บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

1.การศึกษารูปแบบการไหลของของเหลวในหอดูดซึมแบบแพค ระดับอุตสาหกรรม

จากการทดลองใช้สารละลายรีซเดียมเป็นเทรเซอร์ เข้าไปในหอดูดซึมแบบแพค แล้วทำการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ในกรดไนตริคทางด้านล่างหอดูดซึมตามช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตลงบนกราฟ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 พบว่า แบบจำลองการไหลของของเหลวในหอดูดซึมแบบแพคระดับอุตสาหกรรมที่ใช้อยู่นั้น น่าจะมีรูปแบบการไหลเป็นแบบถังกวนต่ออนุกรมกัน 4 ใบ โดยที่ขนาดของปฏิกรณ์มีขนาดเท่ากันทุกใบ (Tank in Series) โดยอาศัยหลักการทางด้านจลนพลศาสตร์เชิงเคมีและทางไดนามิคส์ของ ศ.ดร.ปิยะสาร จะได้ค่า Transfer Function ออกมาดังนี้

$$G(p) = \frac{1}{(\tau_I P+1)^4}$$

จากการแปลงลาปลาซของ Transfer Function จะได้ว่า

$$E_{(\theta)} = \frac{K(K\theta)^{K-1}}{(K-1)!} e^{-K\theta}$$

เมื่อ $K = 4$ จะได้

$$E_{(\theta)} = \frac{4(4\theta)^3 e^{-4\theta}}{3!}$$

$$= 2/3 \ (4\theta)^3 e^{-4\theta}$$

และหาค่า θ_{max} ได้จากการดิฟเฟอเรนชิเอทสมการ $E_{(\theta)}$ ข้างบนจะได้ว่า

$$\theta_{max} = \frac{K-1}{K}$$

$$= \frac{4-1}{4}$$

$$= 0.75$$

2.การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหอดูดซึม NO_x ระดับอุตสาหกรรม

2.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพของหอดูดซึม NOx ระดับอุตสาหกรรม

จากการทดลองวัดความเข้มข้นของก๊าซขาเข้า และก๊าซขาออกจากหอดูดซึม เพื่อหาประสิทธิภาพของหอดูดซึม เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซต่างๆ กัน เป็น 904, 1,072 และ 1,232 ลบ.ม./ชม. โดยให้อัตราการไหลของของเหลวคงที่นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 พบว่า กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยจะโค้งจากซ้ายลงมาทางด้านขวามือ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซึมของหอดูดซึมจะลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อความเร็วของก๊าซสูงขึ้นแล้วจะทำให้เวลาที่ใช้ในการสัมผัสกัน ระหว่างของเหลวกับก๊าซน้อยลง ก๊าซจะไหลผ่านออกไปจากหอดูดซึมแบบแพคอย่างรวดเร็วขึ้น ดังนั้นอัตราการแลกเปลี่ยนมวลสารจึงน้อยลงด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของหอดูดซึมลดน้อยลงตามไปด้วย แต่เมื่อทำการลดความเร็วของก๊าซลงไปจนถึงความเร็วของก๊าซที่จุดจุดหนึ่งพบว่าประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึง

แม้จะลดความเร็วก๊าซต่ำกว่าความเร็วก๊าซที่จุดจุดนี้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหอดูดซึมก็ไม่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วยนอกจากนี้ ยังพบว่าที่อัตราการไหลของของเหลวต่าง ๆ กัน ประสิทธิภาพของหอดูดซึมก็ต่างกันด้วยแต่มีแนวโน้มแบบเดียวกัน กราฟของอัตราการไหลของของเหลวที่สูงน่าจะอยู่เหนือเส้นโค้งที่อัตราการไหลต่ำกว่า กล่าวคือ เส้นโค้งของอัตราการไหล 418 l/m จะอยู่สูงกว่าเส้นโค้งที่อัตราการไหล 335 l/m เป็นต้น

2.2 <u>ผลของอัตราการไหลของของเหลวต่อประสิทธิภาพของหอดูดซึม NOx ระดับอุตสาหกรรม</u>

