

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

การอบแห้งคือขบวนการที่ความร้อนจากอากาศถ่ายเทให้กับวัสดุที่มีความชื้น และภายในวัสดุจะเกิดขบวนการถ่ายเทความร้อนและ ถ่ายเทมวลจากวัสดุสู่อากาศพร้อมกันทำให้ความชื้นภายในวัสดุลดลง ในขณะที่อากาศร้อนถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและขณะเดียวกันก็จะพาความชื้นออกจากวัสดุด้วยขบวนการอบแห้ง 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนอัตราการอบแห้งคงที่ และอัตราการอบแห้งลดลง ขณะอบแห้งเมื่ออบแห้งไประยะหนึ่งอัตราการอบแห้งลดลงถึงความชื้นค่าหนึ่ง เรียกค่าความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤติ ถ้าค่าความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤติ ในการอบแห้งนั้นจะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ผิวของวัสดุจะมีน้ำมาเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดย ความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงอิทธิพลของสภาวะอากาศภายนอกจะลดลงด้วย อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของน้ำภายในวัสดุมาที่ผิวเท่านั้น

2.1.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นคำบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis), M_w

$$M_w = \frac{W - d}{W} \quad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis), M_d

$$M_d = \frac{W - d}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ	W	คือ มวลของวัสดุ, kg
	d	คือ มวลของวัสดุแห้ง, kg
	M_w	คือ ความชื้น มาตรฐานเปียก, เศษส่วน
	M_d	คือ ความชื้น มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

ปริมาณความชื้นสามารถทำให้เป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดยคูณด้วย 100 ดังนั้นความชื้นมาตรฐานเปียกจะมีค่าได้ไม่เกิน 100 เปอร์เซนต์แต่ในขณะเดียวกันในหน่วยมาตรฐานแห้งอาจจะมีค่ามากกว่า 100 เปอร์เซนต์ได้ ในทางการเกษตรนิยมใช้เป็นมาตรฐานเปียกในการพูดถึงความชื้น แต่ในการคำนวณบางครั้งนิยมใช้เป็นมาตรฐานแห้ง ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานเปียกและมาตรฐานแห้งได้เขียนได้ดังนี้

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.3)$$

หรือ

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \quad (2.4)$$

ในการอบแห้งจำเป็นต้องทราบปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากไม้ เมื่อทราบมวลและความชื้นของไม้ และปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_f = W_i \frac{(100 - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (2.5)$$

เมื่อ	W_f	คือ น้ำหนักหลังการอบแห้ง, kg
	W_i	คือ น้ำหนักก่อนอบแห้ง, kg
	M_i	คือ ความชื้นก่อนอบแห้ง, % wb
	M_f	คือ ความชื้นหลังอบแห้ง % wb

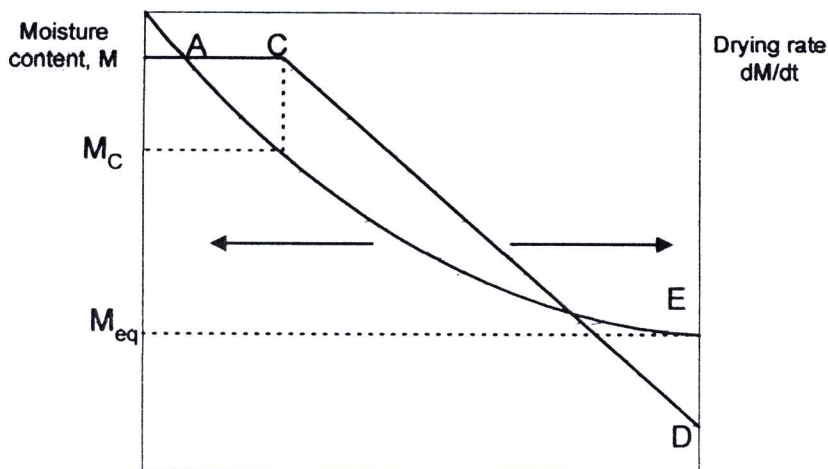
2.1.2 กระบวนการอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความพูน เมื่อทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ที่สภาวะอากาศคงที่ อัตราการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่



(Constant rate period) คือช่วง AC และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) คือช่วง CD ดังแสดงในรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 จุด C คือจุดความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) เป็นจุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งจุดความชื้นวิกฤตนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ สำหรับช่วง AC เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่ระยะนี้ความชื้นในวัสดุจะสูงกว่าจุดความชื้นวิกฤต ที่ผิวของจะอยู่ในสภาพอิ่มตัว การกระจายความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าสม่ำเสมอ ความชื้นจะถูกพาออกไปโดยอากาศ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของผลิตภัณฑ์เท่านั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำเช่นเมล็ดพืชจะไม่ปรากฏช่วงนี้



รูปที่ 2.1 การลดลงของความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และการอบแห้งลดลง

ที่มา : สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540

จุด E คือจุดปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุ ความชื้นของวัสดุมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความดันไอน้ำจากวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำในบรรยากาศ ที่อยู่รอบวัสดุนั้น โดยที่ค่าความชื้นนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศช่วง CD เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ระยะนี้ปริมาณความชื้นในวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤต น้ำภายในท่อเล็กๆ ภายในผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่มายังผิวของผลิตภัณฑ์ในลักษณะของเหลว หรือไอน้ำได้ช้ากว่าการระเหยน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์

2.1.3 อากาศในบรรยากาศ

การอบแห้งโดยทั่วไปจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการช่วยในการความชื้นออกจากผิวของวัสดุ ซึ่งในอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่ 14 ก.ย. 2554
 เลขทะเบียน.....242441
 เลขเรียกหนังสือ.....

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบก๊าซในอากาศ

ชนิด	สัดส่วน (%) โดยปริมาตร)	สัดส่วนโดยน้ำหนัก
ไนโตรเจน	78.09	75.53
ออกซิเจน	20.95	23.14
อาร์กอน	0.93	1.28
คาร์บอนไดออกไซด์	0.03	0.05

ที่มา: สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540

องค์ประกอบของก๊าซจะเปลี่ยนไปเมื่อความดันและอุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซดังกล่าวนี้ต้องอยู่ในสภาวะมาตรฐาน และจะเรียกอากาศนี้ว่าอากาศแห้ง แต่ในความเป็นจริงในอากาศนั้นยังมีไอน้ำปนอยู่ด้วยจะเรียกอากาศที่มีไอน้ำปนอยู่ด้วยนี้ว่าอากาศชื้น

2.1.4 คุณสมบัติอากาศชื้น

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการนำอากาศมาอบแห้งได้ทางหนึ่ง และมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของอากาศชื้นและคำศัพท์เฉพาะดังนี้

ความดันไอ (P_v) คือส่วนของความดันย่อยที่กระทำต่อโมเลกุลไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะเรียกความดันไอนี้ว่าความดันไออิ่มตัว (P_{vs})

ความชื้นสัมพัทธ์, RH (เศษส่วน) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.6)$$

เมื่อ P_{vs} สามารถคำนวณได้จากสมการของ Chambell (1977) ดังนี้

$$P_{vs} = \exp \left[52.576 - \frac{6796.5}{T_{abs}} - 5.0281 \ln(T_{abs}) \right] \quad (2.7)$$

สำหรับค่า P_v สามารถคำนวณได้เมื่อทราบ อัตราส่วนความชื้น W และความดันอากาศ P ดังนี้

$$P_v = \frac{1.608WP}{1 + 1.608W} \quad (2.8)$$

เมื่อ	T_{abs}	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K
	P	คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล 15°C (101.325 kPa)
	W	คือ อัตราส่วนความชื้น, kg- water/kg-dry air
	P_v	คือ ความดันย่อย, kPa
	P_{vs}	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว, kPa
	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, เศษส่วน

เอนธัลปี, h (kJ/kg) หมายถึงปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง ค่าเอนธัลปีอากาศชื้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h = 1.0048T_{db} + W(2501.64 + 1.88T_{db}) \quad (2.9)$$

เมื่อ T_{db} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

ปริมาตรจำเพาะ, v (m³/kg) หมายถึงปริมาตรอากาศต่อหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง ค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$v = (0.00283 + 0.00456W)(T_{abs}) \quad (2.10)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรจำเพาะ, m³/kg

อัตราส่วนความชื้น, W (kg water /kg dry air) หมายถึงปริมาณของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศหนึ่งหน่วยมวล ค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (2.11)$$

หรือ

$$W = 0.622 \frac{(RH)(P_{vs})}{P - (RH)(P_{vs})} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.2 ความดันไอน้ำอิ่มตัว ในช่วง 0-85°C

Temperature (°C)	Pvs (kPa)	Temperature (°F)	Pvs (psi)
0	0.611	32	0.088
5	0.872	41	0.127
10	1.228	50	0.178
15	1.705	59	0.247
20	2.339	68	0.339
25	3.169	77	0.459
30	4.246	86	0.615
35	5.628	95	0.835
40	7.384	104	1.070
45	9.593	113	1.390
50	12.35	122	1.789
55	15.76	131	2.280
60	19.94	140	2.889
65	25.03	149	3.620
70	31.19	158	4.519
75	38.58	167	5.590
80	47.39	176	6.868
85	57.83	185	8.385

ที่มา: สมชาติ ไสภวรรณฤทธิ์, 2540

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, $T_{db}(^{\circ}C)$ หมายถึงอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป โดยปกติเมื่อกล่าวถึงอุณหภูมิจะหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $T_{wp}(^{\circ}C)$ หมายถึงอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 100 % โดยการหุ้มกระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์ด้วยผ้าหรือสำลีเปียก และมีความเร็วลมผ่านไม่น้อยกว่า 4.6 m/s อากาศขณะนั้นจะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, $T_{cp}(^{\circ}C)$ หมายถึงอุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำเมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นลง ถ้าอุณหภูมิจุดน้ำค้างสามารถคำนวณได้จาก

$$T_{dp} = 6.983 + 14.38 + 1.079(\ln(P_v))^2 \quad (2.13)$$

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 50^\circ\text{C}$$

$$T_{dp} = 13.8 + 9.478 \ln(P_v) + 1.991(\ln(P_v))^2 \quad (2.14)$$

$$50^\circ\text{C} \leq T \leq 110^\circ\text{C}$$

เมื่อ T_{dp} คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °C
 P_v คือ ความดันไอ, kPa

ในการจะหาค่าคุณสมบัติของอากาศชั้นใด ๆ จำเป็นต้องรู้ค่าคุณสมบัติอากาศชั้นอย่างน้อย 2 ค่าจึงจะสามารถหาคุณสมบัติค่าอื่น ๆ ได้ ซึ่งจะเริ่มจากสมการใดก่อนหลังอยู่ที่ว่ารู้คุณสมบัติข้อใด ซึ่งที่มาของสมการต่างๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก สมชาติ (2540) หรือ Bala (1997)

2.1.5 แผนภูมิอากาศชื้น

ในทางปฏิบัติการหาค่าคุณสมบัติอากาศชื้นจากการคำนวณด้วยสมการ อาจไม่มีความสะดวก ในการอบแห้งถ้าไม่ต้องการข้อมูลที่ละเอียดมากนักสามารถอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นได้จากแผนภูมิอากาศ ซึ่งรูปแผนภูมิอากาศชื้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

จากแผนภูมิอากาศชื้นสามารถอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในการอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอากาศชื้นเริ่มต้น 2 ค่าด้วยกัน จากจุดใด ๆ บนแผนภูมิอากาศชื้นสามารถอ่านค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง : ลากเส้นตั้งฉากกับแกนราบ อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งจากแกนราบ

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง: ลากเส้นขนานกับแกนราบไปตัดเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% แล้วลากลงตั้งฉากกับแกนราบอ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างจากแกนราบ

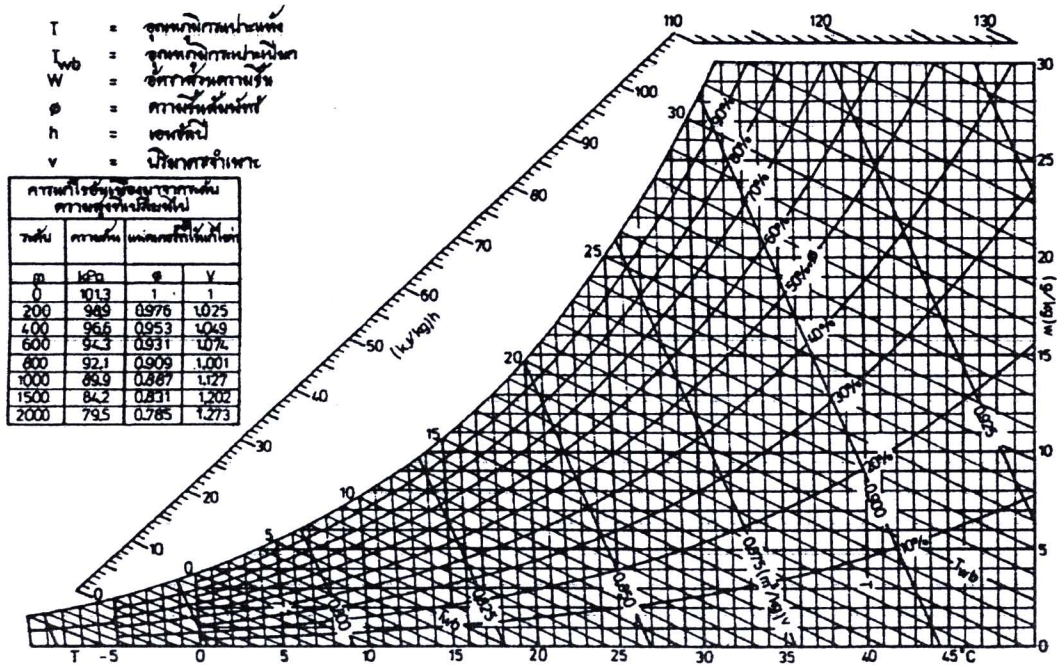
อุณหภูมิกระเปาะเปียก: ลากเส้นขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก ไปตัดเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 % แล้วลากลงตั้งฉากกับแกนราบอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากแกนราบ

เอนทัลปี: ลากเส้นขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกไปตัดเส้นเอนทัลปี

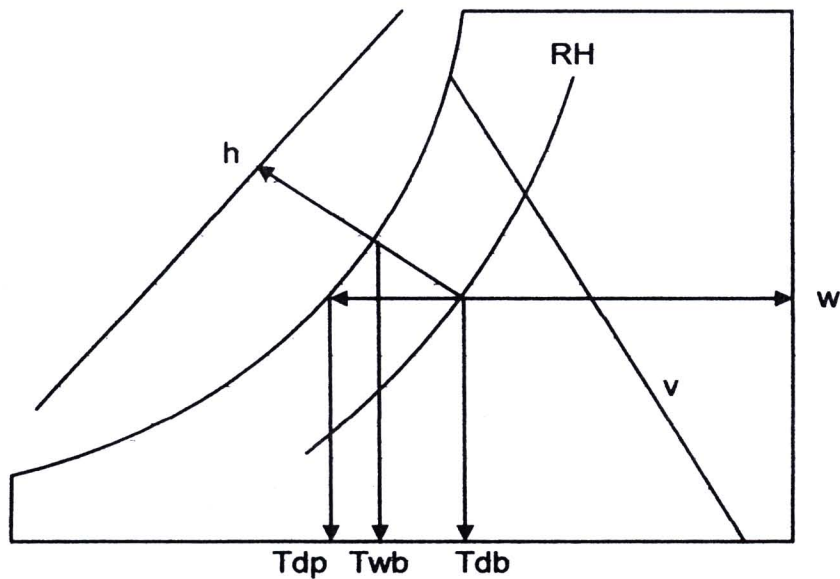
อัตราส่วนความชื้น: ลากเส้นขนานกับแกนราบไปตัดเส้นอัตราส่วนความชื้น

ปริมาตรจำเพาะ: ลากเส้นขนานกับเส้นปริมาตรจำเพาะผ่านจุดที่กำหนด อ่านค่าปริมาตรจำเพาะจากตำแหน่งระหว่างเส้นปริมาตรจำเพาะ 2 เส้น

ความชื้นสัมพัทธ์: ลากเส้นขนานกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ผ่านจุดที่กำหนดอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์จากตำแหน่ง ระหว่างเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 2 เส้น



รูปที่ 2.2 แผนภูมิอากาศชื้นช่วง 0-50 °C (สมชาติ, 2540)



รูปที่ 2.3 การอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (สมชาติ, 2540)

2.2 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

2.2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นวัสดุที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต พลังงานชีวมวลที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ฟืน ถ่านไม้ ชานอ้อย แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่าง ๆ การนำพลังงานชีวมวลมาใช้นั้นมีทั้งการนำมาใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้า และการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งแยกประเภทได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกได้เป็น ไม้เนื้ออ่อน และ ไม้เนื้อแข็ง
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล ได้แก่ ชานอ้อย กากสับปะรด เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีค่าความร้อนสูงมาก
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและค่าความร้อน ซึ่งค่าความร้อนของชีวมวลบางอย่างแสดงในตารางที่ 4 ในการนำเชื้อเพลิง ชีวมวลไปใช้ในรูปความร้อนนั้นจะมีการเปลี่ยนรูปอยู่ 3 วิธี ได้แก่

Hydrolysis	หมายถึงการเผาเชื้อเพลิงในที่อับอากาศออกซิเจน (absence of oxygen) ได้ Charcoal + condensable gases + non-condensable gas
Gasification	หมายถึงการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนที่พอดี (limited of oxygen) ได้ Combustibles gases + ash
Combustion	หมายถึงการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนเกินพอดี (excess of oxygen) ได้ Incombustibles gases + ash

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภท

ชนิดของชีวมวล	ค่าความร้อน (kCal/kg)	ความชื้น	ที่มา
ชานอ้อย	1,800 - 1,850	(48-51%)	http://www.tei.or.th/
ขยะ	(~3,107-4,302)	(~ 5-10%)	http://www.effe.or.th/
แกลบ	3,880	-	http://www.charcoal.snmcenter.com/
ขี้เลื่อย	2,800	-	http://www.agecoal.com/
ไม้ฟืน	4,475	-	http://www.charcoal.snmcenter.com/

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากที่สุด คือ ชีวแก๊ส และแกลบ ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งคู่มีค่าความร้อนที่สูง และมีปริมาณมาก ราคาถูก

2.2.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิง

การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วให้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากออกซิเดชัน อย่างรวดเร็วของสารประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง และจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปความร้อนและแสง การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงนั้นต้องมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ

การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete combustion) เป็นการสันดาประหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจนหมด คาร์บอนจะเผาไหม้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นน้ำ และถ้าในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ก็จะเผากลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ดังสมการ



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) เป็นการสันดาปที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด หรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการสันดาป มีผลให้ คาร์บอน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และ อาจมีเชื้อเพลิงที่เหลือปะปนออกมากับผลที่ได้จากการเผาไหม้ สาเหตุที่ทำให้การสันดาปไม่สมบูรณ์มีหลายประการ เช่น ออกซิเจนไม่เพียงพอกับปริมาณเชื้อเพลิง หรือเชื้อเพลิงกับออกซิเจนผสมกันไม่ดีพอ และอาจจะเกิดจากการที่สารที่ได้จากการเผาไหม้มีการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ดังสมการ



2.2.3 ปฏิกิริยาเคมีทางความร้อนของการเกิดก๊าซชีวมวล

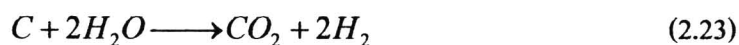
ในการเกิดก๊าซชีวมวลภายในเตาเผาเราสามารถแบ่งโซนการเกิดก๊าซตามปฏิกิริยาทางเคมีและความแตกต่างของอุณหภูมิได้เป็น 4 โซน ถึงแม้ว่าแต่ละโซนจะอยู่ติดกัน แต่ก็สามารถแยกโซนต่าง ๆ ออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์โดยอาศัย ปฏิกิริยาทางเคมีและความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนี้

Combustion zone หรือ Oxidation zone เป็นทางเข้าของอากาศ ซึ่งเป็นโซนที่อากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสกัน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



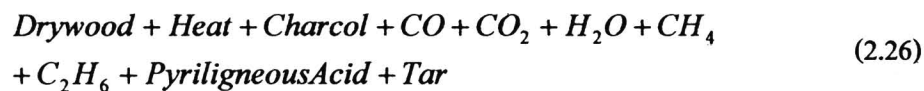
โดยที่ปฏิกิริยาทั้งคู่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนใน Reduction zone และ Pyrolysis zone อุณหภูมิในโซนนี้ประมาณ 1,100-1,500°C

Reduction zone ก๊าซร้อนจาก Combustion zone จะไหลเข้าสู่ Reduction zone ซึ่งมีปฏิกิริยาหลักคือ ปฏิกิริยา Reduction อุณหภูมิในบริเวณนี้ประมาณ 500-900°C ในโซนนี้ ก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้บางส่วนคือ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ให้กลายเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน

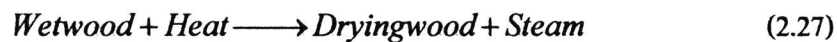


ปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ 2.21 และ 2.22 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 900°C ก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาทั้งคู่เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จะขึ้นกับปริมาณที่สามารถเปลี่ยนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กับความเร็วระหว่างก๊าซกับเชื้อเพลิงและผิวสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับก๊าซใน Reduction zone รวมถึงอุณหภูมิ เมื่อก๊าซอุณหภูมิสูงจาก Combustion zone ไหลสู่ Reduction zone อุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ 2.21 และ 2.22 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ 2.23 จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600°C ซึ่งปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ 2.23 เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซมีปริมาณสูงขึ้น ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซสูงขึ้น และต้องระวังปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ 2.24 เพราะหากมีไอน้ำมากจะทำให้ค่าความร้อนของก๊าซลดลง จึงต้องระวังเรื่องความชื้นของเชื้อเพลิง

Pyrolysis zone หรือ Distillation zone ในโซนนี้ได้รับความร้อนจาก Reduction zone เพื่อที่จะสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงทำให้ได้เมทานอล กรดน้ำส้ม และน้ำมันดิบ อุณหภูมิในโซนนี้ประมาณ 200-500°C ของแข็งที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่านจะไปทำปฏิกิริยาต่อไปใน Reduction zone และ Combustion zone ได้ดังนี้



Drying Zone โซนนี้อุณหภูมิจะต่ำ ไม่สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะได้รับความร้อนทำให้ระเหยออกมาในรูปไอน้ำ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200°C มีปฏิกิริยา คือ



2.2.4 ความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเตาที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ภายในท้องถิ่น โดยพิจารณาจากค่าความร้อนและปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ดังสมการที่ 2.28

$$Q_{\text{fuel}} = m_{\text{fuel}} \times \text{LHV} \quad (2.28)$$

เมื่อ	Q_{fuel}	คือ ความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง	kJ
	m_{fuel}	คือ ปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	kg
	LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	kJ/kg

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนและอุณหภูมิโดยทั่วไปมีความหมายต่างกัน ความร้อนเป็นพลังงานของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ของสสาร แต่อุณหภูมิเป็นหน่วยการวัดปริมาณการเคลื่อนที่ของแต่ละ โมเลกุลโดยรวมของสสารนั้น ๆ ซึ่งอุณหภูมิเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่อยู่ในสสารนั่นเอง พลังงานความร้อนของสสารหรือวัสดุจึงเกิดจากแต่ละ โมเลกุลภายในเคลื่อนที่หรือสั่น (Vibration)

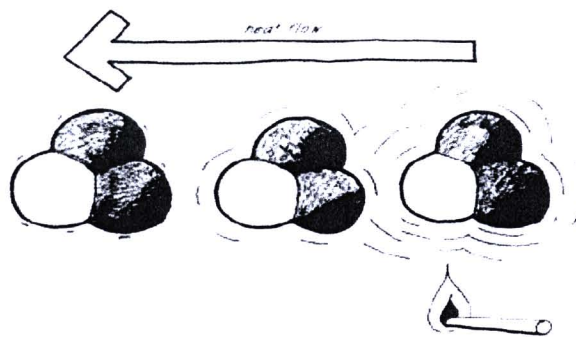
ค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute zero) เป็นค่าอุณหภูมิที่โมเลกุลของสสารทุกชนิดหยุดเคลื่อนไหว ได้แก่อุณหภูมิ -459.69°F, -273.15°C และ 0 K ยิ่งโมเลกุลมีการเคลื่อนไหวเร็วจะทำให้

สสารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการวัดมี 2 แบบ แบบแรกได้แก่การวัดอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส และองศาฟาเรนไฮต์ที่นิยมกันอยู่ทั่วไป แบบที่สองได้แก่การวัดพลังงานความร้อนมีหน่วยเป็น British thermal unit (Btu) หรือ Calorie Btu คือจำนวนปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ 1°F ของน้ำ 1 ปอนด์

ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านสสารที่ร้อนสู่สสารที่เย็นกว่าเสมอ ถ้าสสารใด ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้วก็จะไม่มีการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 ประเภทได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.3.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของพลังงานระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากบริเวณที่ร้อนกว่าหรือมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมากกว่า ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าหรือมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลช้ากว่า การถ่ายเทความร้อนจะเกิดในทุกทิศทาง และไม่ขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก วัสดุจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล วัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะนำความร้อนได้มาก วัสดุโลหะ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง เป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุด รองลงมาได้แก่คอนกรีตและอิฐ วัสดุธรรมชาติเช่น ไม้ จะมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า



รูปที่ 2.4 Heat transfer by conduction (Moore, Fuller, 1993)

อากาศหรือก๊าซชนิดต่าง ๆ จะเป็นตัวนำความร้อนที่แย่ที่สุด ทำให้อากาศเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนไม่สามารถผ่านไปยังที่ ๆ ไม่มีโมเลกุลเรียงตัวกัน อย่างสุญญากาศได้ ความสามารถในการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของวัสดุ ความหนาวัสดุ พื้นที่สัมผัสโดยตรงกับความร้อนและช่วงเวลาสัมผัสนั้น เป็นต้น ค่าที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนได้แก่

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity: k) หน่วย $W/m.K$ หรือ $Btu.in/(ft^2.h.^{\circ}F)$ คือค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสสารในความหนา ช่วงเวลา พื้นที่ และค่าความแตกต่างอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใช้ในการวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุ เช่น คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $12.0 Btu.in/(ft^2.h.^{\circ}F)$ หมายความว่าคอนกรีต 19 ตารางฟุต หนา 1 นิ้ว มีค่าความแตกต่างอุณหภูมิของสองด้านคอนกรีตเท่ากับ $1.0 Btu$ แล้ว จะมีการนำความร้อน $12.0 Btu$ ผ่านในวัสดุใน 1 ชั่วโมง

ความนำความร้อน (Conductance: C) หน่วย $W/m^2.K$ หรือ $Btu/(ft^2.h.^{\circ}F)$ คือค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสสารในความหนาที่กำหนดในช่วงเวลา 1 หน่วย โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 1 หน่วย ค่าความนำความร้อนนั้นคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแต่หน่วยของการวัดจะกำหนดตายตัว เช่น คอนกรีตหนา 3 นิ้ว มีค่าความนำความร้อนเท่ากับ $4.0 Btu/(ft^2.h.^{\circ}F)$ (ซึ่งมาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหารด้วยความหนา 3 นิ้ว) หมายความว่าถ้าคอนกรีตหนา 3 นิ้ว พื้นที่ 1 ตารางฟุตมีความแตกต่างของอุณหภูมิอุณหภูมิภายในและภายนอก $1.0 Btu$ แล้ว จะมีการนำความร้อน $4.0 Btu$ ผ่านวัสดุใน 1 ชั่วโมง

$$C = k / \text{ความหนาของวัสดุ} \quad (2.29)$$

ความต้านทานความร้อน (Resistance: R , R -Value) หน่วย $m^2.K/W$ หรือ $(ft^2.h.^{\circ}F)/Btu$ คือส่วนกลับของค่าความนำความร้อน เป็นค่าที่นิยมใช้ในการกำหนดค่าฉนวนกันความร้อนภายในอาคาร ค่า R -value ที่มากขึ้นยิ่งแสดงถึงค่าความเป็นฉนวนที่มีมาก

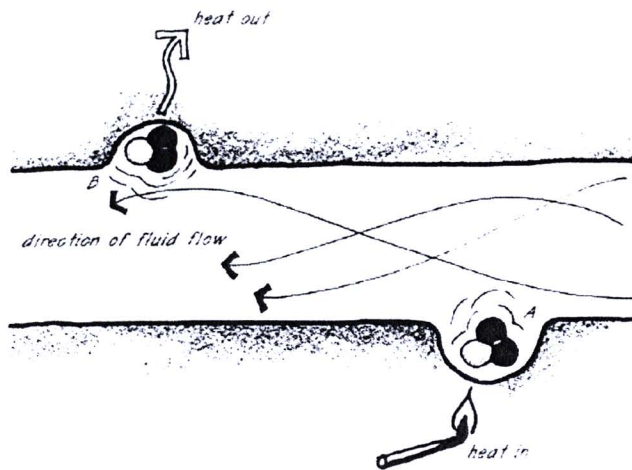
$$R = 1 / C \quad (2.30)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal transmittance: U) หน่วย $W/m^2.K$ หรือ $Btu/(ft^2.h.^{\circ}F)$ คือหน่วยการวัดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามาในอาคารในช่วงเวลาหนึ่งและพื้นที่หนึ่งเป็นส่วนกลับของค่า R

$$\begin{aligned} U &= 1/\sum R \\ &= 1/(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.3.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวกลาง เช่น อากาศและน้ำ เมื่อสสารถูกทำให้ร้อนโมเลกุลจะเคลื่อนไหวเร็วขึ้นและแตกกระจายออกไปในทิศทางต่าง ๆ ก่อให้เกิดการขยายตัวของสสารนั้น ๆ โดยของแข็งจะมีการเพิ่มปริมาตรขึ้น ของเหลวและก๊าซจะมีความหนาแน่นต่ำลงและลอยตัวขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงการพาความร้อนจากจุด A ไปยังจุด B (Moore, Fuller, 1993)

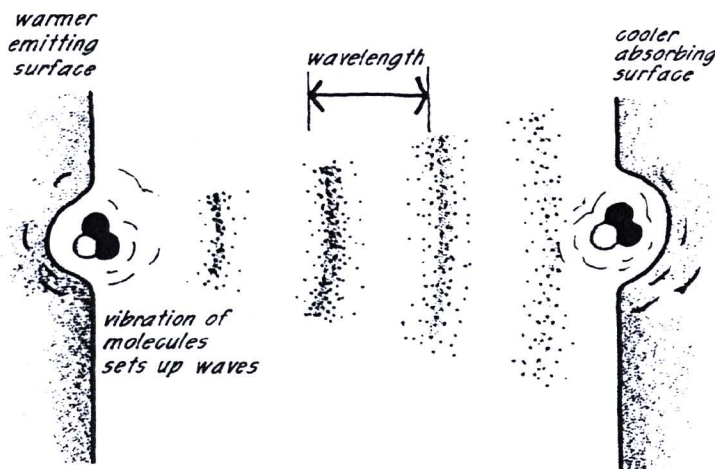
จากรูปการถ่ายเทความร้อนจากด้านร้อน A ไปยังด้านเย็น B มีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากภายนอกจนมากระทบที่จุด A ความร้อนนี้จะถ่ายเทไปที่อากาศและพาความร้อนผ่านอากาศไปยังจุด B ความแตกต่างของการนำความร้อนและการพาความร้อนคือความแตกต่างของการเคลื่อนที่โมเลกุล การนำความร้อนนั้น โมเลกุลจะไม่เปลี่ยนตำแหน่งแต่จะเคลื่อนย้ายพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลใกล้เคียง ส่วนการพาความร้อนพลังงานจะถูกถ่ายเทไปโดยโมเลกุลจะนำไปด้วยตัวเอง

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลของสสารเกิดการเคลื่อนไหวจะคายพลังงานคลื่นออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีความร้อนจึงเป็นการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งจะเคลื่อนที่จากวัตถุที่ร้อนกว่าไปสู่วัตถุที่เย็นกว่า เช่นเดียวกับการนำความร้อน แต่การแผ่รังสีความร้อนสามารถส่งความร้อนผ่านสุญญากาศได้

การเคลื่อนที่หรือการสั่นของโมเลกุลพื้นผิวของสสารจะก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนผ่านตัวกลางได้เร็วเท่ากับความเร็วแสง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะช้าลงเมื่อเปลี่ยนแปลงไปเป็นคลื่นรังสีความร้อน โดยเมื่อความร้อนเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง อากาศหรือ

สูญญากาศไปจนกระทบพื้นผิววัสดุอีกด้าน จะสะสมพลังงานในด้านนั้น ๆ และทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนไหวมากขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น และคายความร้อนออกมา การแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทุกทิศทาง และไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปที่ 2.6 Radiant energy transfer between two surface molecules. (Moore, Fuller , 1993)

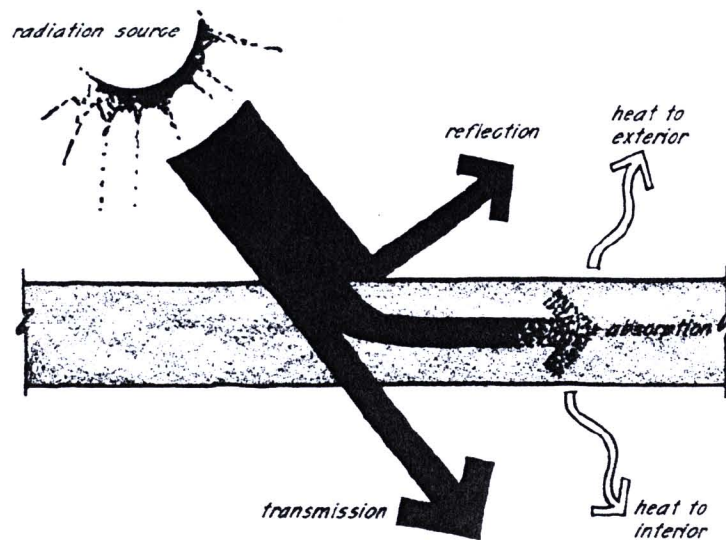
ความยาวคลื่น

อุณหภูมิโมเลกุลของพื้นผิววัสดุสามารถให้ความร้อนที่วัดได้เป็นค่าความยาวคลื่น (Wave length) หรือความถี่คลื่น (Frequency) ได้ โมเลกุลของพื้นผิวแต่ละชนิดจะมีการเคลื่อนไหวหรือการสั่นที่แตกต่างกัน และรังสีความร้อนออกมาในความเร็วที่คงที่ การเคลื่อนไหวดังกล่าวจะทำให้เกิดความถี่ของการแผ่รังสี โมเลกุลที่เคลื่อนที่เร็วที่สุดหรือร้อนที่สุดจะคายคลื่นรังสีสั้น ๆ ออกมา เช่น คลื่นรังสีจากดวงอาทิตย์จะเป็นคลื่นสั้น (ประมาณ $0.4 - 4.0 \text{ micron} = 10^{-6}$ เมตร) และ โมเลกุลที่เคลื่อนที่ช้า ๆ จะคายรังสีคลื่นยาว ซึ่งมีความยาวคลื่น 8-50 micron

เมื่อพลังงานการแผ่รังสีความร้อนกระทบพื้นผิว พื้นผิวนั้นจะสามารถดูดซับ (Absorption: α) ความร้อน และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้พื้นผิววัสดุอุ่นขึ้น และสามารถสะท้อนความร้อน (Reflection: β) นั้นกลับไปได้ ถ้าวัสดุมีคุณสมบัติที่ความร้อนสามารถผ่านไปได้ ความร้อนจะทะลุผ่าน (Transmission: τ) ชั้นวัสดุออกไป ค่าการดูดซับความร้อน การสะท้อนความร้อนและการทะลุผ่านของความร้อนนั้นไม่มีหน่วย และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 ค่าของคุณสมบัติ 3 ส่วนรวมกัน จะได้เท่ากับ 1

$$\alpha + \beta + \tau = 1 \quad (2.32)$$

โดยที่	α	=	ค่าการดูดซับความร้อนของวัสดุ
	β	=	ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุ
	τ	=	ค่าการทะลุผ่านของความร้อนของวัสดุ



รูปที่ 2.7 Absorption, reflection, and transmission of radiation striking a semitransparent material. (Moore, Fuller, 1993)

การคายความร้อน (Emissivity: ϵ)

ค่าการคายความร้อนเป็นหน่วยการวัดความสามารถของผิววัสดุที่จะคายรังสีความร้อนออกมาในอุณหภูมิที่กำหนด ค่าการคายความร้อนสามารถวัดได้เป็น 0.0 ในกรณีที่วัสดุไม่มีการคายความร้อนไปจนถึง 1.0 ซึ่งเป็นการคายความร้อนที่สูงที่สุดเทียบได้กับวัสดุจำลอง Black body ในอุณหภูมิต่าง ๆ กันจะพบว่าค่าการคายความร้อนจะเท่ากับค่าการดูดซับความร้อน (Kirchhoff's law)

$$\epsilon = \alpha \text{ (Black body)} \quad (2.33)$$

โดยที่	α	=	ค่าการดูดซับความร้อนของวัสดุ
	ϵ	=	ค่าการคายความร้อนของวัสดุ

วัสดุที่ผิวไม่มันหรือไม่เป็นโลหะ (Non metallic) จะมีความสามารถคายความร้อนได้มากกว่าวัสดุโลหะ วัสดุสีเข้มจะมีการดูดซับความร้อนที่ดีและมีอุณหภูมิสูงได้อย่างรวดเร็ว

ในขณะที่วัสดุอ่อนจะสะท้อน ความร้อนได้ดีและมีอุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุเข้ม สำหรับวัสดุธรรมชาติจะเก็บความร้อน ในขณะที่วัสดุที่มีผิวมันจะไม่เก็บความร้อนและมีอุณหภูมิต่ำลงได้เร็ว

2.4 หลักการเบื้องต้นสำหรับการพาความร้อน (สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, 2550)

2.4.1 บทนำหลักการเบื้องต้นสำหรับการพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นจากการที่มีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างของไหล (Fluid) ซึ่งอาจจะเป็นของเหลว (Liquid) หรือก๊าซ (Gas) ก็ได้ ดังนั้นหลักการเบื้องต้นสำหรับการพาความร้อนจึงต้องอาศัยความรู้จากวิทยาศาสตร์ของไหลมาก่อน แล้วจึงจะนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์ในเชิงลึกแบบต่าง ๆ โดยการศึกษาทั้งหมดมุ่งเน้นไปเพื่อทำการวิเคราะห์หาลักษณะการไหลแบบต่าง ๆ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนสามารถจำแนกตามลักษณะกลไกการเกิดการไหล (Flow Pattern) ได้เป็น 2 แบบใหญ่ด้วยกันคือ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)
- การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

2.4.2 การจัดประเภทของการไหล (Classification of Fluid Flow)

ของไหล (Fluid) สามารถจำแนกออกได้หลายรูปแบบตามความเหมาะสมในการพิจารณาเพื่อการศึกษาได้ดังนี้

- ของไหลแบบอัดตัวได้และอัดตัวไม่ได้ (Compressible and Incompressible Fluid)
ของไหลที่อัดตัวได้คือของไหลที่มีค่าความหนาแน่นไม่คงที่ เช่นอากาศ ซึ่งการควบคุมการไหลของอากาศนิยมใช้พัดลม (Fan) ส่วนของไหลที่อัดตัวไม่ได้คือของไหลที่มีค่าความหนาแน่นคงที่ เช่นน้ำ ซึ่งการควบคุมการไหลของน้ำนิยมใช้ เครื่องสูบ (Pump)

- ของไหลที่มีความหนืดและของไหลที่ไม่มีความหนืด (Viscous and Inviscid Fluid)
ของไหลที่มีความหนืดจะนำค่าความหนืดของของไหลมาวิเคราะห์ด้วย โดยปกติของไหลจริงทุกชนิดจะมีความหนืด แต่ในบางครั้งเราอาจสมมุติให้ค่าความหนืดมีผลน้อยมากสำหรับของไหลที่อัดตัวได้ เช่นอากาศ ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น

- ของไหลในสภาวะคงที่และไม่คงที่ (Steady State and Unsteady State Fluid) ของไหลในสภาวะคงที่จะ ไม่คิดผลเวลา ส่วนของไหลในสภาวะไม่คงที่จะคิดผลของเวลาในการไหล

- ของไหลที่มีการไหลแบบบังคับและของไหลที่มีการไหลแบบอิสระ (Force and Free Fluid) ของไหลที่มีการไหลแบบบังคับก็คือนำการควบคุมด้วย พัดลมหรือเครื่องสูบลม (Fan and Pump) ส่วนของไหลแบบอิสระก็เกิดจากการเคลื่อนที่เองตามธรรมชาติด้วยผลของแรงลมหรือความแตกต่างอุณหภูมิ (Wind and Stack Effect)

- การไหลภายนอกและภายใน (External and Internal Fluid Flow) การไหลภายนอกเป็นการไหลผ่านผิววัตถุบนขอบเขตที่กำหนด (Boundary Control) ส่วนการไหลภายในเป็นการไหลภายในวัตถุโดยมีผิวของวัตถุเป็นขอบเขต (Volume Control)

- การไหลแบบ 1 มิติ 2 มิติและ 3 มิติ (One Two and Three Dimensional Fluid) ลักษณะการวิเคราะห์มิติขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปัญหา ซึ่งการวิเคราะห์แบบหลายมิติก็จะทำให้ปัญหาลดซับซ้อนตามไปด้วย นอกจากนี้การวิเคราะห์มิติยังสามารถพิจารณาตามระบบพิกัดแกนได้อีก 3 แบบ คือพิกัดฉาก (Rectangular or Cartesian Coordinate) พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) และพิกัดวงกลม (Spherical Coordinate)

- ของไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน (Laminar and turbulent Fluid) ของไหลแบบราบเรียบมีลักษณะการไหลเป็นเส้นตรงที่ไม่ซับซ้อน ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อน โดยลักษณะการไหลทั้งสองสามารถใช้ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์เป็นตัวพิจารณา

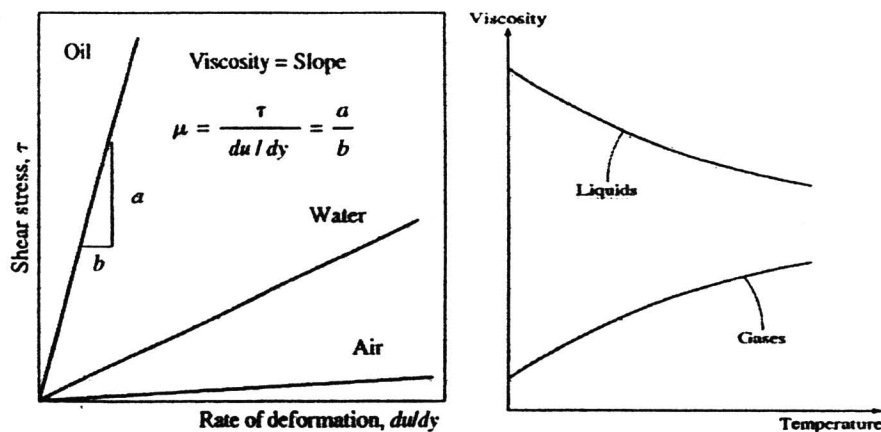
2.4.3 ตัวแปรสำคัญในการไหลเชิงความเร็วและความร้อน

- ความหนืด (Viscous) ของไหลที่มีความหนืดจะนำค่าความหนืดของของไหลมาวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการที่ 2.34

$$\tau_s = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.34)$$

เมื่อ τ_s คือค่าความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น N/m^2

μ คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Dynamic Viscosity) มีหน่วยเป็น $N.s/m^2$ or $Pa.s$



รูปที่ 2.8 ค่าความหนืดของของไหล (Yunus A. Cengel, 2007)

หมายเหตุ : สำหรับในระบบหน่วยเมตริก นิยมใช้เป็น Poise และ Stoke ตามลำดับ โดยจะพบว่า $1 \text{ Poise} = 1 \text{ Pa.s}$ และ $1 \text{ Stoke} = 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์จากความหนืดทั้งสองได้จาก

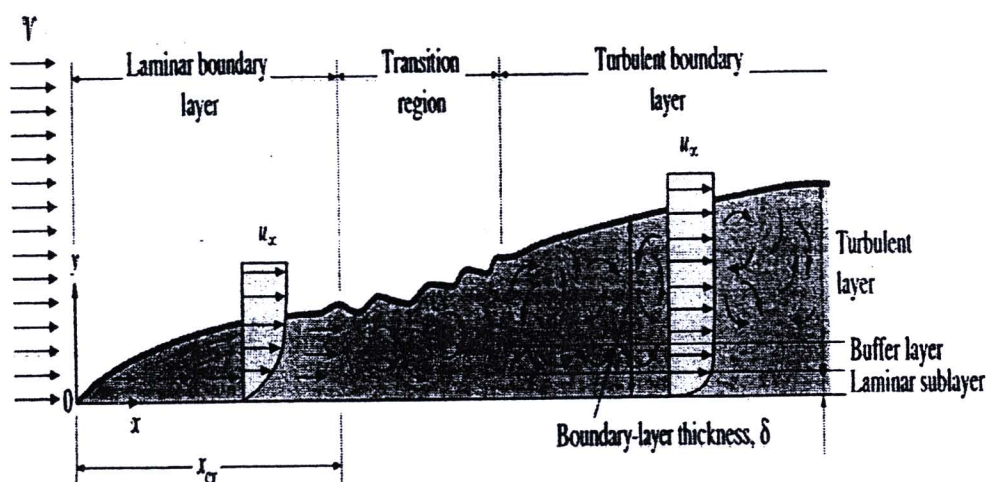
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.35)$$

เมื่อ ν คือค่าความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็น m^2/s

ρ คือค่าความหนาแน่นของของไหล (Density) มีหน่วยเป็น kg/m^3

- การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่น (Laminar and Turbulent)

พิจารณารูปที่ 2.9 ซึ่งมีรูปแบบการไหลประกอบด้วย 3 ช่วงคือช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Boundary Layer) ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition Region) และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Boundary Layer) เมื่อของไหลผ่านระยะวิกฤต (X_c) ซึ่งจะมีเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์วิกฤต จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วนยังประกอบด้วยชั้นความหนาแบบราบเรียบในส่วนล่างที่ใกล้ชั้นฉนวนผิวที่เรียกว่า ชั้นย่อยแบบราบเรียบ (Laminar Sublayer) จากนั้นในชั้นที่สูงขึ้นไปจะค่อย ๆ กลายเป็นสภาพเป็นการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งก็คือช่วง Buffer layer และ Turbulent layer ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 การพิจารณาการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Yunus A. Cengel, 2007)

การคำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤต ให้พิจารณาสมการที่ 2.36

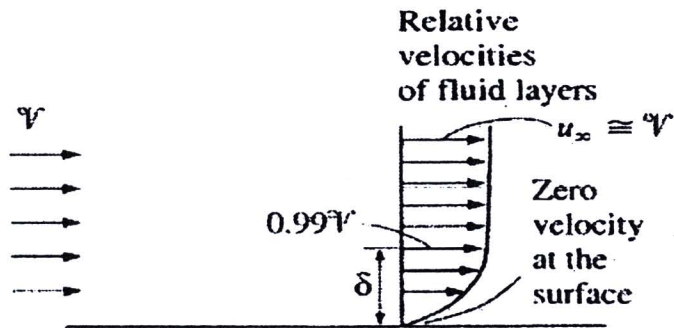
$$Re_x = \frac{\rho vx}{\mu} = \frac{vx}{\nu} \quad (2.36)$$

เมื่อ Re คือค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เป็นค่าไม่มีหน่วย

