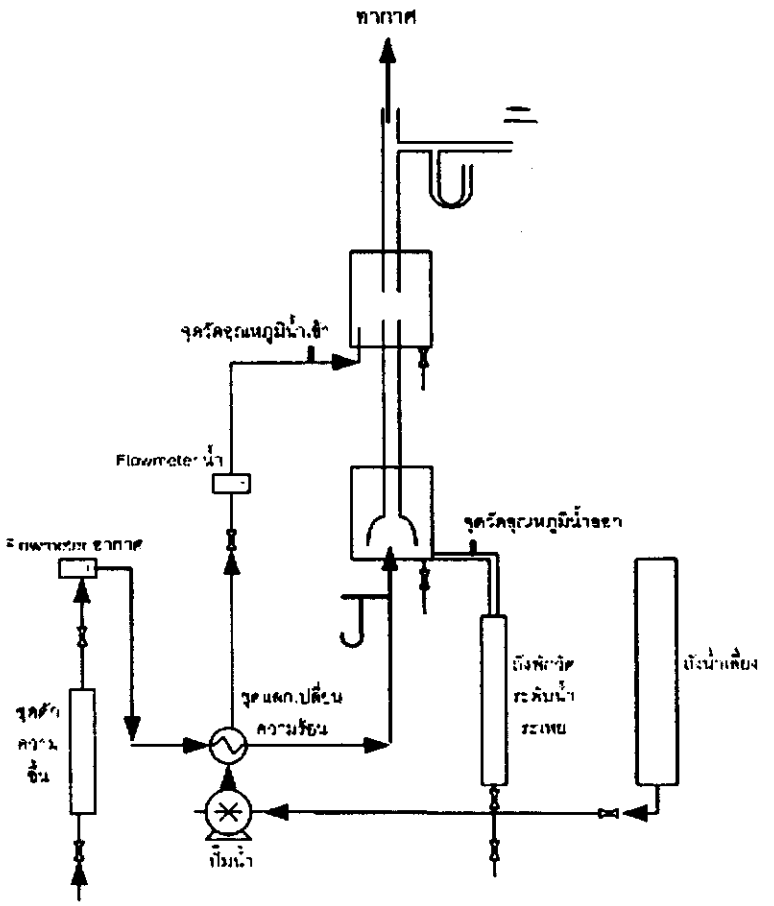
1. บทนำ

Wetted-wall column (รูปที่ 1-1) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษากระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊ส มีลักษณะเป็นคอลัมน์ซึ่งวางอยู่ในแนวดิ่ง ของเหลวไหลจากตอนบนลงมายังตอนล่างของคอลัมน์ตามผนังด้านใน ส่วนแก๊สอาจจะไหลในแนวเดียวกับของเหลว หรือไหลสวนทางขึ้นไปจากตอนล่างขึ้นไปยังตอนบนของคอลัมน์ก็ได้ ทิศทางการถ่ายเทมวลของสาร มีทั้งจากของเหลวไปยังแก๊ส และจากแก๊สไปยังของเหลว โดยที่ของเหลวไหลตามผนังด้านในของคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหลไม่สูงนัก ทำให้ความหนาของฟิล์มของเหลวมีค่าน้อยมาก จึงสามารถประมาณได้ว่า พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนมวล คือพื้นที่ผิวด้านในของคอลัมน์นี้



รูปที่ 1-1 แผนภาพแสดงการไหลของวัฏภาคของเหลวและแก๊สใน Wetted-wall column

กรณีการถ่ายโอนมวลจากของเหลว (A) ไปยังแก๊ส (B) แบบสวนทางกัน โดยของเหลวเปลี่ยนวัฏภาคเป็นไอที่ผิวสัมผัส ของเหลว-แก๊ส จากนั้นจึงแพร่ผ่าน Boundary layer เข้าไปยังวัฏภาคแก๊ส อัตราการถ่ายโอนมวลของของเหลวต่อพื้นที่ (N_A) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (Gas-phase mass transfer coefficient, K_G) และค่าเฉลี่ย (ΔP_{Am}) ของผลต่างระหว่างความดันไอของของเหลวที่ผิวสัมผัส (P_A) กับความดันส่วนของของเหลวในวัฏภาคแก๊ส ($\overline{P}_A$) ตลอดความยาวคอลัมน์ ดังนี้

$$N_A = K_G \Delta P_{Am} \text{ หรือ } K_G = \frac{N_A}{\Delta P_{Am}}$$

เมื่อ N_A = อัตราการถ่ายโอนมวลของของเหลวต่อพื้นที่ (mol/cm^2•s)

K_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (mol/cm^2•s•atm)

ΔP_{Am} = ค่าเฉลี่ย Logarithm ของผลต่างระหว่างความดันไอของของเหลวที่ผิวสัมผัส กับความดันส่วนของของเหลวในวัฏภาคแก๊สทางตอนล่าง และตอนบนของคอลัมน์ (atm)

$$\Delta P_{Am} = \frac{\left(\Delta P_{A2} - \Delta P_{A1}\right)}{\ln\left(\Delta P_{A2} / \Delta P_{A1}\right)} =$$

เมื่อ ΔP_{A1} = $P_{A1} - \overline{P}_{A1}$ (atm)

ΔP_{A2} = $P_{A2} - \overline{P}_{A2}$ (atm)

P_{A1} = ความดันไอที่ผิวของของเหลวทางตอนล่างของคอลัมน์ (atm)

$\overline{P}_{A1}$ = ความดันส่วนของของเหลวในวัฏภาคแก๊สทางตอนล่างของคอลัมน์ (atm)

P_{A2} = ความดันไอที่ผิวของของเหลวทางตอนบนของคอลัมน์ (atm)

$\overline{P}_{A2}$ = ความดันส่วนของของเหลวในวัฏภาคแก๊สทางตอนบนของคอลัมน์ (atm)

ผลการศึกษาของ Gilliland and Sherwood (1934) พบว่าการถ่ายโอนมวลระหว่างของไหลซึ่งไหลสวนทางกัน ในคอลัมน์ลักษณะนี้ ตัวเลขของเชอร์วูด (Sherwood number, Sh) มีขึ้นอยู่กับ ตัวแปรไร้มิติ 2 ตัว คือตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ของแก๊สเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ และตัวเลขของชมิดท์ (Schmidt number, Sc) ของแก๊ส ดังนี้

$$Sh = \frac{K_G RTd}{D} = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.83}\,Sc^{0.33}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{dV\rho}{\mu}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

เมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในคอลัมน์ (cm/s)

ρ = ความหนาแน่นของแก๊ส (g/cm^3)

μ = ความหนืดสมบูรณ์ของแก๊ส (g/cm•s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในอากาศ (cm^2/s)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ (cm)

T = อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในคอลัมน์ (K)

R = ค่าคงที่แก๊ส = 82.06 cm^3•atm / (mol•K)

Sh = ตัวเลขของ Sherwood, -

Re = ตัวเลขของ Reynolds, -

Sc = ตัวเลขของ Schmidt, -

2.การออกแบบ Wetted-wall Column

2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

Wetted-wall column ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นใหม่นี้ ควรมีขนาดเล็กลง สามารถติดตั้งได้ในพื้นที่ชั้นล่างของห้องปฏิบัติการเฉพาะหน่วย และสามารถทำการทดลองได้ในช่วงที่ลักษณะการไหลของอากาศเป็นแบบTurbulent ขณะที่ชุดปฏิบัติการเดิมตัวคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.63 ซม. ยาว 123 ซม. โดยมีความสูงรวมประมาณ 4 เมตร และทำการทดลองได้ ที่ตัวเลข Reynolds ของอากาศ ไม่เกิน 4000 เท่านั้น (ที่อัตราการไหลของอากาศสูงสุด 60 ลิตร/นาที)

2.2 รายละเอียดในการออกแบบ

จากการสำรวจขนาดหลอดแก้วที่จะนำมาจัดทำเป็นคอลัมน์ พบว่าหลอดแก้วขนาดเล็กที่สุดที่จัดหาได้และมีความเป็นไปได้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.7 ซม. และใช้ความยาวของส่วนที่ใช้ในการถ่ายโอนมวล 63 ซม. ซึ่งเมื่อรวมกับระยะที่ต้องสำรองไว้สำหรับระบบการป้อนอากาศเข้าทาง

ตอนล่าง และระบบป้อนน้ำเข้าทางตอนบนแล้ว ชุดอุปกรณ์จะมีความสูงรวมประมาณ 2.50 เมตร โดยสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน มีค่า = 63/1.7 = 37 ซึ่งใกล้เคียงสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชุดอุปกรณ์เดิม ซึ่งมีค่า =113/2.63 = 43

การประมาณอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ เพื่อจัดหาเครื่องวัดอัตราการไหลที่เหมาะสม ใช้ฐานตัวเลข Reynolds ของอากาศ = 10000 ในการประเมิน โดยใช้ความหนาแน่นของอากาศ 1.15×10^{-3} กรัม/ซม^3 และความหนืดของอากาศ 1.8×10^{-4} กรัม/(ซม-วินาที) เพื่อกำหนดความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยของอากาศในคอลัมน์ (V) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องการ (Q) ดังนี้

$$V = \frac{Re\times\mu}{\rho d} = \frac{10000\times1.8\times10^{-4}}{1.15\times10^{-3}\times1.7} = 920.5 \text{ cm/s}$$

$$Q = \frac{\pi}{4}d^2V = \frac{\pi}{4}1.7^2\times920.5 = 2089\frac{cm^3}{s} = 125 \text{ l/min}$$

ดังนั้น ในการติดตั้ง Wetted-wall column ชุดใหม่นี้ จะต้องจัดหาเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ ที่สามารถวัดอัตราการไหลสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 125 ลิตร/นาที

อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ที่จำเป็น ประกอบด้วย ปั๊มน้ำ ถังพักวัดระดับน้ำที่ลดลงจากการระเหย ถังน้ำเลี้ยงระบบเมื่อเริ่มเดินเครื่อง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ-อากาศ และคอลัมน์ดูดความชื้นของอากาศที่ป้อนเข้า รวมทั้งเครื่องมือวัดตัวแปรต่างๆ ของน้ำและอากาศที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ (อัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์)

รายละเอียดของชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบและติดตั้ง

ก) คอลัมน์

เป็นหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.7 ซม. ยาว 63 ซม.ติดตั้งตัวป้อนอากาศเข้าและระบายน้ำออกทางตอนล่าง (Bottom header) และติดตั้งตัวป้อนน้ำเข้าและระบายอากาศออกทางตอนบน (Top header) ตัวป้อนทั้ง 2 ตัว ทำด้วยพลาสติกพีวีซีชนิดใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 15 ซม.

ข) ปั๊มน้ำ

ใช้ปั๊มน้ำชนิด Metering ยี่ห้อ OSMOFLO รุ่น OF-8000 ผลิตโดยบริษัท OSMOFLO USA.อัตราการไหลสูงสุด 1.8 l/min

ค) ถังพักวัดระดับน้ำที่ลดลงจากการระเหย

สร้างด้วยท่อพลาสติกพีวีซีชนิดใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 60 ซม. ติดตั้งแถบวัดระดับน้ำไว้ด้านนอก โดยระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง 1 มม. คิดเป็นปริมาตรน้ำ 1.33 ซม^3

ง) ถังน้ำเลี้ยง

สร้างด้วยท่อพลาสติกพีวีซีชนิดใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 100 ซม.

จ) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ-อากาศ

สร้างด้วยท่อสองชั้นทำด้วยเหล็กปลอดสนิม304ท่อชั้นในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 7.5 ซม. ท่อชั้นนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 55 ซม. โดยในท่อชั้นในติดตั้งขดลวดให้ความร้อนขนาด 800 วัตต์

ฉ) คอลัมน์ดูดความชื้นของอากาศที่ป้อนเข้า

สร้างด้วยท่อพลาสติกพีวีซีชนิดใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 50 ซม. ภายในบรรจุสารดูดความชื้น เพื่อให้อากาศที่ป้อนเข้า มีความชื้นสัมพัทธ์ในระดับไม่เกิน 10%

ช) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ

Rotameter ยี่ห้อ sika รุ่น VS101 ผลิตโดยบริษัท sika สามารถวัดอัตราการไหลของอากาศได้สูงสุด 150 ลิตร/ชั่วโมง

ซ) เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ

Rotameter ยี่ห้อ TOKYO KEISO รุ่น NP-L27 ผลิตโดยบริษัท TOKYO KEISO สามารถวัดอัตราการไหลของน้ำได้สูงสุด 2.5 ลิตร/นาที

ฌ) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ทางเข้าและทางออกคอลัมน์

เป็นชุดวัดแบบดิจิตอล ยี่ห้อ SILA รุ่น AP-140 ผลิตโดยบริษัท SILA สามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้ตั้งแต่ 0-100% โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm$1%

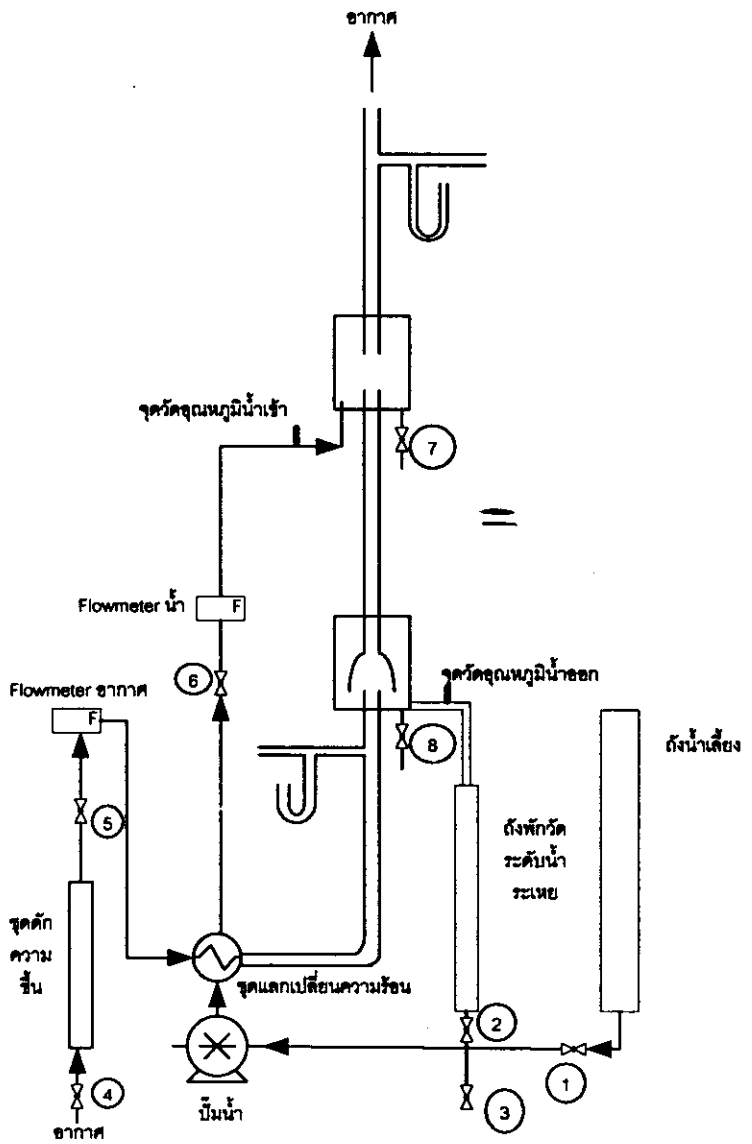
ญ) อุปกรณ์วัดความดันของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์

ใช้ Manometer รูปตัว U ปลายเปิด บรรจุน้ำไว้ภายใน พร้อมสเกลวัดระดับน้ำเป็น มม.

