

การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer)

อ.ดร.ไพโรจน์ วงศ์พุทธิสิน

สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้



กระบวนการทางอุตสาหกรรมเกษตรบางกระบวนการ
อาจจำเป็นต้องสร้างสภาวะบางอย่างเพื่อให้เอื้อต่อการเกิด
ปฏิกิริยาเคมี แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมา หรือมีการย้ายมวลจาก
เฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง การถ่ายเทมวลสารมีบทบาทสำคัญที่
ช่วยเกิดกระบวนการเหล่านี้ขึ้น

ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการกลั่น การอบแห้ง การสกัด
เป็นต้น

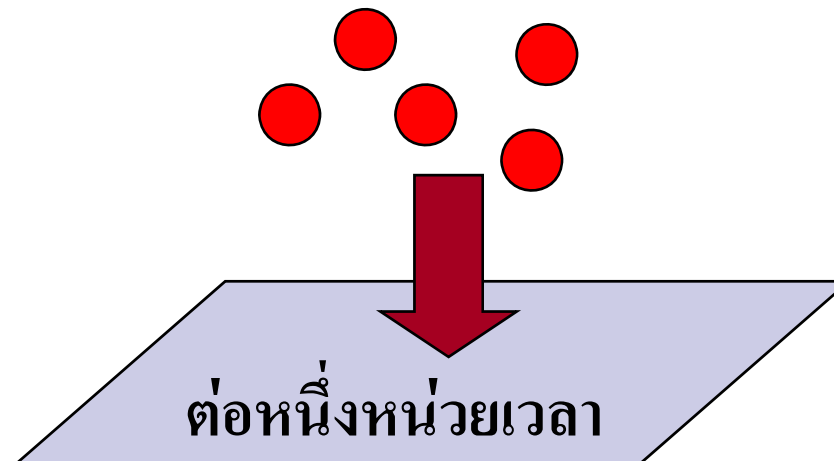
ตารางแสดง ตัวอย่างหน่วยปฏิบัติการบางหน่วยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสาร

กระบวนการ	มวลที่ถ่ายเท	การเปลี่ยนแปลง
Dehydration	น้ำ	จากของเหลว/ของแข็ง ไปเป็นไอ
Solvent extraction	น้ำมัน	จากชั้นของแข็ง ไปยังชั้นตัวทำละลายอินทรีย์
Smoking	Phenolic compound	จากชั้นของไอ ไปยังชั้นของแข็ง
Distillation	แอลกอฮอล์ และสารระเหยอื่นๆ	จากชั้นของเหลวไปยังชั้นของไอ
Packaging	ก๊าซต่างๆ	จากภายนอกของมายังภายใน

ฟลักซ์ (Fluxes)

เป็นปริมาณทางเวกเตอร์ ที่หมายถึง จำนวนมวลหรือโมลของสาร
องค์ประกอบที่เคลื่อนที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งตั้งฉาก
กับฟลักซ์เวกเตอร์นั้น

ดังนั้นฟลักซ์จึงมีทั้งฟลักซ์เชิงมวล (mass flux) และฟลักซ์เชิงโมล
(molar flux)



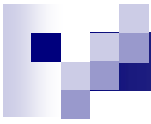


กลไกการถ่ายเทมวลสารมี 2 แบบ คือ

1. การแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) เป็นการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random) ผ่านตัวกลางที่อยู่นิ่ง
2. การพามวล (convective mass transfer) เป็นการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นโดยตัวกลางของของผสม มีการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเกิดจากการกวน ความแตกต่างของความหนาแน่นก็ได้

**** ในหนึ่งกระบวนการอาจเกิดการถ่ายเทมวลทั้ง 2 แบบพร้อมกันก็ได้**

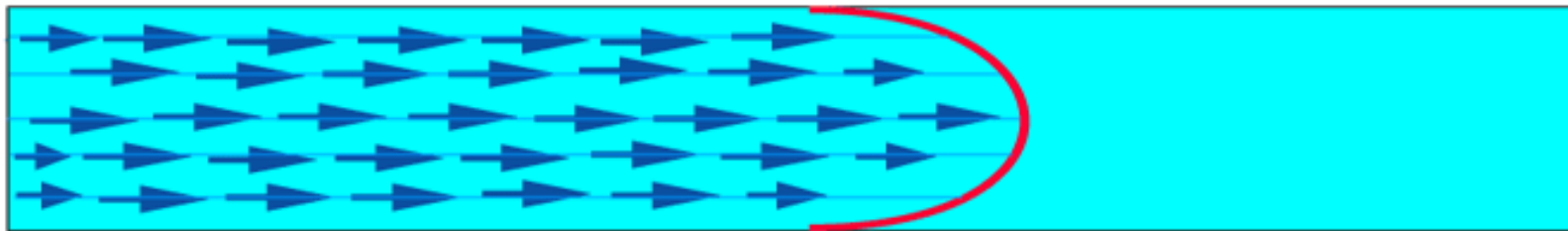
- ถ้าการไหลเป็นแบบ laminar การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการแพร่
- ถ้าการไหลเป็นแบบ turbulent การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการพามากกว่า



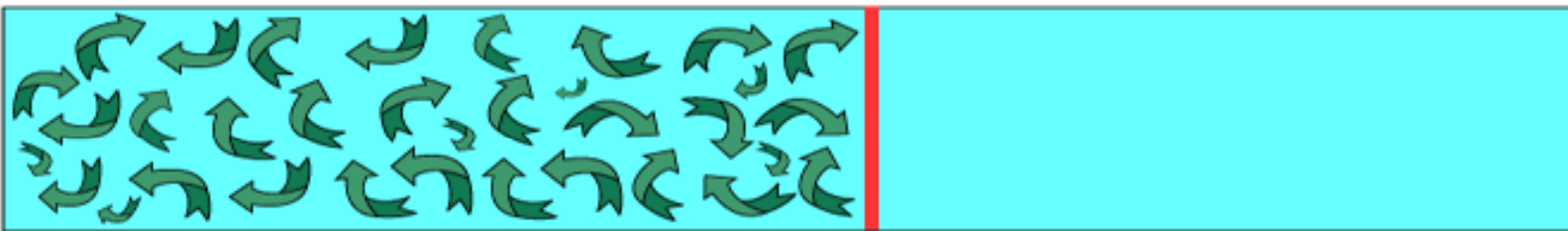
Laminar Flow



freshgasflow.com



Turbulent Flow





การพามวล (convective mass transfer)

แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. การพามวลแบบบังคับ (force convection) เป็นการพามวลที่ของไหลเคลื่อนที่โดยอาศัยปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นๆ
2. การพามวลแบบธรรมชาติ (natural convection) เป็นพามวลที่ของไหลเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มข้น หรือความหนาแน่น



สมการแสดงฟลักซ์ของการพามวล คือ

$$N_A = k_c \Delta C_A$$

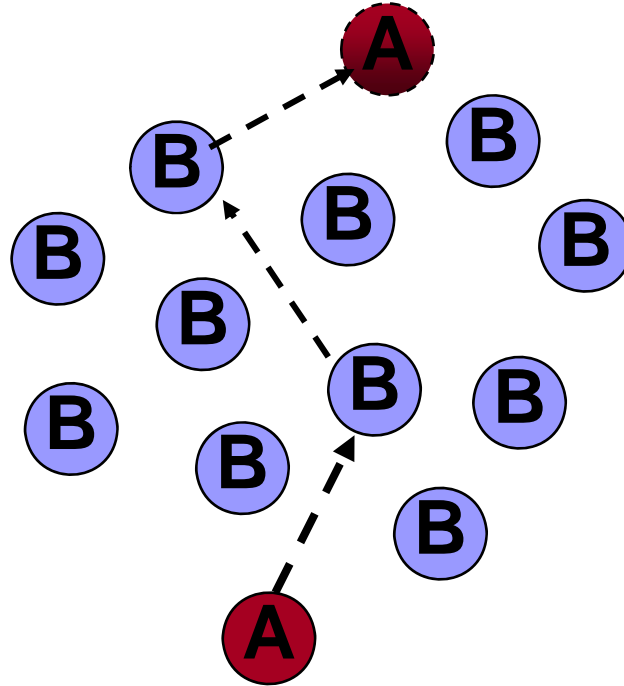
N_A = ฟลักซ์เชิงโมลของโมเลกุล A เทียบกับพื้นที่ที่

ΔC_A = ผลต่างของความเข้มข้นของ A ระหว่างค่าที่พื้นผิวกับค่าเฉลี่ย
ในของไหลหรือระหว่างค่าเฉลี่ยในของไหลสองชนิด

k_c = สัมประสิทธิ์การพามวล (convective mass transfer coefficient)

การแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion)

เกิดการเคลื่อนที่แบบ random ผ่านตัวกลาง

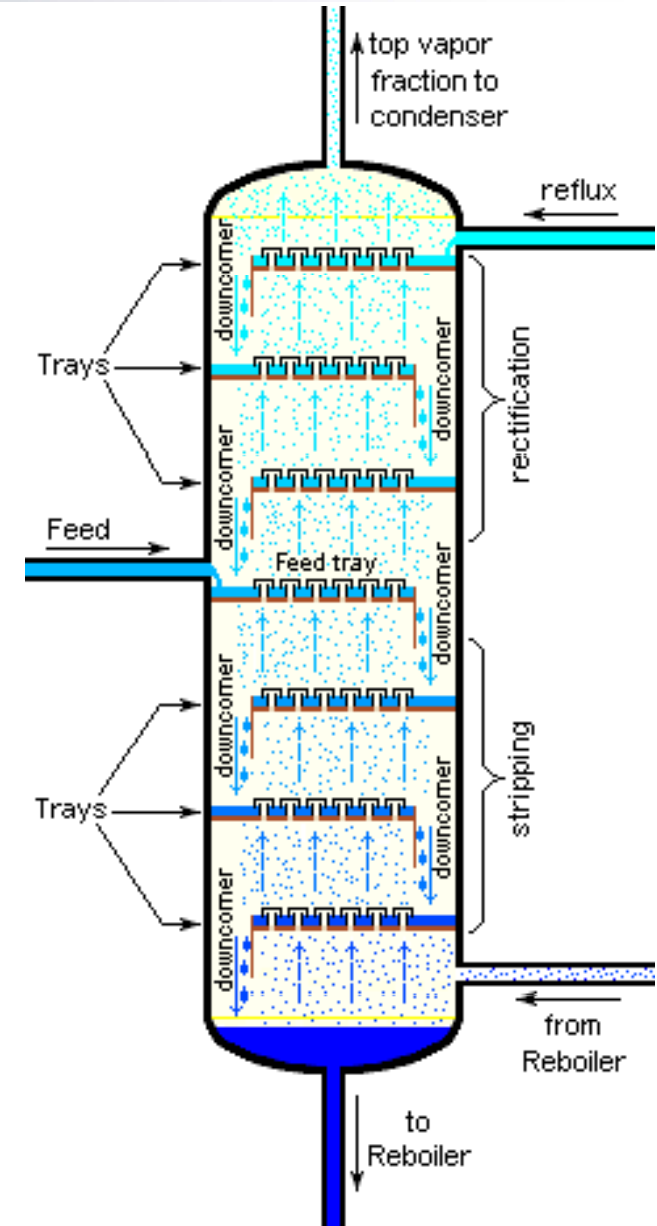


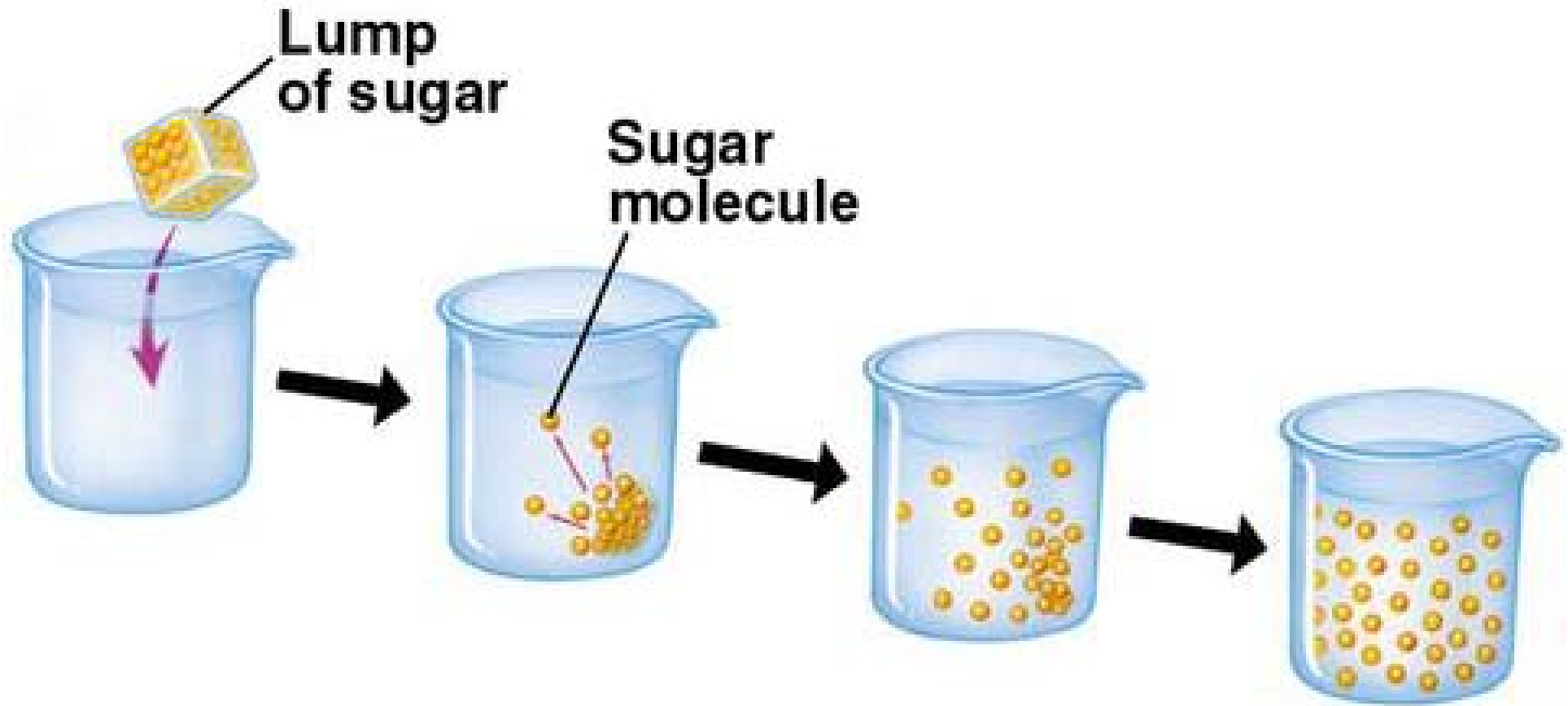
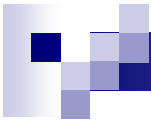
แรงขับ (driving force) ที่เกี่ยวข้องคือ ความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient)

มีการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ๆ มีความเข้มข้นต่ำ

ลักษณะการแพรมี 2 แบบ คือ

1. การแพร่ของ A ผ่าน B ที่ไม่แพร่ : พบการแพร่แบบนี้ในกระบวนการหลายอย่าง เช่น การดูดซึมก๊าซ (gas absorption) การเพิ่มความชื้น (humidification) การอบแห้ง (drying)
2. A และ B แพร่ทั้งคู่ในทิศทางตรงข้ามกัน เช่น ในกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์ (distillation)

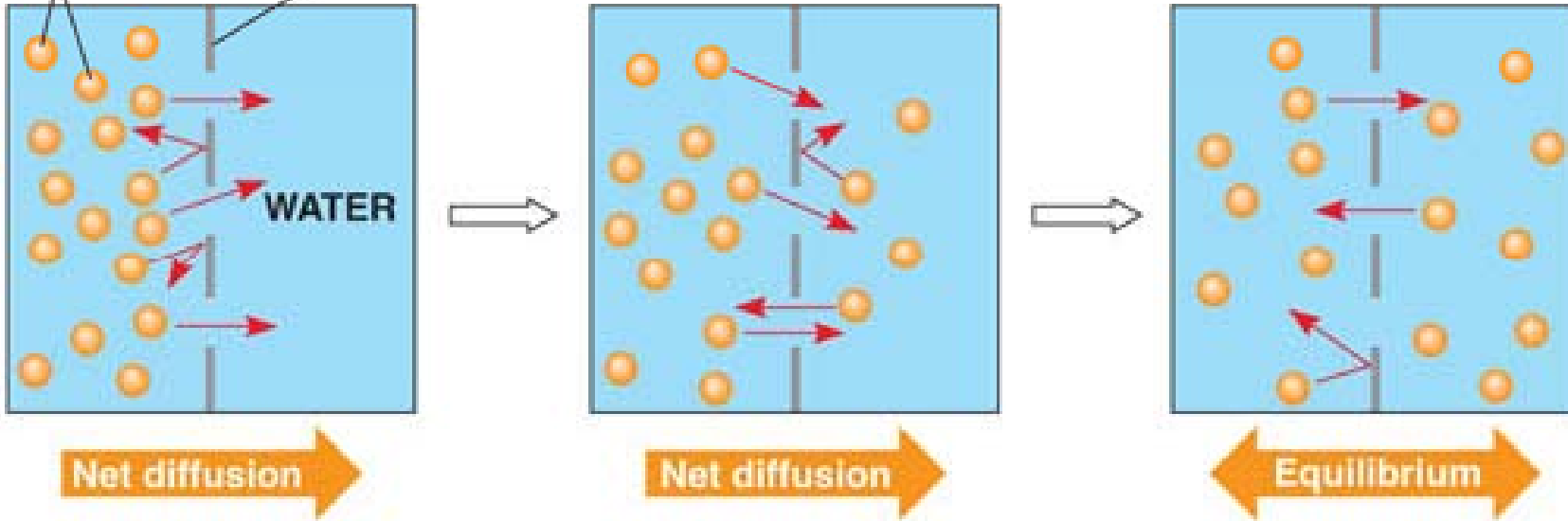




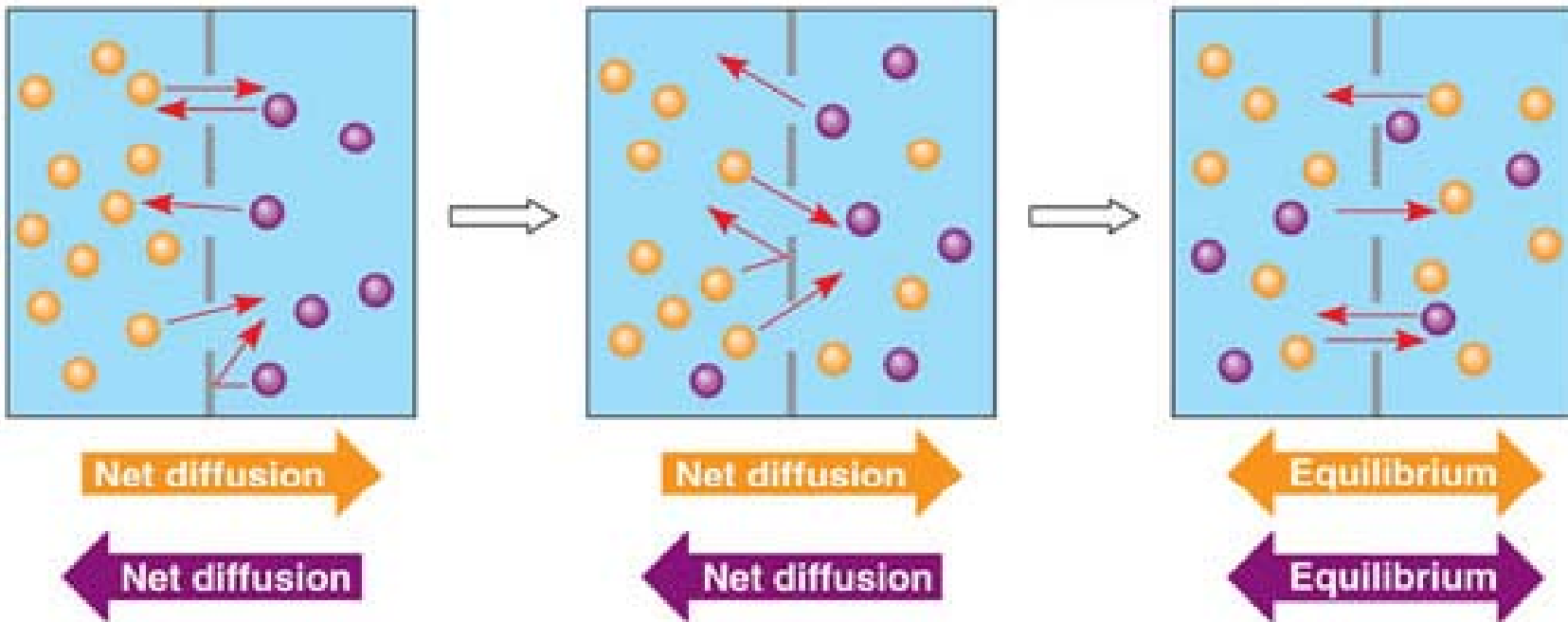


Molecules of dye Membrane (cross section)

(a) Diffusion of one solute



(b) Diffusion of two solutes

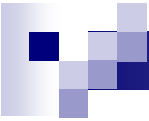


กระบวนการแพร่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์
จากกฎของฟิค (Fick's law) ที่กล่าวไว้ว่า

“ฟลักซ์เชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่ขององค์ประกอบหนึ่ง เป็นสัดส่วน
กับความแตกต่างของความเข้มข้น”

นั่นคือ

$$\frac{m}{A} = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)$$


$$\frac{m}{A} = -D \left[\frac{\partial c}{\partial x} \right]$$

เมื่อ

m = อัตราการไหลของมวล หน่วยคือ.....

A = พื้นที่ หน่วยคือ.....

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร ผ่านตัวกลาง หน่วยคือ m^2/s

c = ความเข้มข้นของมวลวสสน

x = ระยะห่างระหว่างความเข้มข้น 2 จุดที่กำลังพิจารณา

ถ้าโมเลกุล A เป็นก๊าซ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในก๊าซ >



สัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว >



สัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้น ส่วนในกรณีของก๊าซ
นั้นความดันจะมีผลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซบางชนิดในน้ำอุณหภูมิ 20 °C

ก๊าซ	D x 10 ⁹ (m ² /s)
ammonia	1.8
Carbon dioxide	1.8
chlorine	1.6
hydrogen	5.3
nitrogen	1.9
oxygen	2.1

หมายเหตุ: ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณค่า D ได้ดังต่อไปนี้

$$D_T = D_{20} [1 - 0.02(T-20)]$$

กรณีการแพร่แบบสถานะคงตัวของก๊าซและของเหลวผ่านของแข็ง

(steady-state diffusion of gases and liquids through solids)

กรณีการแพร่ของโมเลกุลก๊าซ **A** ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง **B** และ
สมมติว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นความเข้มข้น จะได้ว่า

$$\frac{m_A}{A} = -D_{AB} \left(\frac{dc_A}{dx} \right)$$

D_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซหรือของเหลว **A** ในของแข็ง **B**



หลังจากอินทิเกรตสมการแล้วจะได้ว่า

$$\frac{m_A}{A} = \frac{D_{AB} (C_{A1} - C_{A2})}{(x_2 - x_1)}$$

$$D_{AB} = \frac{m_A (x_2 - x_1)}{A(C_{A1} - C_{A2})}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)

k_m คืออัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยความแตกต่างของความเข้มข้น

$$k_m = \frac{m_A}{A (C_{A1} - C_{A2})}$$

การถ่ายเทมวลนี้หมายความรวมถึงทั้งการแพร่ และการพา

ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลคือ
สัมประสิทธิ์การแพร่ ความเร็วของของไหล (u) ความหนาแน่นของของ
ไหล (ρ) ความหนืดของของไหล (μ) ขนาดของระยะทาง (d)

ค่าตัวแปรของปัจจัยเหล่านี้ เราสามารถนำมาจัดให้อยู่ด้วยกัน เพื่อสร้างเป็นตัวเลขที่ไม่มีมิติที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารได้ดังนี้

Sherwood number;

$$N_{sh} = \frac{k_m d}{D_{AB}}$$

เปรียบเทียบความต้านทานการพา
มวลต่อความต้านทานการแพร่

Schmidt number;

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

แสดงอัตราส่วนระหว่างสภาพการ
แพร่โมเมนตัมกับสัมประสิทธิ์การ
แพร่มวล

Reynolds number;

$$N_{re} = \frac{\rho u d}{\mu}$$

การถ่ายเทมวลระหว่างเฟส (interphase mass transfer)

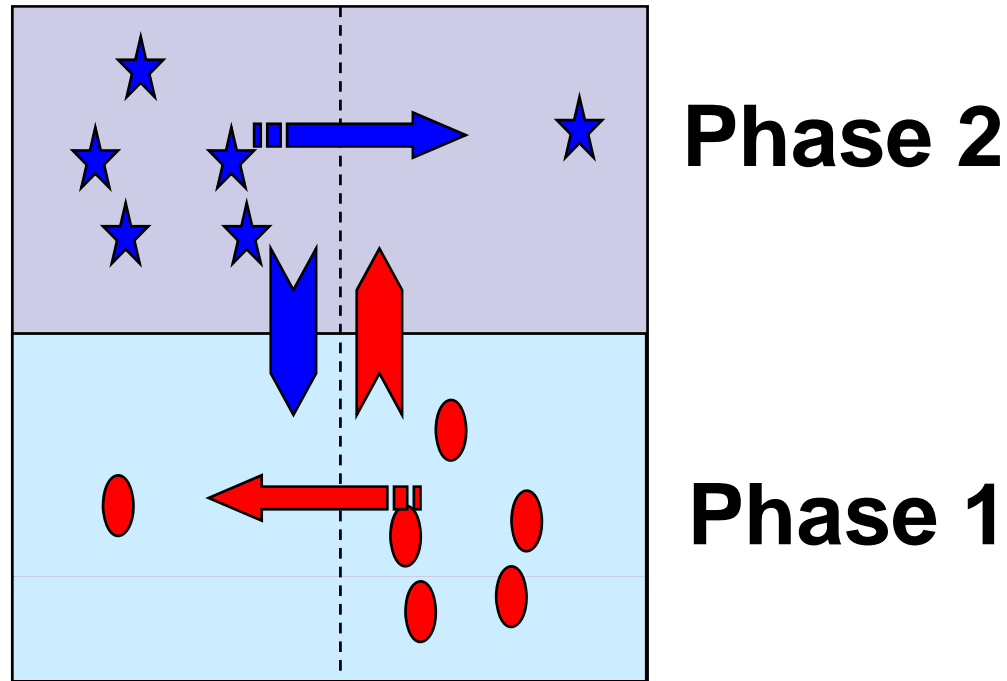
เฟส (phase) คือ ส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยตลอดและแยกออกจากเฟสอื่น ๆ ของระบบ

รอยต่อระหว่างเฟสเรียกว่า interface



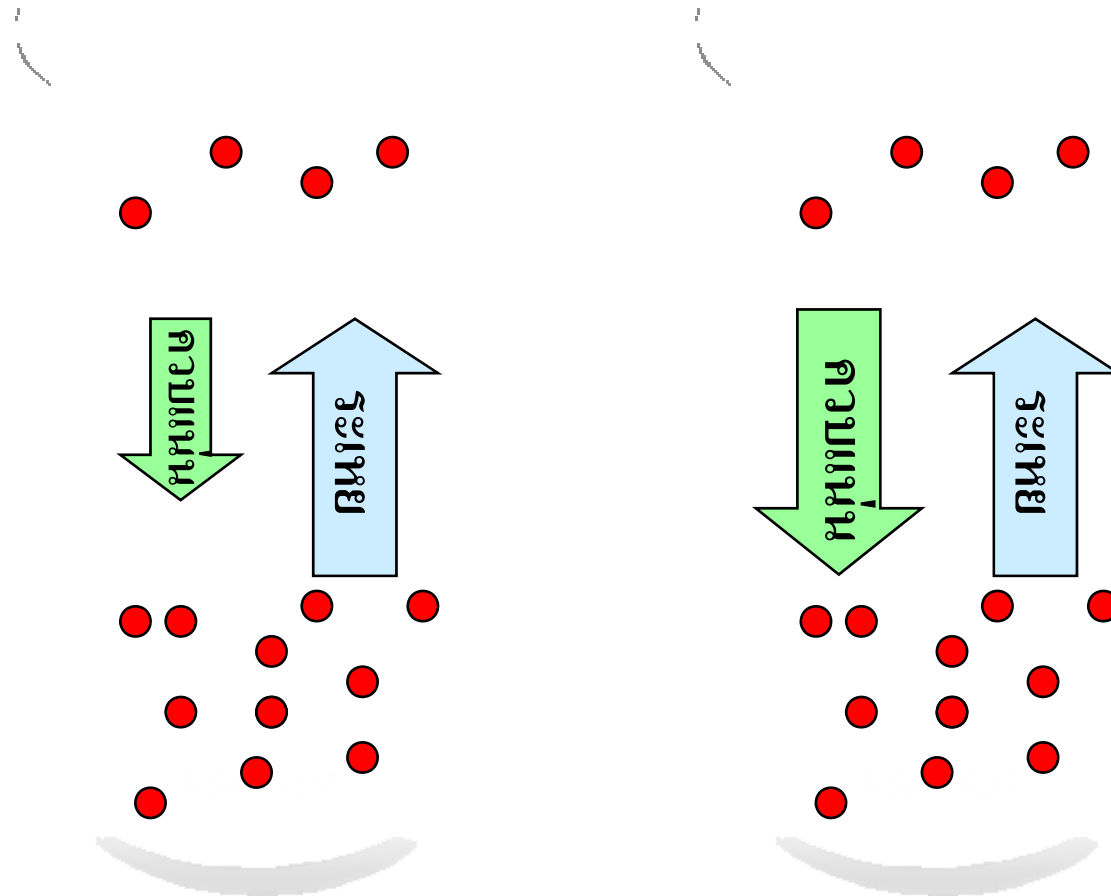
การถ่ายเทมวลภายในเฟสเป็นกลไกอื่นเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นภายในเฟส


การถ่ายเทมวลระหว่างเฟสเป็นกลไกอื่นเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยของแต่ละเฟส



ตัวอย่างเช่น (ระบบปิด)

การถ่ายเทแอมโมเนียระหว่างเฟสก๊าซ (อากาศ) และเฟสของเหลว (น้ำ)





แอมโมเนียซึ่งละลายน้ำได้ดีก็จะถูกถ่ายเทไปยังน้ำ ในขณะที่เดียวกันน้ำก็ระเหยไปยังก๊าซเฟส เมื่อระบบอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ในที่สุดระบบก็จะเข้าสู่สมดุล นั่นคือ โมเลกุลของน้ำกลายเป็นไอด้วยอัตราเร็วเท่ากับ การกลั่นตัวของไอน้ำ ในทำนองเดียวกันอัตราที่โมเลกุลของแอมโมเนียละลายน้ำเท่ากับอัตราที่แอมโมเนียกลับเข้าสู่ก๊าซเฟส

อัตรานี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำและความดันไอของแอมโมเนียที่ภาวะสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำและก๊าซเฟสจะมีค่าคงที่

ถ้ามีการเติมก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเข้าไปในระบบ สมดุลของระบบจะเลื่อนไป แล้วเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง โดยความดันไอย่อยของแอมโมเนียในก๊าซเฟสจะเปลี่ยนไปจากค่าเดิม



ดังนั้น ในสถานะที่เกิดความสมดุลระหว่างเฟสนั้น สิ่งที่เกิดขึ้นคือ

“อัตราการถ่ายเทมวลสุทธิเท่ากับศูนย์”

กลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส สามารถอธิบายได้โดย
ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-resistance theory)

ทฤษฎีสองความต้านทาน ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. การถ่ายเทมวลจากภายในเฟสที่หนึ่งไปยัง interface
2. การถ่ายเทข้าม interface
3. การถ่ายเทจาก interface ไปยังภายในของเฟสที่สอง

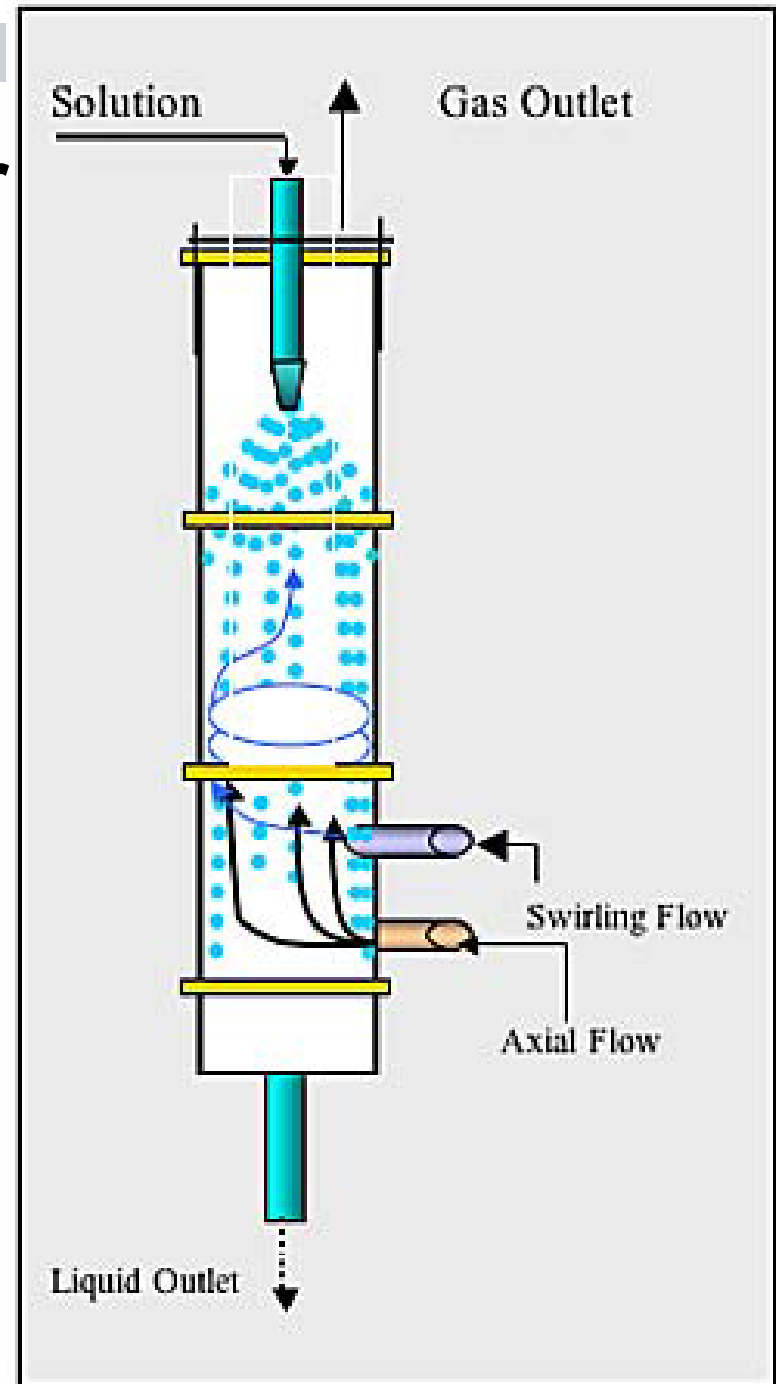
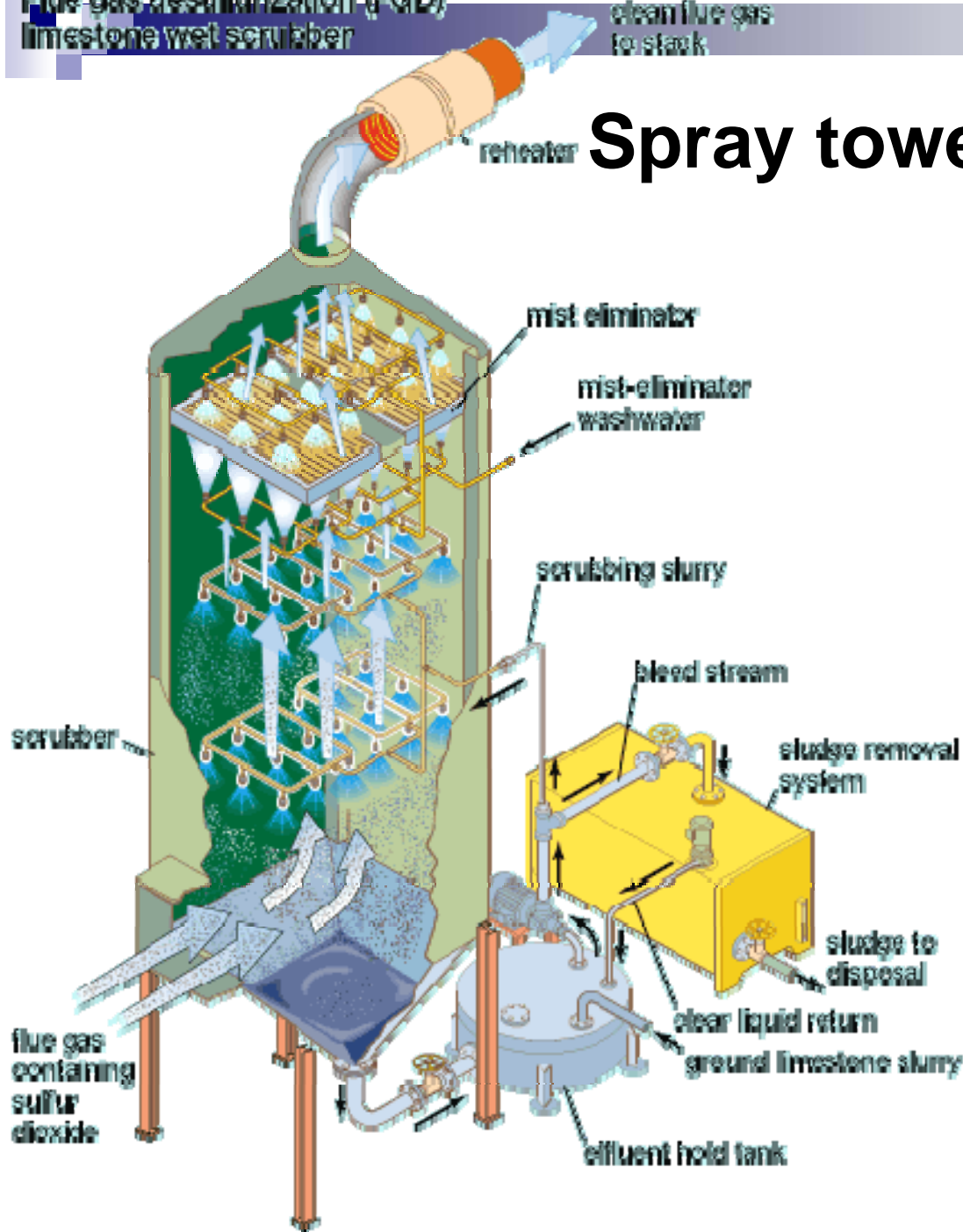
ตัวอย่างกระบวนการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองเฟส

- ตัวอย่างการถ่ายเทจาก gas phase ไปยัง liquid phase เช่น การดูดซับก๊าซ (gas absorption) การลดความชื้น (dehumidification) การกลั่น (distillation)
- ตัวอย่างการถ่ายเทจาก liquid phase ไปยัง gas phase เช่น การเพิ่มความชื้น (humidification)
- ตัวอย่างการถ่ายเทจากของเหลวหนึ่งไปอีกของเหลวหนึ่งที่ไม่ละลายกัน ได้แก่ การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction)
- ตัวอย่างการถ่ายเทจากของแข็งไปยังของเหลว ได้แก่ การอบแห้ง การชะ (leaching)
- ตัวอย่างการถ่ายเทจากของไหลไปยังพื้นผิวของของแข็ง ได้แก่ การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน

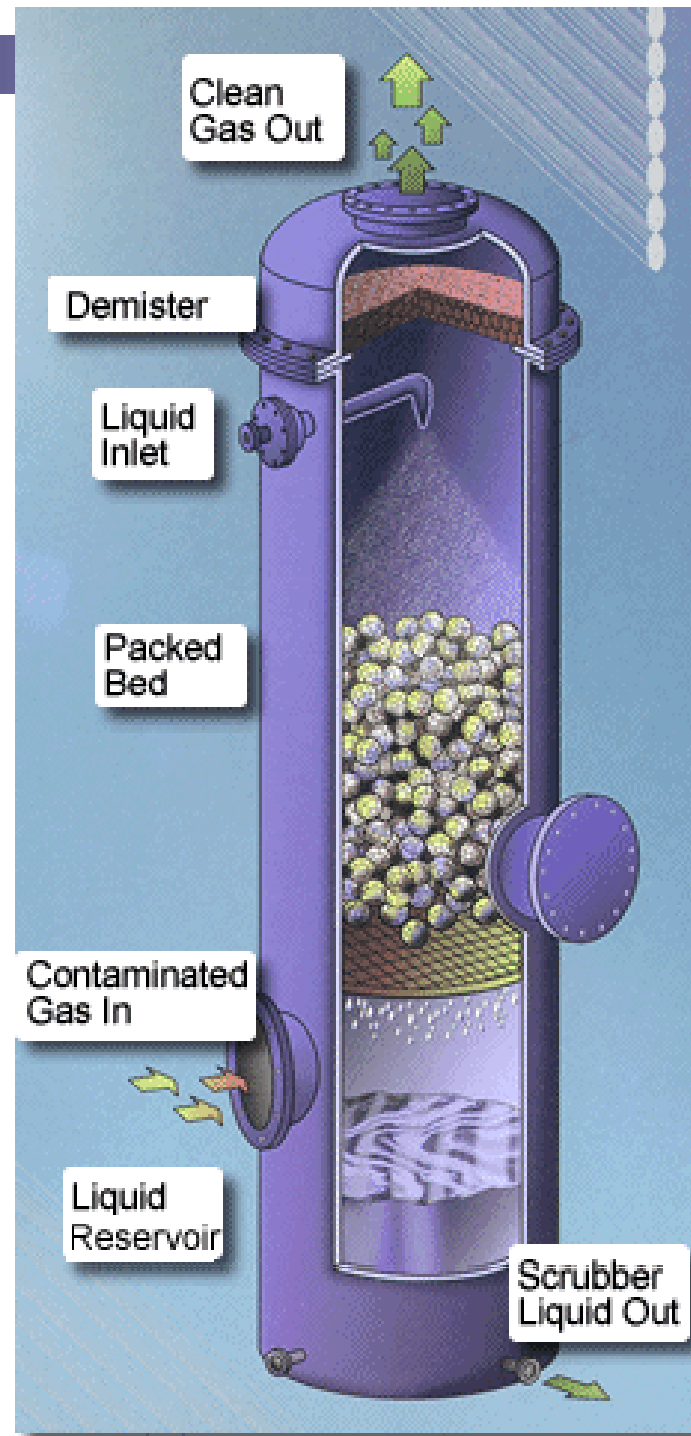
Flue gas desulfurization (FGD)
limestone wet scrubber

clean flue gas
to stack

Spray tower



Packed tower



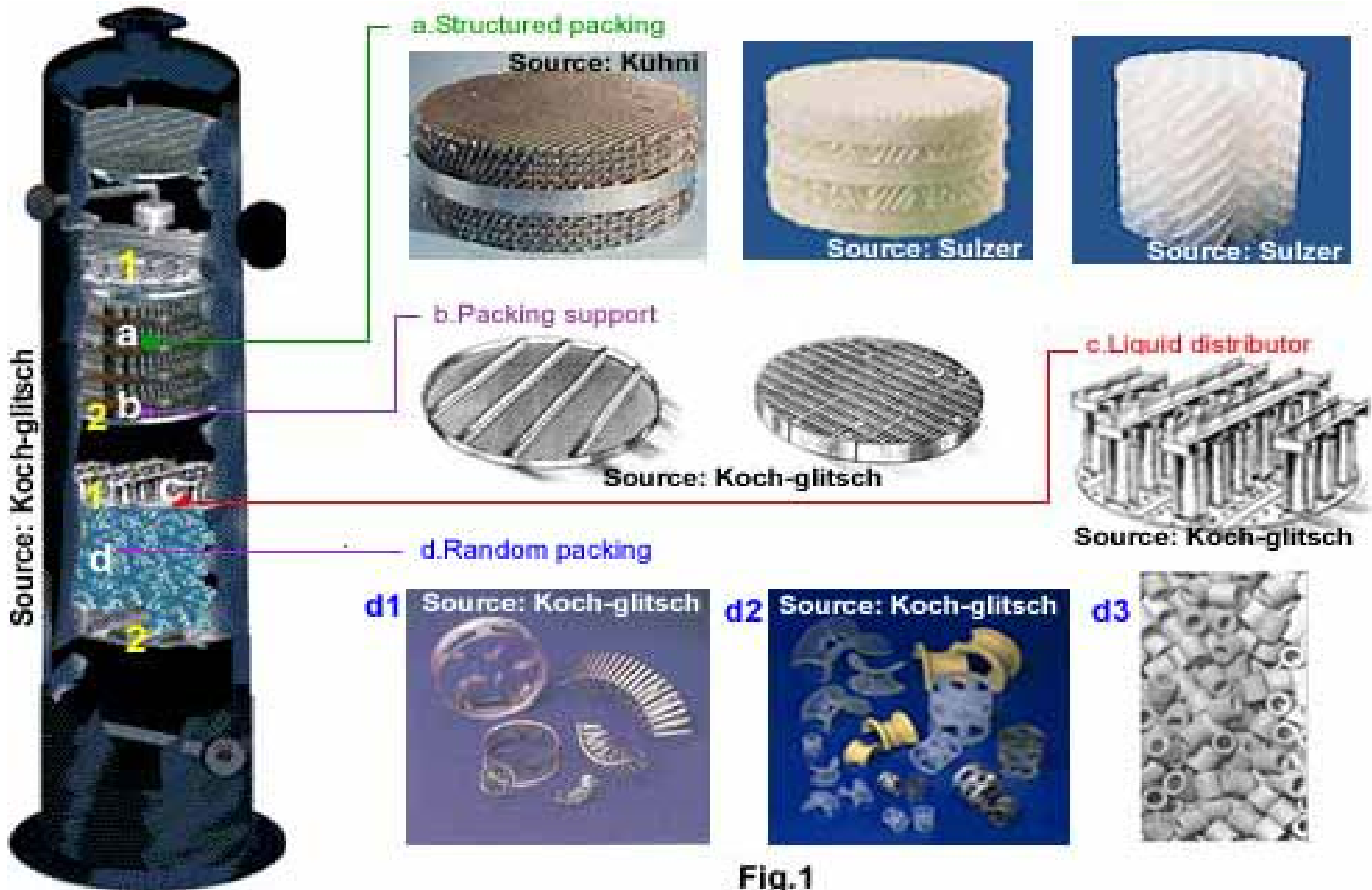


Fig.1

Sieve-plate tower