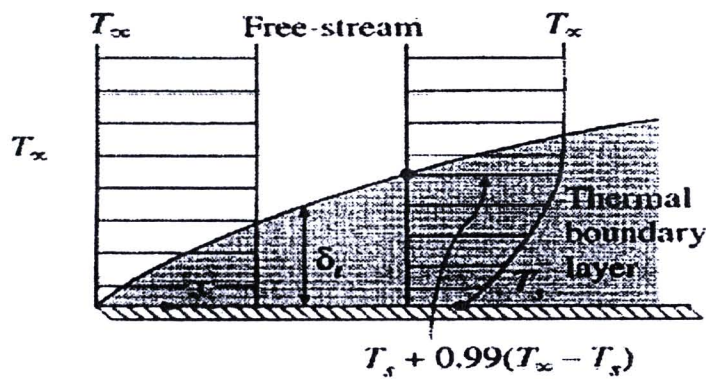
V คือค่าความเร็วของของไหล (Velocity) มีหน่วยเป็น m/s

x คือค่าระยะทางที่พิจารณา (Length) มีหน่วยเป็น m

- **ชั้นความหนาของความเร็วและความร้อน (Velocity and Thermal Boundary Layer Thickness)** ในการพิจารณาชั้นความหนา (Thickness) จะประกอบไปด้วยในส่วนของชั้นความเร็ว δ ซึ่งใช้วิเคราะห์การถ่ายเทมวลและโมเมนต์ดัมพชัน และส่วนชั้นความร้อน δ_t ซึ่งใช้วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 Velocity Boundary Layer Thickness (Yunus A. Cengel, 2007)



รูปที่ 2.11 Thermal Boundary Layer Thickness (Yunus A. Cengel, 2007)

ในการพิจารณาค่าชั้นความหนาความหนาความเร็วและความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.37 และสมการที่ 2.38 ตามลำดับ

$$\delta = \frac{5.0x}{\sqrt{Re}} \quad (2.37)$$

$$\delta_t = \frac{\delta}{Pr^{1/3}} = \frac{5.0x}{Pr^{1/3}\sqrt{Re}} \quad (2.38)$$

เมื่อ Pr คือค่าพรีนัมเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอยู่กับของไหล

- แรงดูดและแรงยก (Drag and Lift Force) แรงดูด หมายถึง แรงที่กระทำตามทิศทางความเร็วเพื่อเกิดการเคลื่อนที่ ส่วนแรงยกหมายถึงแรงที่กระทำตั้งฉากกับความเร็วเพื่อให้เกิดการลอยตัวขึ้น จากสมการที่ 2.34 เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้เป็น

$$\tau_s = C_D \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.39)$$

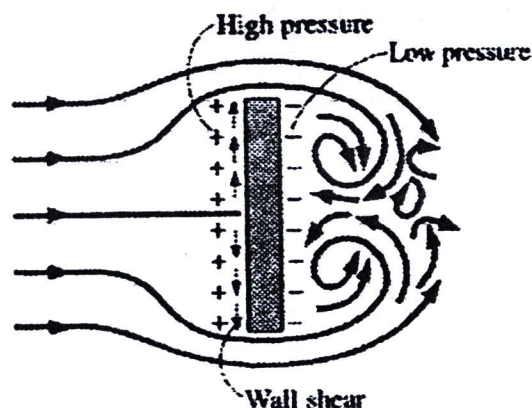
เมื่อ C_D คือค่าสัมประสิทธิ์การดูด (Drag Coefficient) เป็นค่าไม่มีหน่วย นอกจากนี้ยังสามารถหาแรงดูดที่กระทำกับวัตถุได้จาก $\tau = F/A$ ได้เป็น

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2}{2} A \quad (2.40)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวเสมือนด้านหน้า (Frontal Area) มีหน่วยเป็นตารางเมตร เช่นถ้ามีทรงกระบอกวางนอน พื้นที่จะเป็น $A=DL$ (ถ้าไม่ใช่ $A=\pi DL$ หรือ $A=\pi DL/2$)

พิจารณารูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นแผ่นเรียบวางตั้งขวางทิศทางการไหลจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดจะประกอบด้วยผลจาก 2 ส่วนคือผลจากแรงเสียดทาน (Skin Friction Drag, C_F) และผลจากความดัน (Pressure Drag, C_P) ถ้าเราจะลองหมุนแผ่นเรียบไป 90 องศาให้วางตามทิศทางการไหลจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดจะเหลือเพียงผลจากแรงเสียดทาน ส่วนผลจากความดันจะไม่มีเนื่องจากด้านบนและด้านล่างความดันเท่ากัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดสามารถแสดงเป็นสมการผลรวมได้คือ

$$C_D = C_F + C_P \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.12 ผลของค่าสัมประสิทธิ์การดูด (Yunus A. Cengel, 2007)

2.4.4 กลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameter)

- ค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia Force) และแรงหนืด (Viscous Force) ดังแสดงในสมการที่ 2.42

$$Re = \frac{vx}{\nu} \quad (2.42)$$

เมื่อ Re คือค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

v คือค่าความเร็วของของไหล (Velocity) มีหน่วยเป็น m/s

x คือค่าระยะทางที่พิจารณา มีหน่วยเป็น m

ν คือค่าความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็น m^2/s

- ค่าไนสเซลท์จำนวนเบอร์ (Nusselt Number) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนต่อการนำความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.43

$$Nu = \frac{hx}{k} \quad (2.43)$$

เมื่อ Nu คือค่าไนสเซลท์จำนวนเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

h คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot ^\circ C$

k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m \cdot ^\circ C$

- ค่าพรันด์เทิลจำนวนเบอร์ (Prandtl Number) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทโมเมนตัมต่อการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.44

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.44)$$

เมื่อ Pr คือค่าพรันด์เทิลจำนวนเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

α คือค่าการแพร่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) มีหน่วยเป็น m^2/s

- ค่ากราชอฟจำนวนเบอร์ (Grashof Number) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัว (Bouyancy Force) และแรงหนืด (Viscous Force) ดังแสดงในสมการที่ 2.45

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.45)$$

เมื่อ Gr คือค่ากราสฮอฟฟ์นัมเบอร์เป็นค่าไม่มีหน่วย

g คือความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

β คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหล มีหน่วยเป็น $1/\text{K}$

ΔT คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น K

L คือมิติเชิงเส้น (Length) มีหน่วยเป็น m

ν คือค่าความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็น m^2/s

- ค่าสแตนต์นัมเบอร์ (Stanton Number) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและความร้อนที่ถ่ายเทโดยการไหลของของไหล ดังแสดงในสมการที่ 2.46

$$S_t = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho C_p u} \quad (2.46)$$

เมื่อ S_t คือค่าสแตนต์นัมเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

- ค่าเพคเลตนัมเบอร์ (Peclet Number) เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์กับค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.47

$$P_e = RePr = \frac{\rho v L C_p}{k} \quad (2.47)$$

เมื่อ Pe คือค่าเพคเลตนัมเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

- ค่าราเลย์นัมเบอร์ (Rayleigh Number) เป็นค่าผลคูณระหว่างค่ากราสฮอฟฟ์นัมเบอร์กับค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.48

$$Ra = GrPr = \frac{g \beta \Delta T C_p \rho^2 L^3}{k \mu} \quad (2.48)$$

เมื่อ Ra คือค่าราเลย์นัมเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย

- ค่าเกรซนัมเบอร์ (Graetz Number) เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าเพคเลตนัมเบอร์กับค่า d/L ดังแสดงในสมการที่ 2.49

$$Gz = Pe \frac{d}{L} = \frac{\rho v d^2 C_p}{k L} \quad (2.49)$$

เมื่อ Gz คือค่าเกรซนัมเบอร์ เป็นค่าไม่มีหน่วย