ฎ) เครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์

Thermocouple แบบดิจิตอลรุ่น Thermo-9000 ผลิตโดยบริษัท Plus วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 – 100 °C มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm$1 °C

2.2 แผนภาพของชุดอุปกรณ์
แสดงดังรูปที่ 2-1 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2-1 แผนภาพ (Diagram) ของอุปกรณ์

หลักการทำงาน

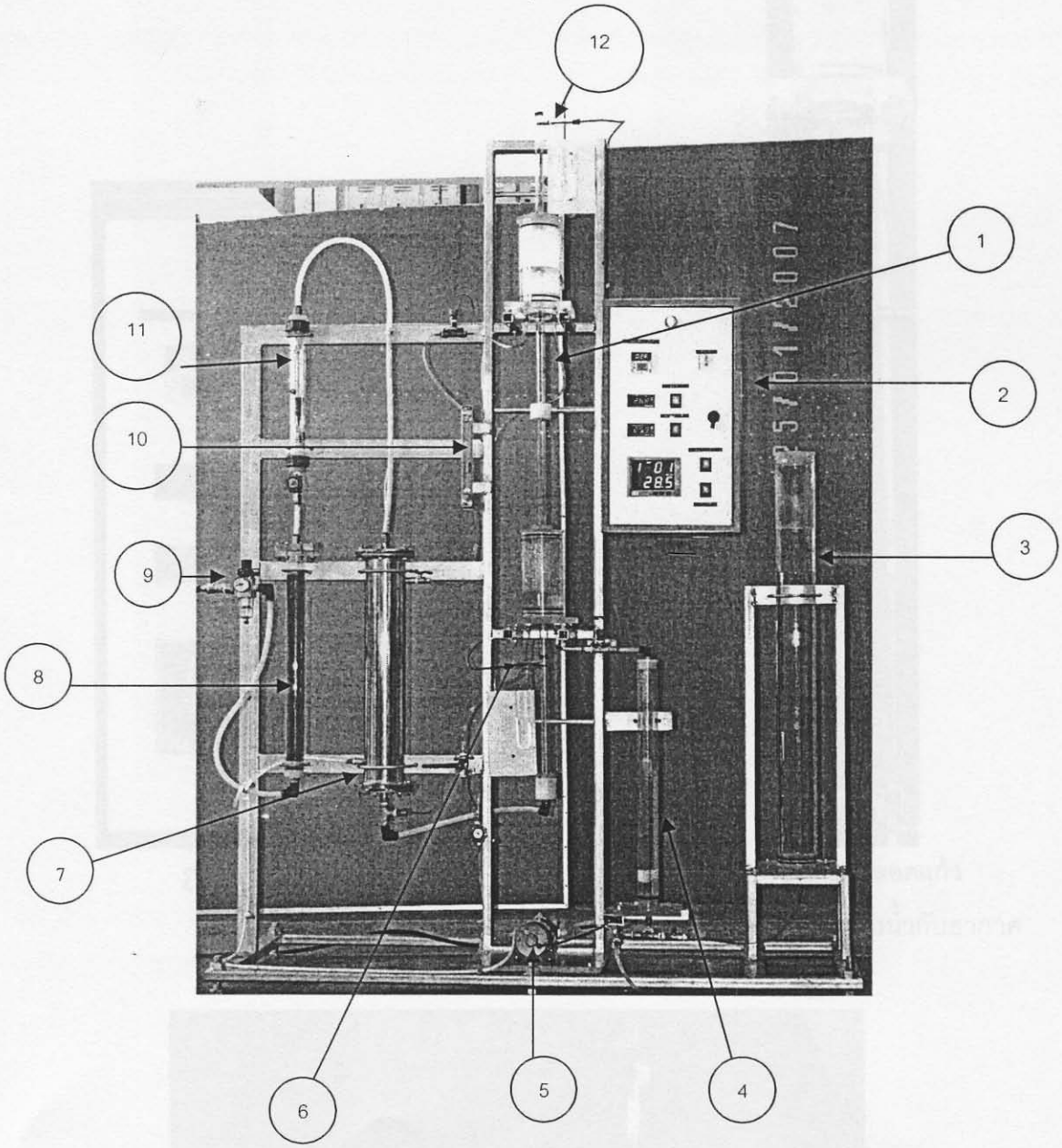
ระบบ Wetted-wall column (รูปที่ 2-1) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษากระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊ส มีลักษณะเป็นคอลัมน์ซึ่งวางอยู่ในแนวดิ่ง

ขั้นตอนการทำงาน

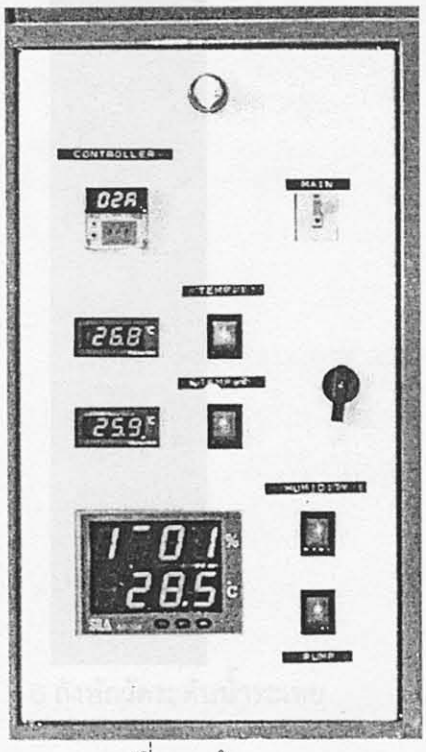
1. เปิด main power
2. เปิด Valve น้ำหมายเลข 1
3. เปิด Valve น้ำหมายเลข 6
4. เปิดปั๊มน้ำให้น้ำไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน
5. ปรับ Valve น้ำหมายเลข 6 ควบคุมอัตราการไหลของน้ำตามกำหนดที่ใช้ในการทดลอง (0.4 และ 1 ลิตร/นาที) ตามลำดับ น้ำจะไหลลงตามผิวผนังด้านในจากคอลัมน์ตอนบนลงผ่านชุดหลอดแก้วถ่ายเทการระเหยระหว่างน้ำกับอากาศลงไปยังตอนล่างของคอลัมน์ตามผิวผนังด้านในลงไปสู่ถังพักวัดระดับน้ำระเหยจนถึงระดับที่เพียงพอต่อการทดลอง
6. ปิด Valve น้ำหมายเลข 1
7. เปิด Valve น้ำหมายเลข 2
8. เปิด Valve อากาศหมายเลข 4 ด้วยความระมัดระวังปรับค่าแรงดันของอากาศ 30 ปอนด์/ตร.นิ้ว ให้อากาศไหลผ่านชุดดักความชื้น
9. เปิด Valve อากาศหมายเลข 5 ปรับอัตราการไหลของอากาศตามกำหนดที่ใช้ในการทดลอง (20,30,40,50,60 ลิตร/นาที) ตามลำดับ อากาศจะไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่คอลัมน์ทางตอนล่างและไหลสวนทางกับทิศทางของน้ำจากคอลัมน์ด้านบนผ่านชุดหลอดแก้วถ่ายเทการระเหยระหว่างน้ำกับอากาศออกสู่ระบบภายนอกโดยผ่านทางคอลัมน์ตอนบน

เมื่อตรวจสอบได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว(steady state)แล้วประมาณ 15 นาที ให้บันทึกอุณหภูมิ ความดัน ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของน้ำ ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ และจับเวลาบันทึกหาระดับน้ำที่ลดลงในถังพัก

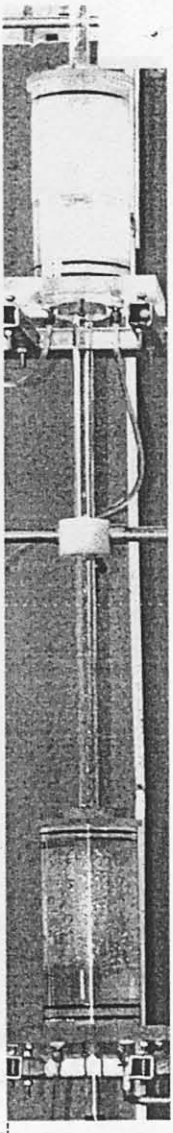
2.2 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์ Wetted-wall column แสดงดังรูปที่ 2-2 ถึงรูปที่ 2-7



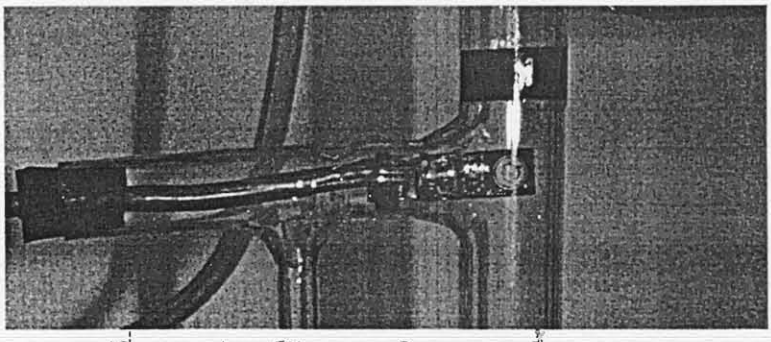
รูปที่ 2-2 ชุดอุปกรณ์ Wetted-wall column



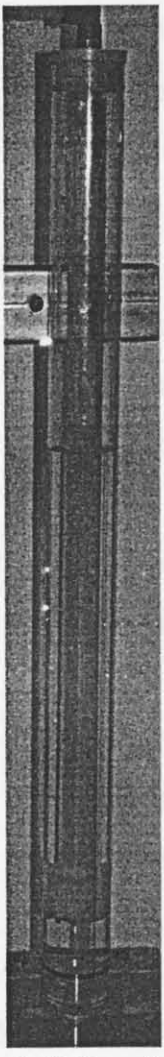
รูปที่ 2-3 ตู้ Control



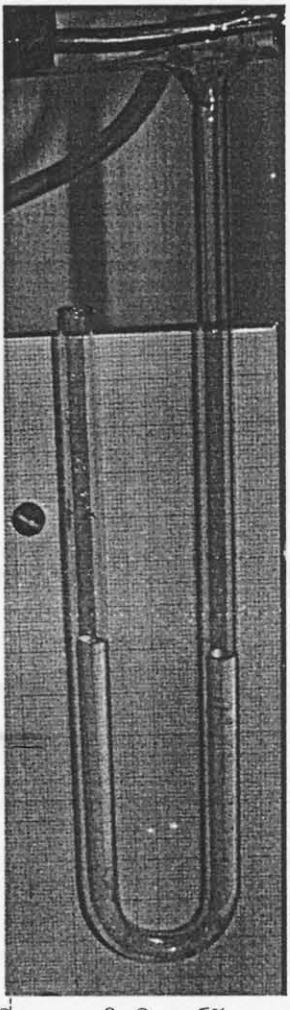
รูปที่ 2-4 ชุดหลอดแก้ว
ถ่ายโอนมวลระหว่างน้ำกับอากาศ



รูปที่ 2-5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ



รูปที่ 2-6 ถังพักวัดระดับน้ำระเหย



รูปที่ 2-7 มาโนมิเตอร์วัดความดัน

ส่วนประกอบของเครื่อง Wetted-wall column

1. หลอดแก้วถ่ายโอนมวลระหว่างน้ำกับอากาศ
2. ชุดควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า
3. ถังน้ำเลี้ยง
4. ถังพักวัดระดับน้ำระเหย
5. ปั๊มน้ำ
6. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศทางเข้า
7. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน
8. ชุดดักความชื้น
9. ชุดปรับแรงดันของอากาศ

10. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
11. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
12. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศทางออก

2.2 ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือ

1. ตรวจเช็คระดับน้ำในถังน้ำเลี้ยงให้มีปริมาณเพียงพอต่อการทดลอง
2. ตรวจเช็คตำแหน่ง Valve ทุกตัวให้ถูกต้อง
3. เปิด Switch Main Power ให้สังเกตไฟโชว์ที่ตู้ Control

2.3 วิธีการบำรุงรักษาเครื่อง

1. ตรวจชุดดักความชื้น (ก่อนการทดลองทุกครั้ง) ควรมีสีน้ำเงินเข้มถ้าเปลี่ยนเป็นสีขาวแสดงว่ามีความชื้นสูงต้องนำไปอบก่อนทำการทดลอง
2. ชุดปรับแรงดันของอากาศต้องถ่ายน้ำออกจากตัวดักน้ำ
3. ก่อนเปิดเครื่องปั๊มน้ำควรเติมน้ำในถังน้ำเลี้ยงให้พอต่อการทดลอง
4. มาโนมิเตอร์วัดความดันควรตรวจสอบระดับน้ำให้เรียบร้อย

3. การทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ชุดอุปกรณ์ Wetted-wall column ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น
2. อากาศ (Compressor)
3. น้ำ
4. นาฬิกาจับเวลา

3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

1. อัตราการไหลของอากาศ 20, 30, 40, 50 และ 60 ลิตร/นาที
2. อัตราการไหลของน้ำ 0.4 และ 1.0 ลิตร/นาที
3. อุณหภูมิของอากาศ
    - อุณหภูมิห้อง (ไม่ใช้ระบบอุ่นร้อน)
    - อุณหภูมิ 50 $^{\circ}C$ (ใช้ระบบอุ่นร้อน)
4. ความดันของอากาศ 30 lb/in^2

3.3 วิธีการทดลอง

1. ปั๊มน้ำจากถังน้ำเลี้ยง ปรับอัตราการไหลตามกำหนดที่ใช้ในการทดลอง (0.4 และ 1.0 ลิตร/นาที) ตามลำดับ ให้น้ำไหลจากคอลัมน์ทาง ตอนบนผ่านหลอดแก้วถ่ายเทการระเหยระหว่างน้ำกับอากาศตามผิวผนังด้านใน ลงสู่คอลัมน์ทางตอนล่างเข้าสู่ถังพัก วัดระดับของน้ำระเหยในถัง
2. ผ่านอากาศเข้าตามเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (ไม่ใช้ระบบอุ่นอากาศ) และอุณหภูมิ 50 °C (ใช้ระบบอุ่นอากาศ) ที่อัตราการไหล 20, 30, 40, 50 และ 60 ลิตร/นาที ตามที่กำหนด เข้าสู่คอลัมน์ทางตอนล่างในทิศทางสวนขึ้นกับการไหลของน้ำจากคอลัมน์ทางตอนบน บันทึกอัตราการไหลของอากาศ และความดันของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์
3. หลังจากเดินระบบปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศได้ตามที่กำหนดแล้ว เมื่อตรวจสอบได้ว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state) แล้วประมาณ 15 นาที เริ่มจับเวลาตามที่กำหนดคือ 5,10และ15 นาที
    - บันทึกอุณหภูมิอากาศและค่าความชื้นของอากาศที่ทางเข้าและทางออก
    - บันทึกอุณหภูมิของน้ำ ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์
    - บันทึกค่าความดันที่ทางเข้าและทางออก
    - วัดปริมาตรของน้ำที่ลดลงในถังพัก เพื่อใช้คำนวณอัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์
4. บันทึกข้อมูลตามข้อ 3. หลังจากบันทึกข้อมูลชุดแรกเรียบร้อยตามเวลาที่กำหนด(5, 10 และ15 นาที ตามลำดับ)
5. ทำการทดลองตามข้อ 1 ถึงข้อ 3 ให้ครบถ้วนตามสภาวะการทดลองที่ได้ระบุไว้ใน ข้อ 1 และข้อ 2

3.4 ข้อมูลจากการทดลอง

ข้อมูลจากการทดลองตามเงื่อนไขและขั้นตอนที่ระบุไว้ในข้อ 1 และ 2 ได้รวบรวมไว้ใน ภาคผนวก ก

3.5 ปัญหา/อุปสรรคในการทดลอง

1. จากการทดลองอัตราการไหลของอากาศไม่สามารถใช้ได้สูงกว่า 60 ลิตร/นาที เพราะจะทำให้น้ำที่ไหลลงมาจากคอลัมน์ตอนบนผ่านหลอดแก้วถ่ายเทการระเหยระหว่างน้ำกับอากาศไม่สามารถไหลสวนทางกับอากาศได้ทั้งหมด แต่จะถูกอากาศที่มีอัตราการไหลสูงกว่า 60 ลิตร/นาที พาน้ำไหลไปกับอากาศไปสู่ทางออกของปลายคอลัมน์ทางตอนบน

2. จากการทดลองเมื่อใช้อากาศที่มีอุณหภูมิแลกเปลี่ยนสูงมากกว่า 50°C ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำไม่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ดีตามที่ต้องการ ซึ่งทำให้ไม่สามารถเพิ่มการทดลองของอากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ ซึ่งทางผู้ทดลองคิดว่าจะต้องทำการปรับปรุงชุดแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงใช้

4. ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลและคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ จะสามารถแสดงผลได้ดังตารางต่อไปนี้

1. เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า

	k_{gc}, cm/s		Sh		Data analysis			
Re	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ln(Re)	ln(Sh)	Sh2	k_{gc}2
4177.54	4.68	2.98	30.29	19.31	8.34	3.41	25.33	3.91
4177.54	4.77	2.98	30.92	19.31	8.34	3.43	25.33	3.91
4177.54	4.52	2.98	29.29	19.31	8.34	3.38	25.33	3.91
4179.63	4.61	2.98	29.88	19.31	8.34	3.40	25.34	3.91
3811.92	3.07	2.76	19.91	17.89	8.25	2.99	22.96	3.54
3811.28	2.94	2.76	19.05	17.89	8.25	2.95	22.96	3.54
3810.65	2.87	2.76	18.60	17.89	8.25	2.92	22.95	3.54
3811.28	2.97	2.76	19.20	17.89	8.25	2.95	22.96	3.54
3313.35	3.07	2.46	19.88	15.93	8.11	2.99	19.76	3.05
3312.25	2.98	2.46	19.27	15.92	8.11	2.96	19.75	3.05
3292.44	3.03	2.44	19.60	15.84	8.10	2.98	19.62	3.03
3292.99	3.04	2.44	19.65	15.85	8.10	2.98	19.63	3.03
2664.88	2.48	2.05	16.01	13.29	7.89	2.77	15.64	2.41
2663.55	2.35	2.05	15.14	13.29	7.89	2.72	15.63	2.41
2664.00	2.36	2.05	15.22	13.29	7.89	2.72	15.64	2.41
2665.33	2.28	2.05	14.75	13.30	7.89	2.69	15.65	2.41
1908.35	1.78	1.55	11.51	10.08	7.55	2.44	10.94	1.69
1905.18	1.74	1.55	11.22	10.06	7.55	2.42	10.92	1.68
1904.54	1.77	1.55	11.38	10.06	7.55	2.43	10.91	1.68
1904.54	1.74	1.55	11.18	10.06	7.55	2.41	10.91	1.68
				a	0.00			
$Sh = aRe^{b}Sc^{0.333}$				b	1.07			
				intercept	-5.71			

2. เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นอากาศเข้า

	k_{gc}, cm/s		Sh	Data analysis				
Re	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ln(Re)	ln(Sh)	Sh2	k_{gc}2
4131.19	3.88	2.95	24.87	19.13	8.33	3.21	4.87	0.75
4130.51	3.99	2.95	25.58	19.13	8.33	3.24	4.87	0.75
4131.88	3.90	2.95	24.99	19.13	8.33	3.22	4.87	0.75
4131.88	5.04	2.95	32.31	19.13	8.33	3.48	4.87	0.75
3770.26	3.72	2.73	23.84	17.73	8.23	3.17	4.42	0.68
3770.88	3.66	2.74	23.48	17.73	8.24	3.16	4.42	0.68
3769.63	3.67	2.73	23.53	17.73	8.23	3.16	4.42	0.68
3769.63	3.67	2.73	23.53	17.73	8.23	3.16	4.42	0.68
3277.69	2.65	2.43	16.98	15.79	8.09	2.83	3.80	0.59
3277.14	2.62	2.43	16.82	15.78	8.09	2.82	3.80	0.59
3276.06	2.58	2.43	16.53	15.78	8.09	2.81	3.80	0.59
3276.06	2.58	2.43	16.53	15.78	8.09	2.81	3.80	0.59
2652.95	2.71	2.04	17.36	13.24	7.88	2.85	3.03	0.47
2652.95	2.61	2.04	16.74	13.24	7.88	2.82	3.03	0.47
2652.51	2.56	2.04	16.39	13.24	7.88	2.80	3.03	0.47
2652.07	2.56	2.04	16.39	13.24	7.88	2.80	3.03	0.47
1898.99	1.53	1.55	9.79	10.03	7.55	2.28	2.12	0.33
1898.68	1.46	1.55	9.36	10.03	7.55	2.24	2.12	0.33
1898.68	1.45	1.55	9.26	10.03	7.55	2.23	2.12	0.33
1898.68	1.42	1.55	9.09	10.03	7.55	2.21	2.12	0.33

a	0.00
b	1.27
intercept	-7.34

$$Sh = aRe^{b}Sc^{0.333}$$

3. เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า

	k_{gc}, cm/s		Sh	Data analysis				
Re	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ln(Re)	ln(Sh)	Sh2	$k_{gc}2$
4081.57	6.54	2.92	41.46	18.94	8.31	3.72	29.00	4.47
4022.95	6.92	2.89	43.20	18.71	8.30	3.77	28.28	4.36
3988.21	5.58	2.87	34.60	18.58	8.29	3.54	27.86	4.30
3969.46	5.12	2.85	31.51	18.50	8.29	3.45	27.63	4.26
3621.48	3.22	2.64	19.82	17.15	8.19	2.99	23.55	3.63
3623.83	2.91	2.65	17.91	17.16	8.20	2.89	23.58	3.64
3623.24	3.08	2.65	18.96	17.16	8.20	2.94	23.57	3.64
3623.24	3.18	2.65	19.56	17.16	8.20	2.97	23.57	3.64
3454.94	2.58	2.54	17.48	16.49	8.15	2.86	21.70	3.35
3158.60	2.60	2.36	16.06	15.31	8.06	2.78	18.56	2.86
3157.06	2.57	2.36	15.86	15.30	8.06	2.76	18.55	2.86
3157.06	2.56	2.36	15.80	15.30	8.06	2.76	18.55	2.86
2558.68	2.34	1.98	14.49	12.85	7.85	2.67	12.87	1.98
2563.68	2.14	1.99	13.25	12.87	7.85	2.58	12.91	1.99
2563.26	2.12	1.99	13.14	12.87	7.85	2.58	12.91	1.99
2563.26	2.24	1.99	13.90	12.87	7.85	2.63	12.91	1.99
1837.07	1.36	1.51	8.45	9.76	7.52	2.13	7.23	1.12
1850.65	1.28	1.51	7.96	9.82	7.52	2.07	7.32	1.13
1851.56	1.15	1.52	7.16	9.83	7.52	1.97	7.33	1.13
1850.65	1.12	1.51	6.96	9.82	7.52	1.94	7.32	1.13

$$Sh = aRe^{b}Sc^{0.333}$$

a	0.00
b	1.74
intercept	-11.10

4. เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตร/นาที โดยใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า

	k_{gc}, cm/s		Sh	Data analysis				
Re	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ln(Re)	ln(Sh)	Sh2	k_{gc}2
4076.86	4.56	2.92	28.82	18.92	8.31	3.36	27.57	4.25
3981.73	4.89	2.86	30.23	18.55	8.29	3.41	26.73	4.12
3982.37	4.16	2.86	25.74	18.55	8.29	3.25	26.73	4.12
3975.26	4.19	2.86	25.85	18.53	8.29	3.25	26.67	4.11
3629.72	3.48	2.65	21.49	17.18	8.20	3.07	23.66	3.65
3625.59	3.64	2.65	22.43	17.16	8.20	3.11	23.63	3.64
3625.00	3.61	2.65	22.25	17.16	8.20	3.10	23.62	3.64
3625.00	3.49	2.65	21.47	17.16	8.20	3.07	23.62	3.64
3152.96	3.16	2.36	19.50	15.29	8.06	2.97	19.66	3.03
3157.06	3.01	2.36	18.60	15.30	8.06	2.92	19.69	3.04
3157.06	3.09	2.36	19.11	15.30	8.06	2.95	19.69	3.04
3157.57	3.11	2.36	19.25	15.30	8.06	2.96	19.70	3.04
2557.84	3.12	1.98	19.28	12.85	7.85	2.96	14.93	2.30
2552.45	3.01	1.98	18.55	12.83	7.84	2.92	14.89	2.30
2553.28	2.64	1.98	16.30	12.83	7.85	2.79	14.89	2.30
2554.52	2.45	1.98	15.10	12.84	7.85	2.71	14.90	2.30
1826.34	1.60	1.50	9.83	9.72	7.51	2.29	9.58	1.48
1826.64	1.40	1.50	8.59	9.72	7.51	2.15	9.59	1.48
1813.02	1.42	1.49	8.71	9.66	7.50	2.16	9.49	1.46
1811.55	1.42	1.49	8.72	9.65	7.50	2.17	9.48	1.46

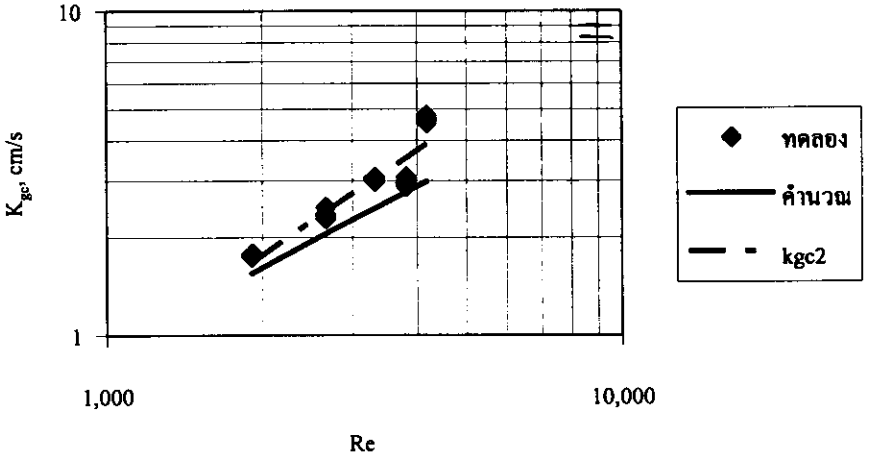
a	0.00
b	1.32
intercept	-7.62

$$Sh = aRe^{b}Sc^{0.333}$$

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่แสดงในตาราง จะพบว่าข้อมูลวิเคราะห์ที่ได้ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรก คือการนำข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองไปแทนค่าในสูตรต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข รวมทั้งนำเอาข้อมูลวิเคราะห์จากข้างต้นไปแทนค่าในสหสัมพันธ์ดังแสดงในภาคผนวก ข ส่วนที่สอง คือการนำข้อมูลที่วิเคราะห์จากส่วนแรกมาทำการพล็อตกราฟ log – log แล้วนำค่าที่ได้จากกราฟมาแทนค่าในสหสัมพันธ์ด้านล่างของตาราง

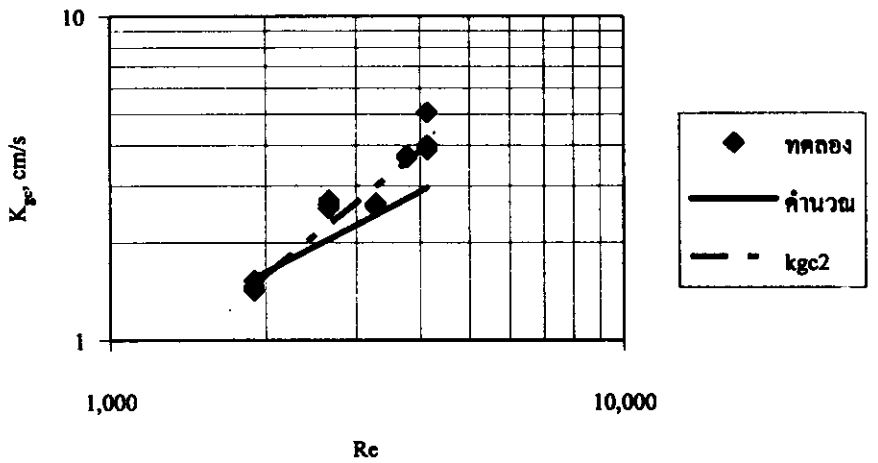
4.2 อิทธิพลจากอัตราการไหลของอากาศต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส

จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์ดังตารางข้างต้น พบว่าค่าอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อค่า Sherwood number (Sh) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่า Sherwood number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ เพิ่มขึ้นด้วย และแนวโน้มดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสหสัมพันธ์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4-1 ถึง 4-4



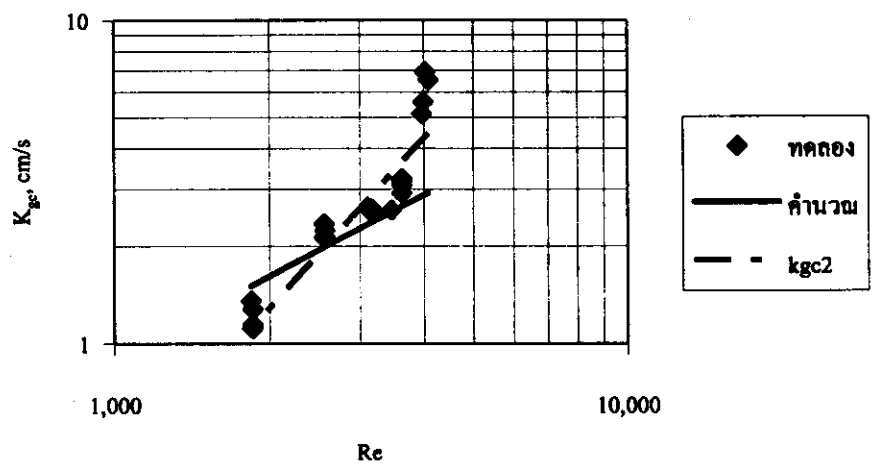
รูปที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)



รูปที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

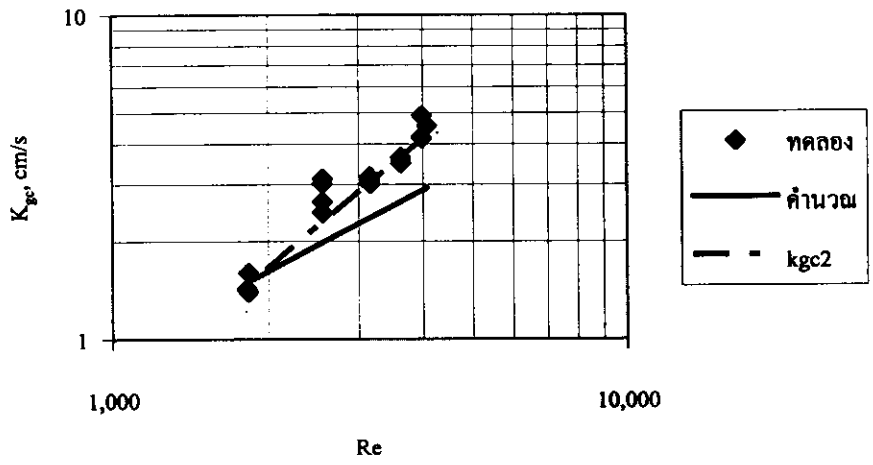
(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)



รูปที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)

ฝ่ายหอสมุด
คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร

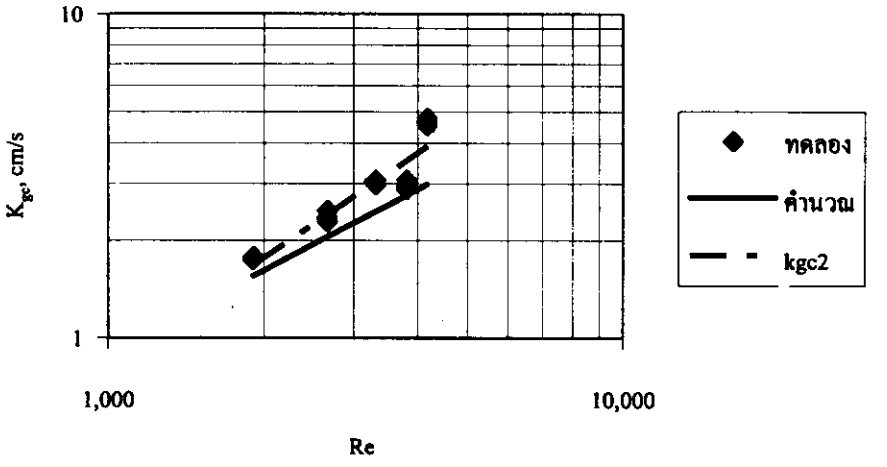


รูปที่ 4-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number
(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตร/นาที โดยใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)

จากกราฟที่ได้จากข้อมูลผลการทดลองทั้ง 4 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลองจะปรับค่าอัตราการไหลของอากาศไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่า Reynolds number ของอากาศจะเพิ่มขึ้น และเมื่อค่า Reynolds number ของอากาศเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) จะเพิ่มขึ้น

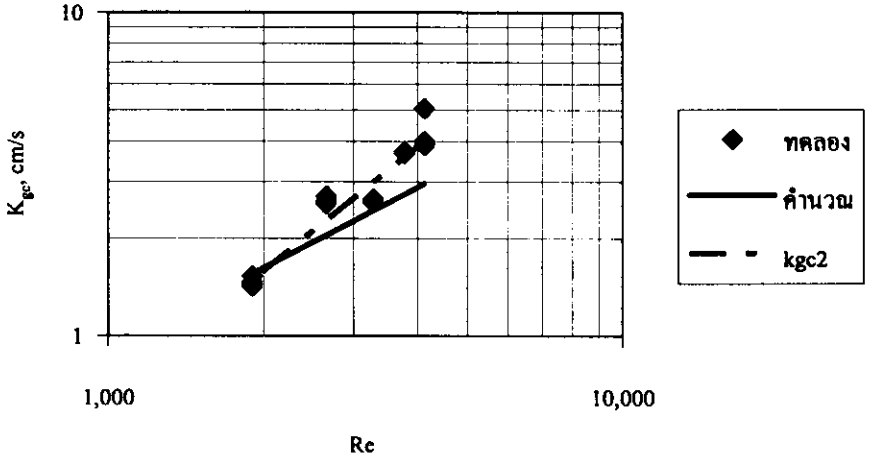
4.3 อิทธิพลจากอัตราการไหลของน้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส

จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์ดังตารางข้างต้น พบว่าค่าอัตราการไหลของน้ำมีผลต่อค่า Sherwood number (Sh) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ค่า Sherwoods number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) เพิ่มขึ้นด้วย และแนวโน้มดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสหสัมพันธ์ แสดงได้ดังกราฟ



รูปที่ 4-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)

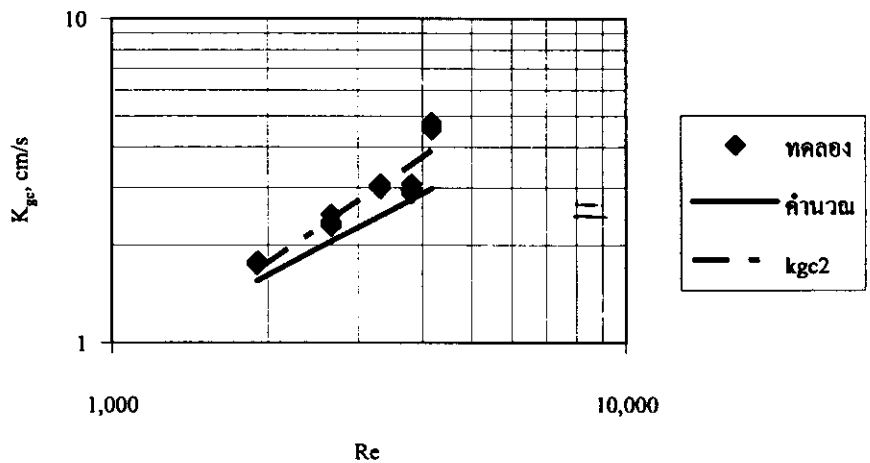


รูปที่ 4-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficien กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)

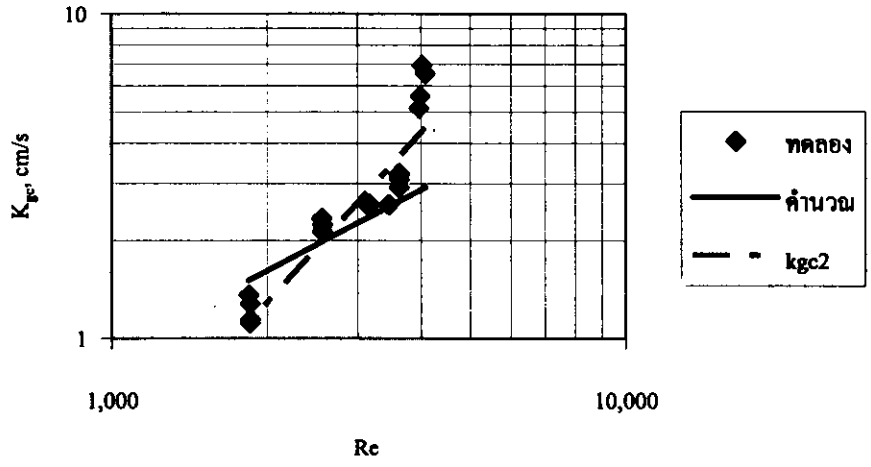
เมื่อเปรียบเทียบกราฟทั้ง 2 รูปที่ได้แสดงข้างต้นจะพบว่า เส้นกราฟข้อมูลจากรูปแรก (ใช้อัตราการไหลของน้ำ 1 L/h) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) สูงกว่าเส้นกราฟข้อมูลจากรูปที่สอง

4.4 อิทธิพลจากอุณหภูมิของอากาศต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์ดังตารางข้างต้น พบว่าอุณหภูมิของอากาศมีผลต่อค่า Sherwood number (Sh) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ค่า Sherwoods number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) เพิ่มขึ้นด้วย และแนวโน้มดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสหสัมพันธ์แสดงได้ดังกราฟ



รูปที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร/นาที โดยไม่ใช้ Heater อุ่นร้อนอากาศเข้า)



รูปที่ 4-8 **แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง** Gas phase mass transfer coefficient กับ Reynolds number

(เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 1 **ลิตร/นาที โดยใช้** Heater **อุ่นร้อนอากาศเข้า)**

เมื่อเปรียบเทียบกราฟทั้ง 2 **รูปที่ได้แสดงข้างต้นจะพบว่า เส้นกราฟข้อมูลจากรูปที่สอง (ใช้** heater **อุ่นอากาศให้ร้อนก่อนป้อนเข้า) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคก๊าซ (K_{gc}) สูงกว่าเส้นกราฟข้อมูลจากรูปแรก**

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะพบว่า ค่าอัตราการไหลของอากาศ และน้ำ รวมทั้งอุณหภูมิของอากาศ มีผลต่อค่า Sherwood number (Sh) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในก๊าซ (K_{gc}) เมื่อทำการเพิ่มค่าของตัวแปรทั้งสามขึ้น พบว่าค่า Sherwood number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในก๊าซ (K_{gc}) เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลผลการทดลองจริงเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ พบว่าค่าที่ได้ไม่เท่ากันแต่มีแนวโน้มเดียวกันที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดมาจากประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดหรือความคลาดเคลื่อนของชุดอุปกรณ์บางจุด แต่สามารถนำชุดอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้การประกอบการเรียนการสอนรายวิชา 230 – 443 chemical engineering lab II ได้

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อทำการทดลองเพิ่มอัตราการไหลของน้ำก็ทำให้ค่าทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นกัน

2. เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าระบบโดยเพิ่มให้มีค่ามากขึ้น พบว่าจะส่งผลทำให้ค่า Sherwood number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในก๊าซ (K_{gc}) มีค่ามากขึ้น

3. จากกราฟแสดงความระหว่าง Sherwood number และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในก๊าซ (K_{gc}) และค่า Reynolds's number (Re) ที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ พบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือเมื่อ Re เพิ่ม ค่า Sh และ K_{gc} เพิ่มขึ้นด้วย แต่กราฟที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเบี่ยงเบนไปจากกราฟที่ได้จากสหสัมพันธ์ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดมาจากความเคลื่อนอันเกิดจากการทดลอง นั่นคือ อุณหภูมิของอากาศมีค่าไม่คงที่

5. สรุป

ชุดปฏิบัติการ Wetted-wall column เป็นการสร้างทดแทนเครื่องมือทดลองชุดเก่าที่ไม่ได้เป็นครุภัณฑ์ แต่ใช้ในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการ 230-443 ซึ่งเครื่องมือชุดดังกล่าวได้ชำรุดและเสื่อมสภาพทำให้ได้ข้อมูลจากการทดลองไม่ถูกต้อง ดังนั้นการจัดสร้างสิ่งประดิษฐ์ซึ่งใช้สนับสนุนการเรียนการสอนหัวข้อปฏิบัติการในรายวิชา 230-443 ปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี 2 โดยจะนำมาใช้ทดแทนชุดปฏิบัติการเดิม โดยลดขนาดลง เพิ่มอุปกรณ์วัดและควบคุมภาวะการทดลองให้มีขอบเขตกว้างขวางขึ้น ทำให้นักศึกษาสามารถเข้าใจเนื้อหาในทฤษฎีและนำผลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์และสอบทานกับสมการที่ใช้ทำนายผลต่างๆ ได้ดี

การทดลองนี้ได้ใช้กรรมวิธีวัดและวิเคราะห์อย่างง่ายจากเอกสารพื้นฐาน เพื่อให้นักศึกษาได้ค้นคว้าเอกสารมาเปรียบเทียบได้ง่าย การสร้างชุด Wetted-wall Column นี้เป็นโครงการวิจัยประเภทครุภัณฑ์และสื่อการสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อทดแทนหรือสร้างขึ้นใหม่ของอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ชุด Wetted-wall Columnนี้ ใช้เงินจัดสร้างในจำนวน 74,997บาท (เจ็ดหมื่นสี่พันเก้าร้อยเก้าสิบเจ็ดบาทถ้วน) ปัญหาสำคัญในการจัดสร้างคือ การอ่านค่าการระเหยของน้ำในถังพักไม่มีอุปกรณ์หรือเครื่องมือสำเร็จรูปที่สามารถอ่านค่าได้โดยตรง เนื่องจากท่อมีขนาดเล็กต้องใช้สายตาของแต่ละบุคคลอ่านทำให้การอ่านสเกลมีผลคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากเงินรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ประเภทสิ่งประดิษฐ์เพื่อใช้การเรียนการสอนในรายวิชา 230-443 (Chemical Engineering Lab II) ประจำปี 2549

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณนายสุธรรม สุขมณี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนโครงการวิจัยนี้