-7</sup>	0.0631	3.1	6.57*10 <sup>-3</sup>
350	951.3	1.961	0.00951*10 <sup>-2</sup>	0.1*10 <sup>-6</sup>	0.314*10 <sup>-7</sup>	0.0586	3.2	9.1*10 <sup>-3</sup>
360	870.1	2.437	0.00781*10 <sup>-2</sup>	0.0898*10 <sup>-6</sup>	0.255*10 <sup>-7</sup>	0.0541	3.5	15.39*10 <sup>-3</sup>
370	740.3	5.105	0.0058*10 <sup>-2</sup>	0.0783*10 <sup>-6</sup>	0.137*10 <sup>-7</sup>	0.0518	5.7	55.24*10 <sup>-3</sup>
<b>สารทำความเย็น R- 22 (CHClF<sub>2</sub>)</b>								
230	1416.0	1.087	0.03558*10 <sup>-2</sup>	0.2513*10 <sup>-6</sup>	0.744*10 <sup>-7</sup>	0.1145	3.4	2.05*10 <sup>-3</sup>
240	1386.6	1.100	0.03145*10 <sup>-2</sup>	0.2268*10 <sup>-6</sup>	0.72*10 <sup>-7</sup>	0.1098	3.2	2.16*10 <sup>-3</sup>
250	1356.3	1.117	0.02796*10 <sup>-2</sup>	0.2062*10 <sup>-6</sup>	0.695*10 <sup>-7</sup>	0.1052	3.0	2.29*10 <sup>-3</sup>
260	1324.9	1.137	0.02497*10 <sup>-2</sup>	0.1884*10 <sup>-6</sup>	0.668*10 <sup>-7</sup>	0.1007	2.8	2.45*10 <sup>-3</sup>
270	1292.1	1.161	0.02235*10 <sup>-2</sup>	0.173*10 <sup>-6</sup>	0.641*10 <sup>-7</sup>	0.0962	2.7	2.63*10 <sup>-3</sup>
280	1257.9	1.189	0.02005*10 <sup>-2</sup>	0.1594*10 <sup>-6</sup>	0.613*10 <sup>-7</sup>	0.0917	2.6	2.86*10 <sup>-3</sup>
290	1221.7	1.223	0.01798*10 <sup>-2</sup>	0.1472*10 <sup>-6</sup>	0.583*10 <sup>-7</sup>	0.0872	2.5	3.15*10 <sup>-3</sup>
300	1183.4	1.265	0.0161*10 <sup>-2</sup>	0.1361*10 <sup>-6</sup>	0.552*10 <sup>-7</sup>	0.0826	2.5	3.51*10 <sup>-3</sup>
310	1142.2	1.319	0.01438*10 <sup>-2</sup>	0.1259*10 <sup>-6</sup>	0.518*10 <sup>-7</sup>	0.0781	2.4	4*10 <sup>-3</sup>
320	1097.4	1.391	0.01278*10 <sup>-2</sup>	0.1165*10 <sup>-6</sup>	0.481*10 <sup>-7</sup>	0.0734	2.4	4.69*10 <sup>-3</sup>
330	1047.5	1.495	0.01127*10 <sup>-2</sup>	0.1075*10 <sup>-6</sup>	0.438*10 <sup>-7</sup>	0.0686	2.5	5.75*10 <sup>-3</sup>
340	990.1	1.665	0.0098*10 <sup>-2</sup>	0.0989*10 <sup>-6</sup>	0.386*10 <sup>-7</sup>	0.0636	2.6	7.56*10 <sup>-3</sup>
350	920.1	1.997	0.00831*10 <sup>-2</sup>	0.0904*10 <sup>-6</sup>	0.317*10 <sup>-7</sup>	0.0583	2.8	11.35*10 <sup>-3</sup>
360	823.4	3.001	0.00668*10 <sup>-2</sup>	0.0811*10 <sup>-6</sup>	0.215*10 <sup>-7</sup>	0.0531	2.8	23.88*10 <sup>-3</sup>
<b>ปรอท (Hg)</b>								
273	13595	0.1404	0.1688*10 <sup>-2</sup>	0.124*10 <sup>-6</sup>	42.85*10 <sup>-7</sup>	8.18	0.0290	0.181*10 <sup>-3</sup>
300	13529	0.1393	0.1523*10 <sup>-2</sup>	0.1125*10 <sup>-6</sup>	45.3*10 <sup>-7</sup>	8.54	0.0248	0.181*10 <sup>-3</sup>
350	13407	0.1377	0.1309*10 <sup>-2</sup>	0.0976*10 <sup>-6</sup>	49.75*10 <sup>-7</sup>	9.18	0.0196	0.181*10 <sup>-3</sup>
400	13287	0.1365	0.1171*10 <sup>-2</sup>	0.0882*10 <sup>-6</sup>	54.05*10 <sup>-7</sup>	9.80	0.0163	0.181*10 <sup>-3</sup>
450	13167	0.1357	0.1075*10 <sup>-2</sup>	0.0816*10 <sup>-6</sup>	58.1*10 <sup>-7</sup>	10.40	0.0140	0.181*10 <sup>-3</sup>
500	13048	0.1353	0.1007*10 <sup>-2</sup>	0.0771*10 <sup>-6</sup>	61.9*10 <sup>-7</sup>	10.95	0.0125	0.181*10 <sup>-3</sup>
550	12929	0.1352	0.0953*10 <sup>-2</sup>	0.0737*10 <sup>-6</sup>	65.55*10 <sup>-7</sup>	11.45	0.0112	0.184*10 <sup>-3</sup>
600	12809	0.1355	0.0911*10 <sup>-2</sup>	0.0711*10 <sup>-6</sup>	68.8*10 <sup>-7</sup>	11.95	0.0103	0.187*10 <sup>-3</sup>