จากการทดลองเปลี่ยนอัตราการไหลของของเหลว เป็น 252 , 335 , 418 และ 468 l/m. ที่ความเร็วก๊าซคงที่ พบว่า เมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซึมจะเพิ่มมากขึ้นตามด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กราฟจะค่อยๆ สูงขึ้นเป็นเส้นโค้งทอดจากซ้ายมือไปทางขวามือและค่อยๆ ราบ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้อัตราการไหลของของเหลว จะเพิ่มมากขึ้นอีกเท่าไรก็ตาม และพบว่าอัตราการไหลของก๊าซต่ำ กราฟจะอยู่เหนือเส้นโค้งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับประสิทธิภาพของอัตราการไหลของก๊าซที่สูงกว่า กล่าวคืออัตราการไหลของก๊าซที่ 904 $M^3/hr.$ เส้นโค้งจะอยู่เหนือเส้นโค้งของอัตราการไหลของก๊าซที่ 1,072 และ 1,232 $M^3/hr.$ ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการไหลของของเหลวที่มากขึ้นจะทำให้ของเหลวกระจายอยู่ภายในหอดูดซึมได้มากขึ้น กล่าวคือของเหลวจะเปียกพื้นผิวของแพคกิ้งได้มากขึ้น ทำให้มีปริมาณของเหลวที่สัมผัสกับก๊าซได้มากขึ้นตามพื้นที่ผิวของแพคกิ้งที่เปียกนั่นเอง การแลกเปลี่ยนมวลสารก็จะมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่ออัตราการไหลของของเหลวถึงจุด ๆ หนึ่งจะมีผลน้อยมากต่ออัตราการแลกเปลี่ยนมวลสาร ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของเหลวส่วนหนึ่ง จะไหลออกจากหอดูดซึมอย่างรวดเร็วตามความเร็วของของเหลวที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง และมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

2.3 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อประสิทธิภาพ ของหอดูดซึม NOx ระดับอุตสาหกรรม

จากการทดลอง เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริคจาก 1-2 % เป็น 6.27,9.31 และ 27.16 % w/w โดยให้อัตราการไหลของของเหลวและของก๊าซคงที่ที่ 466 ลิตร/นาที และ 1,072 ลบ.ม/ชม. ตามลำดับ จะพบว่าผลการทดลองแสดงไว้ตามตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 นั้น เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริคเพิ่มขึ้นแล้ว ประสิทธิภาพในการดูดซึมของหอดูดซึมจะลดลงซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของก๊าซและอัตราการไหลของของเหลว จะพบว่าความเข้มข้นของกรดไนตริคจะมีผลต่อประสิทธิภาพของหอดูดซึมมากกว่าอัตราการไหลของก๊าซ และของเหลว ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไนตริคต่างกันเล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของกรดไนตริคต่ำ ๆ กลไกควบคุมการถ่ายเทมวลสารจะเข้าใกล้การดูดซึมโดยตรง และเป็นปฏิกิริยาของ NO_2 ตามที่ Andrew และ Hanson ได้กล่าวไว้ แต่ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริคสูงๆ แล้ว HNO_2 สลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะไปมีผลต่อปฏิกิริยาหลังๆ ทำให้มีผลต่อการดูดซึมมาก

3.การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการแลกเปลี่ยนมวลสารกับประสิทธิภาพของหอดูดซึม NO_x ระดับอุตสาหกรรม

จากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมแบบไม่มีปฏิกิริยาและแบบมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นด้วย พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมแบบมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะมีค่ามากกว่าแบบไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหอดูดซึมกับสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลรวม ($K_La\Gamma_L$) ในเฟสของเหลว ทั้งแบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น (ดังแสดงใน

รูปที่ 4.5) และแบบที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) จะพบว่า กราฟทั้งสองรูปมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เริ่มจากจุดกำเนิดลาดชันสูงขึ้นตามแกน y ซึ่งเป็นแกนของประสิทธิภาพ จากนั้นความลาดชันจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งคงที่ในที่สุด นั่นคือ ในช่วงแรกเมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่ำ ประสิทธิภาพของหอดูดซึมก็ต่ำด้วย แต่เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากขึ้น ประสิทธิภาพของหอดูดซึมก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่เป็นการเพิ่มขึ้นโดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ เช่น เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเปลี่ยนไปจาก 0 เป็น 0.002 ประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 37 % ซึ่งประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 37 % แต่เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.002 เป็น 0.004 แล้ว พบว่าประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะเพิ่มขึ้นจาก 37 % เป็น 45 % ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียง 8 % ถึงแม้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเท่ากัน คือ 0.002 ก็ตาม ในช่วงต่อมาของกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะมีค่าคงที่อยู่ประมาณ 75 %

สำหรับผลการคำนวณหา สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ ตามสมการของออนดากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม $K_La\mathcal{T}_L$ จะพบว่ามีค่าต่างกันกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมตามรูปแบบการไหลของของเหลวและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของนายมิลเลอร์ และแนวโน้มของกราฟก็ต่างกันด้วย โดยแนวโน้มของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทมวลเฉพาะที่ ตามสมการของออนดากับประสิทธิภาพของหอดูดซึมดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะมีกราฟเป็นลักษณะเส้นตรงเอียงจากด้านซ้ายมือลงมาทางด้านขวามือ กล่าวคือ เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่เพิ่มขึ้นแล้วประสิทธิภาพของหอดูดซึมจะลดลงในอัตราที่คงที่ เหตุที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทมวลเฉพาะที่ของสมการออนดากับประสิทธิภาพของหอดูดซึมต่างไปจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทมวลรวม กับประสิทธิภาพของหอดูดซึม อาจเนื่องมาจากสมการของออนดาเป็นสมการซึ่งอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของหอดูดซึมของก๊าซและของของเหลวมาใช้ในการคำนวณโดย

ไม่ได้ใช้อัตราการถ่ายเทมวลสารที่ได้จากการทดลองจริงมาคำนวณ (เนื่องจากไม่สามารถวัดเฉพาะจุดได้) จึงทำให้กราฟที่ได้มีแนวโน้มต่างกันนั่นเอง

4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของหอดูดซึมแบบต่าง ๆ ในระดับอุตสาหกรรมและจากห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของ N_2O_4 ที่คำนวณได้กับความเข้มข้นของกรด พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดต่ำกว่า 6 % w/w สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของหอแบบสีฟเพลทจะมีค่าสูงกว่าของหอแบบแพคและแบบบับเบอส์แคปเพลท แต่ที่ความเข้มข้นของกรดมากกว่า 6 % w/w แล้วพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของหอแบบแพคจะมีค่าสูงกว่าหอแบบสีฟเพลท และแบบบับเบอส์แคปเพลทตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของหอดูดซึมที่ต่างกัน โดยหอดูดซึมแบบบับเบอส์แคบจะมีการกระจายตัวของก๊าซที่เข้าไปไม่ค่อยสม่ำเสมอ และการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวมีค่าน้อยกว่าแบบสีฟและแบบแพค และหอแบบแพคจะเกิดการกระจายตัวของก๊าซดีกว่าหอแบบอื่นๆ และการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวก็มีตลอดทั้งหอที่บรรจุแพคกิ้ง จึงทำให้การสัมผัสมีมากกว่าหอดูดซึมอีกสองแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

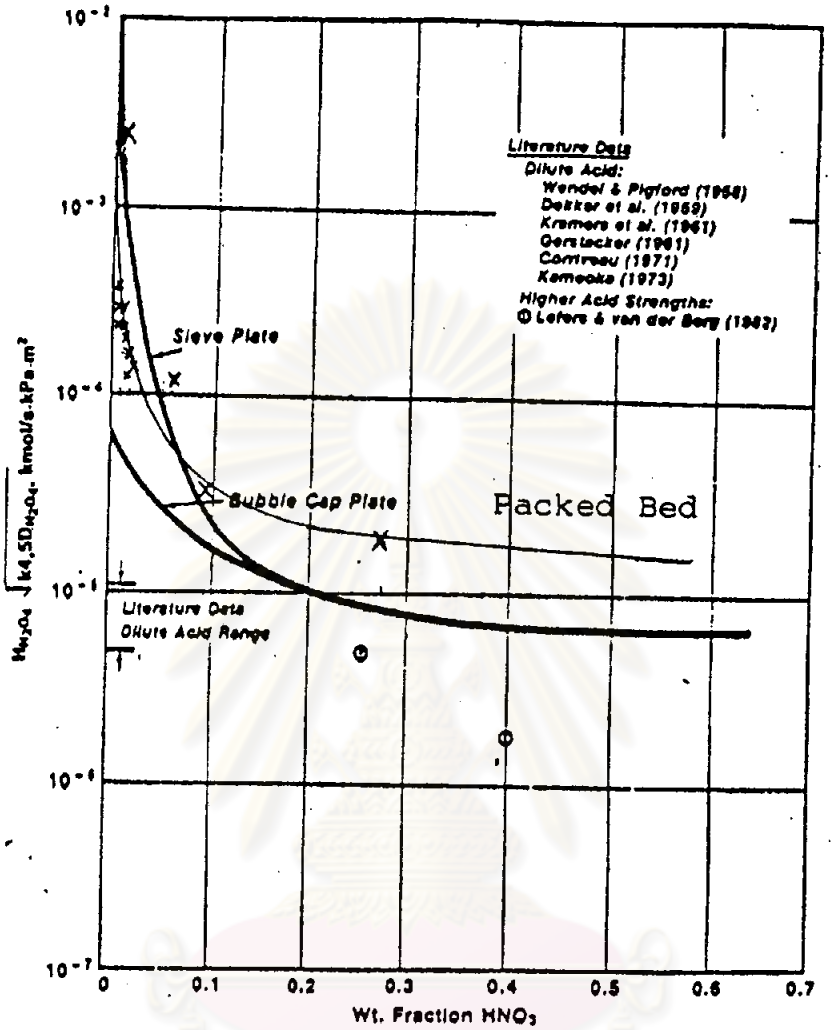

Figure 5. N_2O_4 mass transfer coefficients vs. nitric acid strength at 25°C.

รูปที่ 5.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของ N_2O_4 กับความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ 25 ^0C

ภาพแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของ N_2O_4 ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่าง ๆ กัน ในหอดูดซึมแบบเพคระดับอุตสาหกรรมซึ่งใช้ในการวิจัย กับหอดูดซึมแบบสีพเพลทและบับเบอล์แคปในอุตสาหกรรมที่ Miller ได้ใช้ในการทดลอง เปรียบเทียบกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้ ในภาพที่ 5.1 ยังแสดงให้เห็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในช่วงกรดเจือจางของบุคคลอื่นๆ ด้วย และข้อมูลในช่วงของกรดเข้มข้นอีก 2 ค่า (Lefers และ Vander Berg) ข้อมูลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้จากในอุตสาหกรรมจะมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่ผ่านๆ มา ณ ความเข้มข้นของกรดที่เท่าๆ กัน เพราะการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สนใจพจน์แรงขับย้อนกลับ (reverse driving force) ของปฏิกิริยาในเฟสของเหลว นอกจากนี้ในการทดลองเล็กๆ มักจะใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซเจือจาง NOx แทนที่จะใช้อากาศ แต่การทดลองในอุตสาหกรรมจะใช้อากาศซึ่งมีออกซิเจนด้วยเป็นก๊าซนำพา ซึ่งออกซิเจนจะเป็นตัวช่วยทำให้การถ่ายเทมวลของ N_2O_4, N_2O_3 และ NO_2 สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดออกซิเดชั่นของ HNO_2 ในเฟสของเหลว และอีกเหตุผลหนึ่งคือเวลาที่ใช้ในการสัมผัสกันระหว่างเฟสของหอดูดซึมในห้องปฏิบัติการ และในอุตสาหกรรมนั้นต่างกัน การทดลองในห้องปฏิบัติการมักให้การสัมผัสกันระหว่างเฟสนั้น เป็นแบบลามินาร์ฟิล์ม (laminar film)ซึ่งมักจะหยุดนิ่ง แต่ในหอแบบแพคที่ใช้ในรงงานอุตสาหกรรมนั้นของเหลวจะถูกพ่นลงมาเป็นละอองฝอย ๆ และไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของก๊าซ นอกจากนั้นหอดูดซึมแบบแพคในอุตสาหกรรมนั้นจะมีพื้นที่ผิวที่เปียกของหอดูดซึมกับแพคกิ้งมากกว่า พื้นที่ผิวที่เปียกของหอดูดซึมในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้การสัมผัสกันระหว่างเฟสของเหลวและเฟสก๊าซในหอดูดซึมระดับอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น จึงช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย