

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษากายถ่ายเทไอโซนในระบบการไหลแบบแนวระนาบ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการพิจารณารูปแบบการไหลของของไหลในท่อรวมถึงผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหล และส่วนที่สองเป็นการศึกษาความเข้มข้นของไอโซนในน้ำที่ไหลในท่อและผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อความเข้มข้นของไอโซนในน้ำที่ไหลในท่อ

4.1 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อ

การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวที่ไหลในท่อและป้อนอากาศเข้าสู่ระบบโดยใช้ปั๊ม เปิดเครื่องทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาทีก่อนทำการศึกษา ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแบบการไหลของระบบของไหล 2 ภูมิภาคในท่อ พบว่าในช่วงที่ทำการทดลองสามารถจำแนกรูปแบบการไหลโดยรวมออกได้เป็น 6 รูปแบบ ได้แก่

ก. Stratified flow

การไหลที่ภูมิภาคของเหลวในท่อแยกจากกันกับภูมิภาคก๊าซอย่างชัดเจน กล่าวคือของเหลวไหลอยู่ทางด้านล่างของท่อและก๊าซไหลอยู่บริเวณส่วนบนของท่อ โดยบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคทั้งสองจะมีความต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรงตลอดแนวความยาวท่อ

ข. Wavy flow

รูปแบบการไหลแบบนี้เป็นรูปแบบการไหลที่คล้ายกับการไหลแบบ Stratified คือภูมิภาคน้ำกับภูมิภาคก๊าซแยกกันอย่างชัดเจน และบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคทั้งสองจะมีความต่อเนื่องกันและมีลักษณะเป็นคลื่นที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน

ค. Plug flow

รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซขนาดใหญ่รูปร่างยาวตามแนวท่อ เคลื่อนที่ไปตามกระแสการไหลบริเวณด้านบนของท่อ [Lewis และคณะ, 2002]

ง. Slug flow

รูปแบบการไหลที่มีการไหลที่ของเหลวในท่อเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นคลื่นขนาดใหญ่จนน้ำบริเวณส่วนยอดของคลื่นสามารถสัมผัสกับผิวท่อด้านบน และจะพบฟองก๊าซขนาดเล็กในบริเวณยอดคลื่นที่เกิดขึ้น [Lewis และคณะ, 2002]

จ. Plug-slug flow

รูปแบบการไหลแบบ plug-slug [Wong และ Yau, 1997] เป็นรูปแบบการไหลที่ผกผันระหว่างการที่มีฟองก๊าซเคลื่อนที่ตามกระแสการไหลกับการเกิดคลื่นในกระแสการไหล และบริเวณส่วนของของเหลวก่อนและหลังฟองก๊าซจะมีฟองก๊าซขนาดเล็กกระจายตัวอยู่

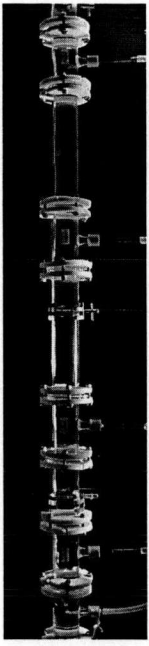



ฉ. Slug-wavy flow

รูปแบบการไหลแบบ slug-wavy [Zürcher และคณะ, 2002] เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในช่วงที่ slug กำลังเปลี่ยนแปลงไปเป็น wavy โดยของเหลวในท่อจะเคลื่อนที่โดยมีผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเป็นคลื่น และในบางครั้งคลื่นดังกล่าวจะมีความสูงมากจนส่วนยอดคลื่นสัมผัสกับผิวท่อด้านบน

ในการทดลองครั้งนี้ได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของก๊าซต่อของเหลว 8 อัตราส่วน ได้แก่ 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 โดยปริมาตร ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1


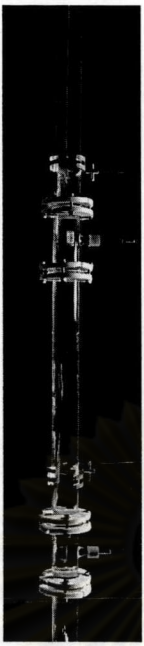


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการไหลของไหลในระบบ¹

อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว	อัตราการไหลของก๊าซ (ลิตรต่อวินาที)		อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อวินาที)		รูปแบบการไหล	รูปตัวอย่างแสดงรูปแบบการไหล
	0.075	0.219	0.520	0.821		
0.075	2.00	5.81	26.51	26.51	Stratified	
0.219	5.81	13.79	26.51	26.51	Plug	
0.520	13.79	21.76	26.51	26.51	Plug-slug	
0.821	21.76		26.51	26.51	Slug	

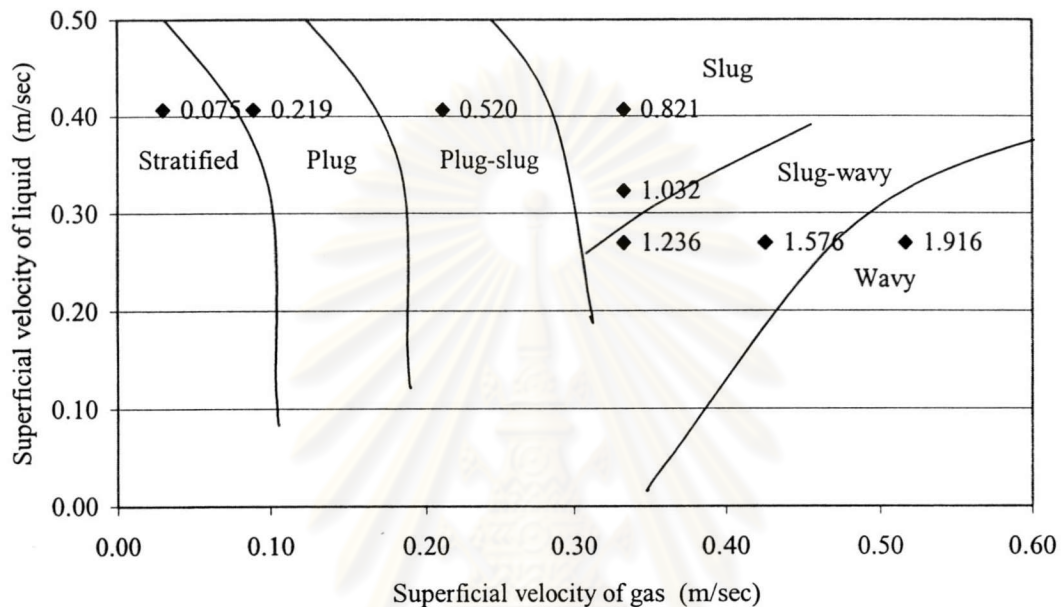
¹ รูปภาพแสดงลักษณะการไหลความละเอียดสูงได้มาจากผนวก ช.

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการไหลของไหลในระบบ (ต่อ)

อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว	อัตราการไหลของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)		อัตราการไหลของเหลว (ลิตรต่อนาที)		รูปแบบการไหล	รูปตัวอย่างแสดงรูปแบบการไหล
1.032	21.76	21.09			Slug	
1.236	21.76	17.60			Slug-wavy	
1.576	27.74	17.60			Slug-wavy	
1.916	33.72	17.60			Wavy	

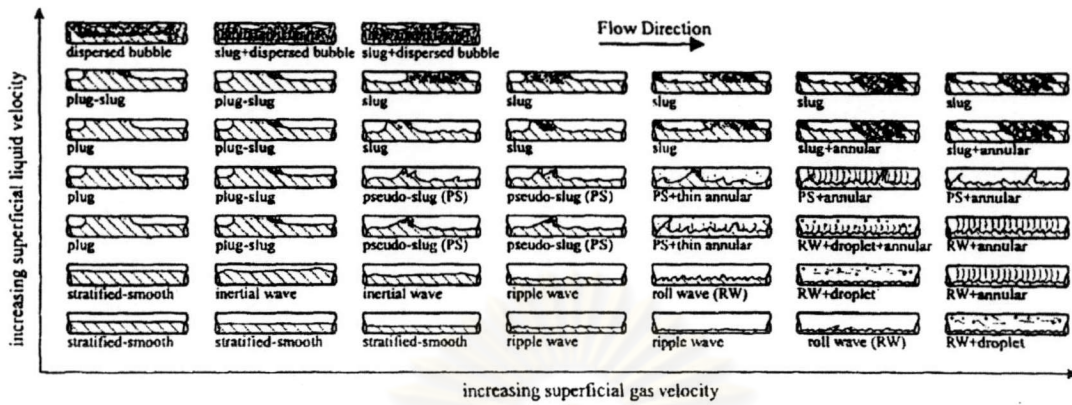
4.2 ผลของอัตราการใช้ที่มีต่อรูปแบบการไหลของของไหลในท่อ

จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง superficial velocity ของก๊าซและ superficial velocity ของของเหลว ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการไหลที่ได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการไหลของของไหลในระบบที่ทำการศึกษา

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเมื่อค่า superficial velocity ของก๊าซและของเหลวเปลี่ยนไปของระบบการไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบ โดยในช่วงแรกทำการทดลองที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวต่ำจากนั้นจะเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวให้สูงขึ้นโดยเพิ่มความเร็วในการไหลของก๊าซและกำหนดให้ความเร็วในการไหลของของเหลวคงที่ รูปแบบการไหลแบบ stratified จะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นแบบ plug และ slug ตามลำดับโดยผ่านช่วงที่มีการผสมระหว่าง plug กับ slug ที่เรียกว่า plug-slug [Wong และ Yau, 1997] หลังจากนั้นคงความเร็วในการไหลของก๊าซให้คงที่ แต่ลดความเร็วในการไหลของของเหลว ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงจาก slug ไปเป็นรูปแบบการไหลที่อยู่ในช่วงผสมระหว่าง slug กับ wavy ซึ่งจะเรียกว่า slug-wavy [Zürcher และคณะ, 2002] ซึ่งขณะที่ของไหลในระบบมีรูปแบบการไหลแบบ slug-wavy นี้ถ้าเพิ่มความเร็วของก๊าซให้มากขึ้นจะทำให้มีรูปแบบที่เข้าใกล้ wavy flow มากขึ้น โดยแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Wong และ Yau ดังรูปที่ 4.2 [Wong และ Yau, 1997]

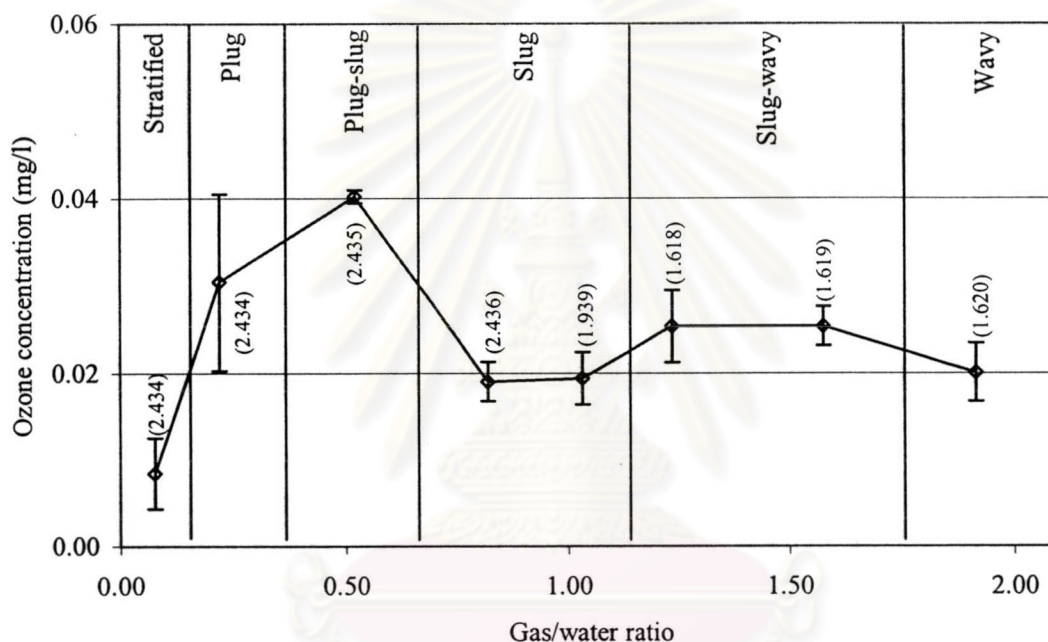


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของของไหล [Wong and Yau, 1997]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การถ่ายเทโอโซนในระบบการไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบ

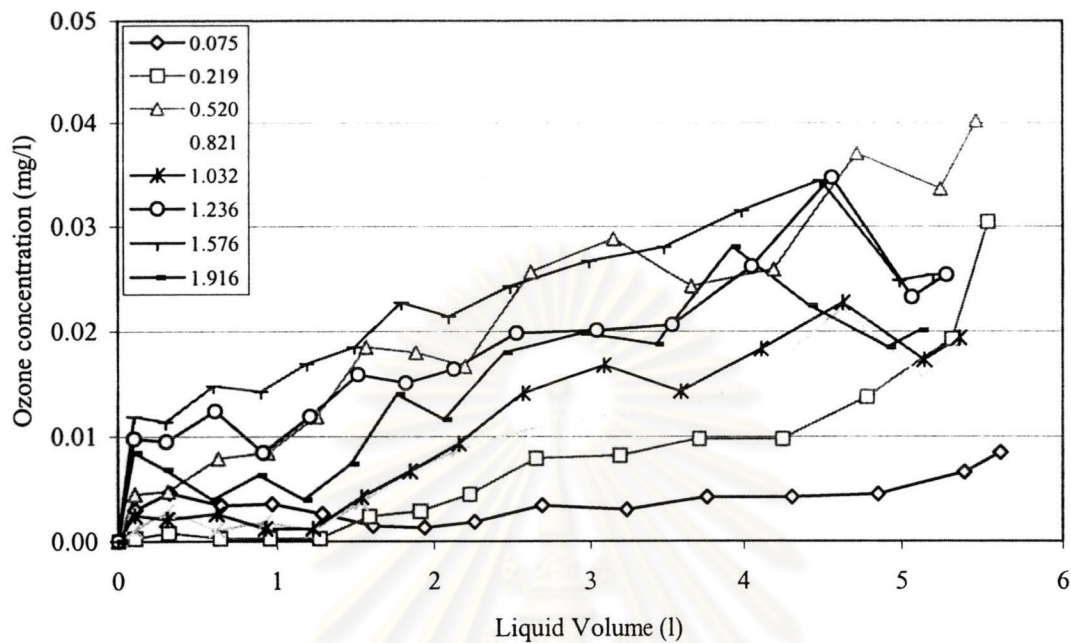
จากการทดลองการไหลของของไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบ โดยวัฏภาคของเหลวคือน้ำกลั่นและวัฏภาคก๊าซคือก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนโดยใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นก๊าซตั้งต้น เก็บตัวอย่างของเหลวที่ตำแหน่งต่างๆตามความยาวของท่อมาหาความเข้มข้นของโอโซนด้วยวิธีอินดิโกคอลลิเมตริก [APHA., 1989] จากนั้นทำทดลองซ้ำโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของก๊าซต่อของเหลว เพื่อเปลี่ยนรูปแบบการไหลของของไหลในท่อ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราส่วนการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm²)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการทดลองจะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวที่เปลี่ยนแปลง แต่ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวดังกล่าวนี้ไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณโอโซนทั้งหมดในวัฏภาคก๊าซที่ถ่ายเทลงในวัฏภาคของเหลวได้ ดังนั้นในการพิจารณาประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซนจึงต้องคำนึงถึงปริมาณโอโซนทั้งหมดที่ถ่ายเทจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว โดยสามารถแสดงได้ในรูปของน้ำหนักโอโซนที่ถ่ายเทจริงในช่วงความยาวท่อจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวที่ต่อไปนี้จะเรียกว่าปริมาณการถ่ายเทโอโซน ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของ

โอโซนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรของของเหลวดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4 โดยปริมาตรของของเหลวหาได้จากความเร็วในการไหลและพื้นที่หน้าตัดของของเหลวในระบบท่อที่จะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตร ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

ปริมาณการถ่ายเทโอโซนเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณโอโซนที่แท้จริงที่ถ่ายเทจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวเมื่อของไหลทั้งสองไหลผ่านระบบท่อในแนวระนาบซึ่งเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลของระบบท่อโดยรวม โดยจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าปริมาณการถ่ายเทโอโซนมีค่าแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อพิจารณาข้อมูลการทดลองจะพบว่าในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวนั้นไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านรูปแบบการไหลเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากค่าอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวดังกล่าวที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้แก่

ก. ความแตกต่างของความเข้มข้น

ความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร เพราะสารจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นผลต่างของความเข้มข้นจึงเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) ที่สำคัญในการถ่ายเทมวลสาร ทั้งนี้เมื่อสารมีการถ่ายเท

มวลเกิดขึ้น ความเข้มข้นของทั้งสองบริเวณก็จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนลดลง ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลง

ในปรับเปลี่ยนอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวในการทดลองครั้งนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากการปรับอัตราการไหลของก๊าซโดยคงอัตราการไหลของของเหลวให้คงที่ ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตไอโซนเปลี่ยนแปลงไป ก๊าซไอโซนที่ผลิตได้จะมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของก๊าซขาเข้าที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	ความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซ		อัตราการป้อนไอโซน (มิลลิกรัมต่ออนาที)
	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	
0.075	7.885	101.94	203.88
0.219	4.505	58.24	338.55
0.520	2.864	37.02	510.34
0.821	2.254	29.14	633.96
1.032	2.254	29.14	633.96
1.236	2.254	29.14	633.96
1.576	1.984	25.65	711.51
1.916	1.791	23.15	780.68

เนื่องจากความเข้มข้นของไอโซนในวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของเหลวมีค่าแตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้นในการหาค่าความแตกต่างของความเข้มข้นเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลของระบบจึงเลือกใช้ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic [Heyouni และคณะ, 2002] ของความเข้มข้นไอโซนในน้ำซึ่งหาได้จาก

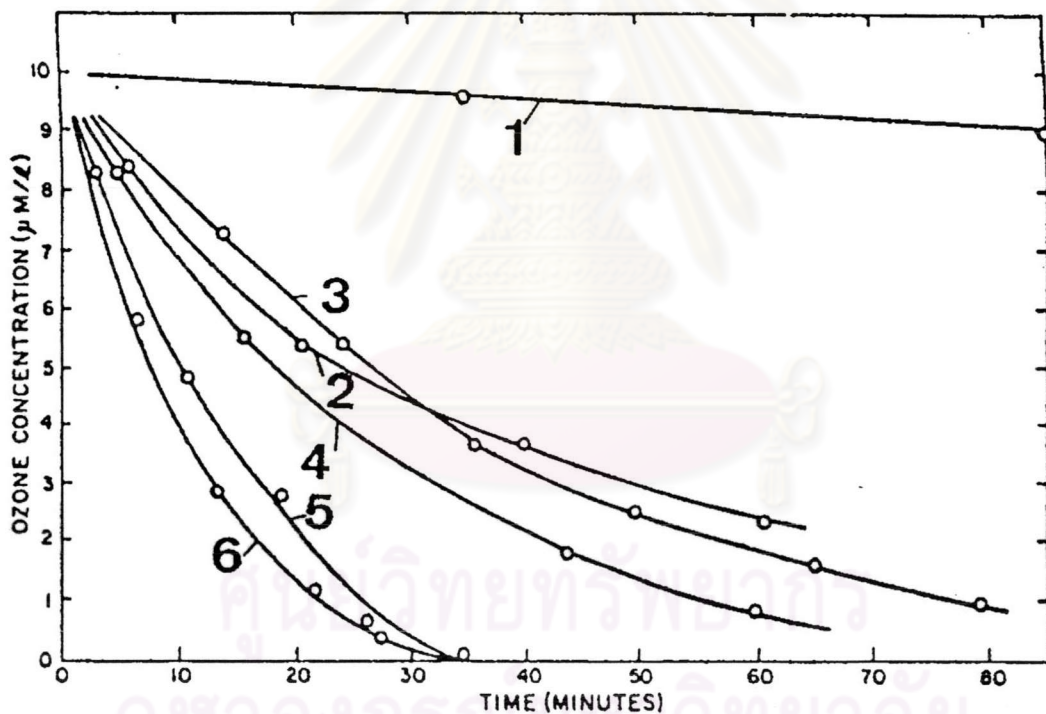
$$\Delta C_{\ln} = \frac{(C_{in}^* - C_{in}) - (C_{out}^* - C_{out})}{\ln \left(\frac{C_{in}^* - C_{in}}{C_{out}^* - C_{out}} \right)} \quad 4.1$$

โดย ΔC_{\ln} = ความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic

C_{in} = ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ

- C_{in}^* = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ
- C_{out} = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ
- C_{out}^* = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ

ทั้งนี้ค่า C_{in} และ C_{out} หาได้จากสมการมวลของโอโซนในระบบท่อภายใต้สมมุติฐานที่ว่าในช่วงเวลาที่ของไหลอยู่ภายในระบบ อัตราการสลายตัวของโอโซนในน้ำกลับมีค่าต่ำมากจนไม่ส่งผลให้ความเข้มข้นที่หาได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ สังเกตได้จากรูปที่ 4.5 ว่าที่เวลา 20 วินาทีซึ่งเป็นเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบท่อนานที่สุดในทุกช่วงการทดลอง (retention time) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำกลับมีค่าลดลงน้อยมาก

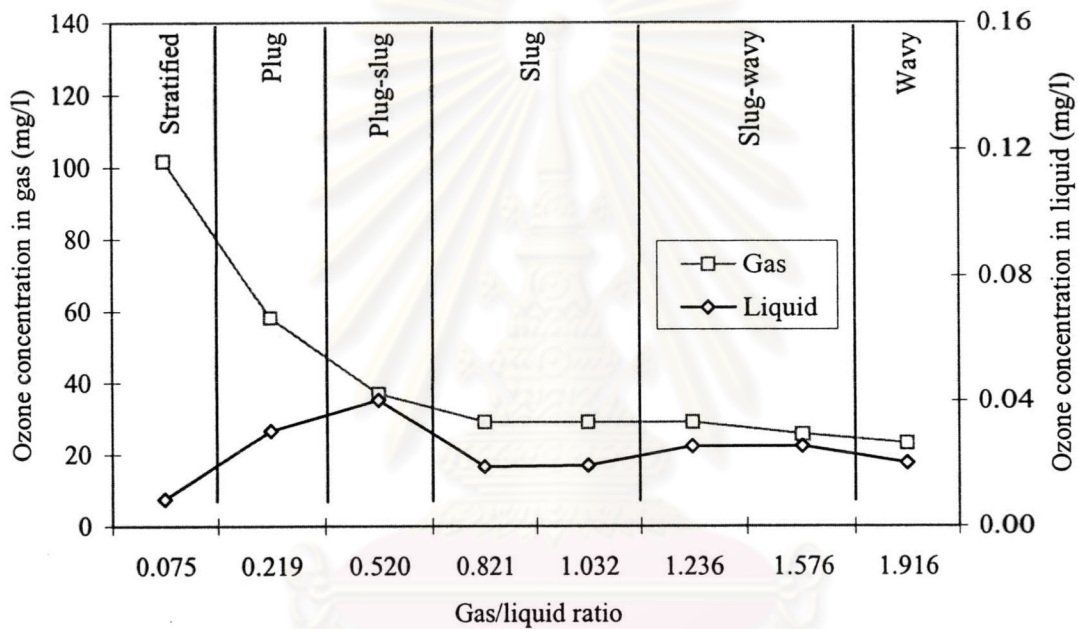


รูปที่ 4.5 อัตราการสลายตัวของโอโซนในน้ำชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [Rice และคณะ, 1986] (1 = น้ำกลั่นสองครั้ง (double-distilled water), 2 = น้ำกลั่น (distilled water), 3 = น้ำประปา (tap water), 4 = น้ำผิวดินที่มีความกระด้างต่ำ (low hardness groundwater), 5 = น้ำกรองจากทะเลสาบ Zurich (filtered water from Lake Zurich), 6 = น้ำกรองจากแม่น้ำ Bodensee (filtered water from the Bodensee))

ซึ่งค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ (C_{in}^* และ C_{out}^*) หาได้จากสมการระหว่างวิภาคตามกฎของเฮนรี

$$C_{in,out} = HC_{in,out}^* \quad 4.2$$

โดย $C_{in,out}^*$ = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ
 $C_{in,out}$ = ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซ
 H = ค่าคงที่ของเฮนรี



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซและในของเหลวภายหลังผ่านระบบท่อที่ทำการทดลองเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

ค่าความแตกต่างเชิงลอการิทึม logarithmic ของความเข้มข้นโอโซนเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น มีค่าแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของไอโซนในสายขาเข้าและขาออกและความแตกต่างของความเข้มข้นไอโซนที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	ความเข้มข้นของไอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	ขาเข้า		ขาออก		$(\Delta C)_m$
	ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว	
0.075	101.94	0.0	101.83	0.008	26.81
0.219	58.24	0.0	58.10	0.030	15.29
0.520	37.02	0.0	36.94	0.040	9.71
0.821	29.14	0.0	29.11	0.019	7.65
1.032	29.14	0.0	29.12	0.019	7.66
1.236	29.14	0.0	29.12	0.025	7.65
1.576	25.65	0.0	25.64	0.025	6.74
1.916	23.15	0.0	23.14	0.020	6.08

ข. อัตราการไหลของของไหล

อัตราการไหลของของไหลในระบบสามารถแยกได้เป็นอัตราการไหลของก๊าซและอัตราการไหลของของเหลว การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวในการทดลองครั้งนี้ทำในสองลักษณะคือ การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซโดยคงอัตราการไหลของของเหลวให้คงที่ และการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของของเหลวโดยคงอัตราการไหลของก๊าซให้คงที่

การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของของไหลแต่ละตัวส่งผลโดยตรงต่อสภาพความปั่นป่วนของของไหลนั้น กล่าวคือการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซส่งผลให้สภาพความปั่นป่วนของก๊าซภายในระบบสูงขึ้น และการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวส่งผลให้สภาพความปั่นป่วนของของเหลวภายในระบบสูงขึ้น ซึ่งสภาพความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) ที่มากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับโดยสภาพความปั่นป่วนที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทไอโซนด้วยการพาภายในแต่ละวัฏภาค ทั้งนี้ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ของของไหลในท่อนหาได้จากสมการที่ 4.3

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad 4.3$$

โดย	Re	=	ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
	v	=	ความเร็วในการไหลของของไหล
	μ	=	ความหนืดของของไหล

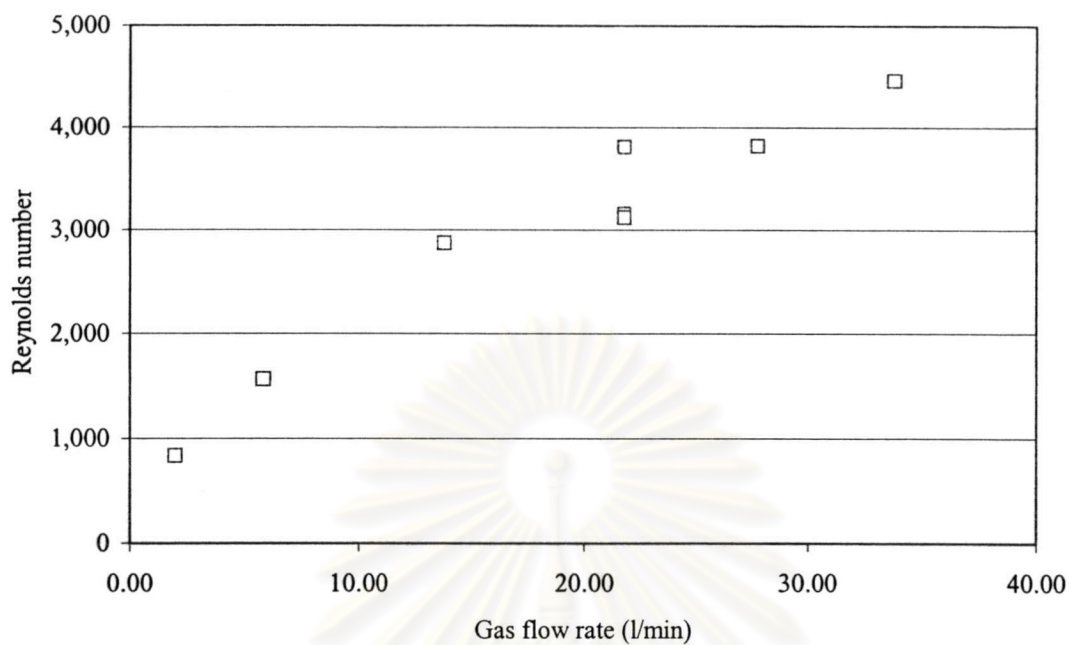
ความเร็วในการไหลของของไหล และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของของไหลแต่ละวัฏภาคที่นำมาแทนในสมการที่ 4.3 เพื่อหาค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์หาได้จากการแก้ระบบสมการที่ประกอบด้วยสมการสมดุลมวลและสมการความดันลด (pressure drop) ภายในท่อตามสมการที่ 4.4 และ 4.5 ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าความดันลดของก๊าซที่ไหลภายในท่อมักมีค่าเท่ากับความดันลดของของเหลวที่ไหลภายในท่อที่ตำแหน่งเดียวกัน

$$(\rho_g A_g v_g + \rho_l A_l v_l) = (\rho_g G_g + \rho_l G_l) \quad 4.4$$

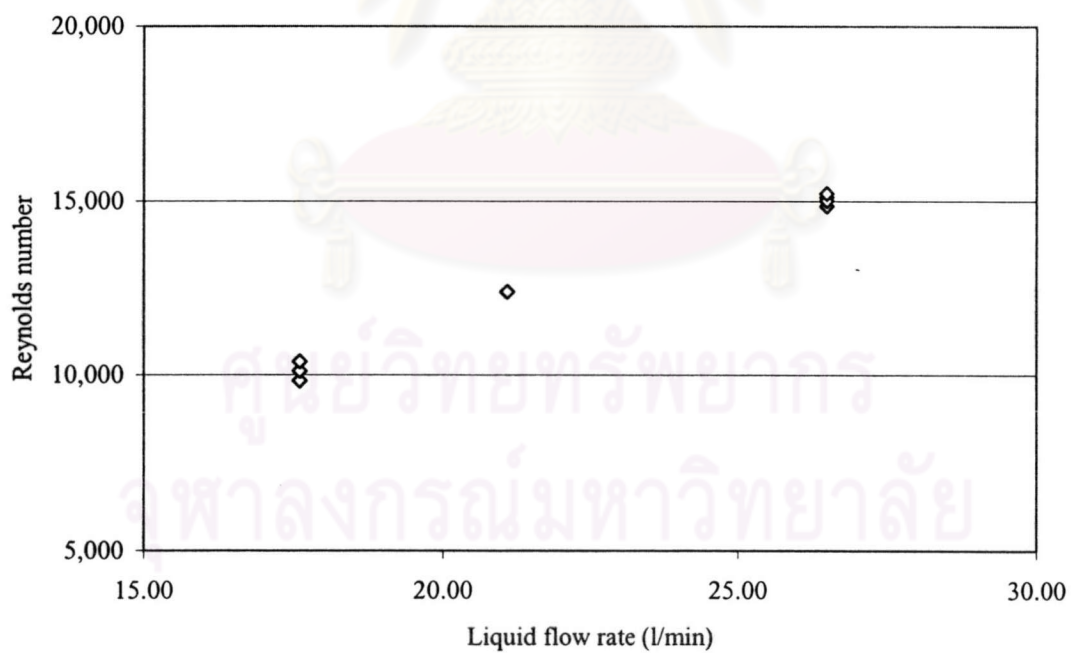
$$\Delta P = 4f \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad 4.5$$

ทั้งนี้ในการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของแต่ละวัฏภาคจะส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหลทั้งสองวัฏภาคเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของของไหลแต่ละวัฏภาคที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งหาได้จากการแก้ระบบสมการดังกล่าวไปแล้ว ส่งผลให้ค่าความปั่นป่วนของวัฏภาคหนึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอีกวัฏภาคภาคดังแสดงในรูปที่ 4.9

นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซยังส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล [Chiang และคณะ, 1997] เนื่องจากความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซขาเข้าระบบที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 ค่าเรย์โนลด์สโน้มเบอร์ของก๊าซที่ไหลในท่อที่ทำการทดลองที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของก๊าซ



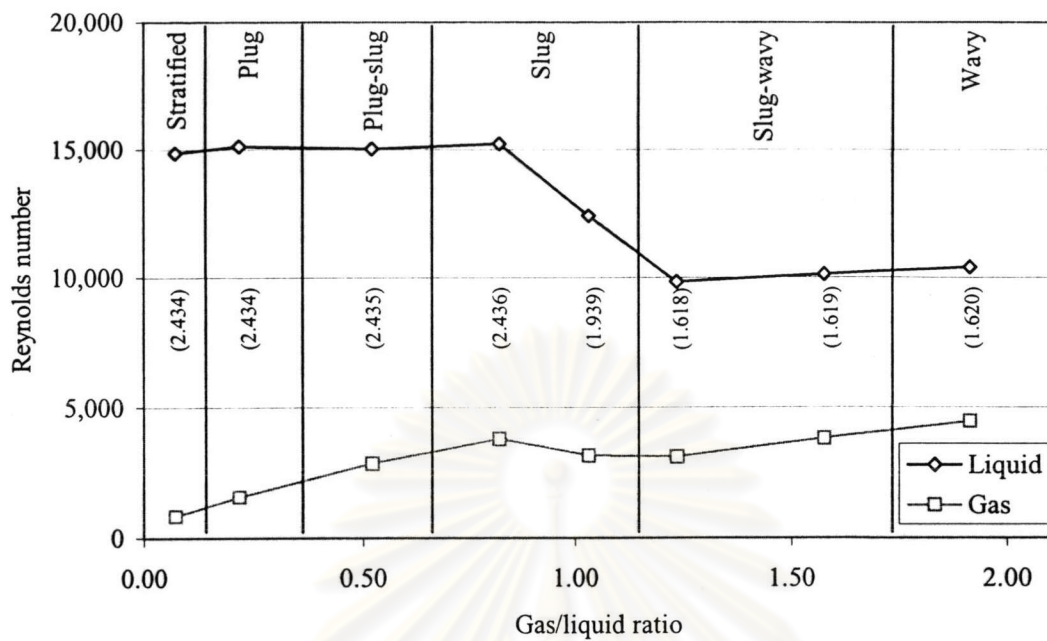
รูปที่ 4.8 ค่าเรย์โนลด์สโน้มเบอร์ของของเหลวที่ไหลในท่อที่ทำการทดลองที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของของเหลว

ตารางที่ 4.4 พื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบท่อที่ทำการศึกษาที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	
	ก๊าซ	ของเหลว
0.075	0.10	10.77
0.219	0.25	10.62
0.520	0.39	10.48
0.821	0.60	10.27
1.032	0.59	10.28
1.236	0.74	10.13
1.576	0.90	9.97
1.916	1.05	9.82

ตารางที่ 4.5 ความเร็วของของไหลและเวลาที่ของไหลอยู่ภายในระบบท่อที่ทำการศึกษาที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	ความเร็ว (เซนติเมตรต่อวินาที)		เวลาที่อยู่ในระบบ (วินาที)	
	ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
0.075	330	41	1.52	12.20
0.219	390	42	1.28	11.90
0.520	570	42	0.88	11.90
0.821	610	43	0.82	11.63
1.032	510	35	0.98	14.29
1.236	450	28	1.11	17.86
1.576	500	29	1.00	17.24
1.916	540	30	0.93	16.67



รูปที่ 4.9 ค่าเรย์โนลด์สของของเหลวและก๊าซที่ไหลในท่อแนวระนาบ โดยตัวเลขในวงเล็บ แสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, $\text{kg}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$)

ค. รูปแบบการไหล

รูปแบบการไหลเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทมวล เนื่องจากรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนไปทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคซึ่งเป็นบริเวณที่ก๊าซโอโซนจะสามารถแพร่เข้าไปในวัฏภาคของเหลวได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย [Zürcher และคณะ, 2002] กล่าวคือรูปแบบการไหลแบบ stratified จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสผิวน้อยที่สุดและมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ wavy เป็นรูปแบบการไหลที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า stratified เนื่องจากคลื่นที่เกิดขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมากขึ้น plug และ slug เป็นรูปแบบการไหลที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสูง เนื่องจากการไหลทั้งสองแบบนี้มีความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อสูง ทำให้มีฟองก๊าซจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของเหลวนำมาซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่สูงกว่ารูปแบบการไหลอื่นๆ

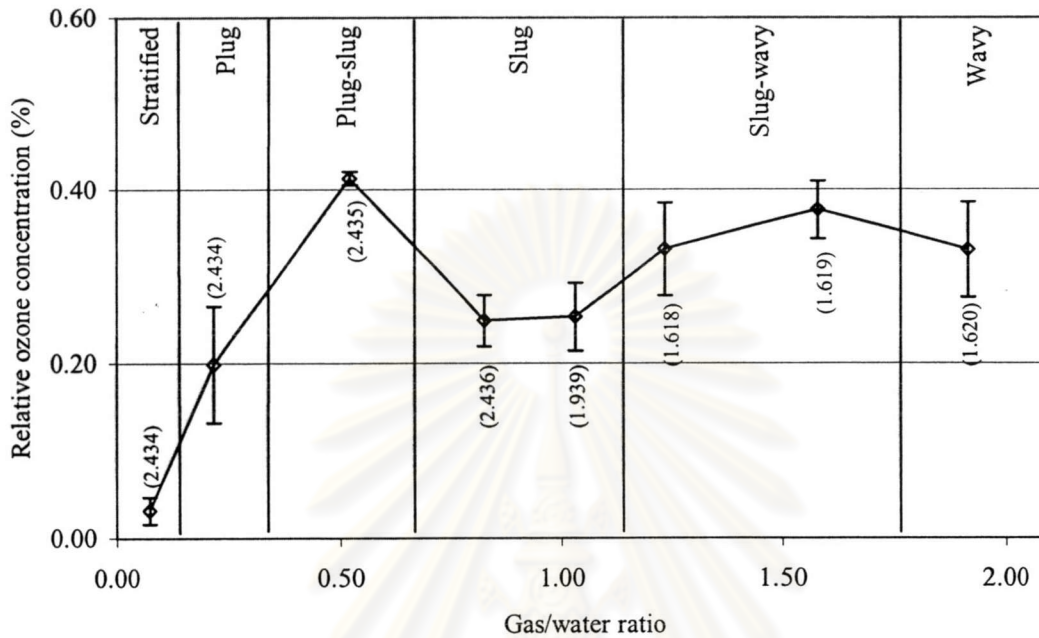
จะเห็นได้ว่าในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวในการวิจัยครั้งนี้มีปัจจัยหลายตัวที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลของระบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงปริมาณการถ่ายเทโอโซนเพียงประเด็นเดียวจึงไม่อาจอธิบายประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลโอโซนของระบบท่อที่ทำการทดลองได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งยังไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งนี้กับงานวิจัยอื่นๆได้สะดวก ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวที่มีต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซนของระบบจึงพิจารณาพารามิเตอร์อื่นๆประกอบดังนี้

ก. ร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์

ค่าความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวที่หาได้จากวิธีอินดิโกคโคโลริเมตริกมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถเป็นตัวแทนของความเข้มข้นเพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการละลายของโอโซนในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบได้ดี การใช้ค่าร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ (%Relative ozone concentration) เป็นตัวแทนของค่าความเข้มข้นของโอโซนจึงเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวได้ ซึ่งค่าร้อยละของความเข้มข้นของโอโซนในของเหลวหาได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลว} * 100}{\text{ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุล}} \quad 4.4$$

โดยความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลหาได้จากสมการระหว่างภูมิภาคตามกฎของเฮนรี ในสมการที่ 4.2 ซึ่งจากรูปที่ 4.3 เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์จะได้ ดังรูปที่ 4.10



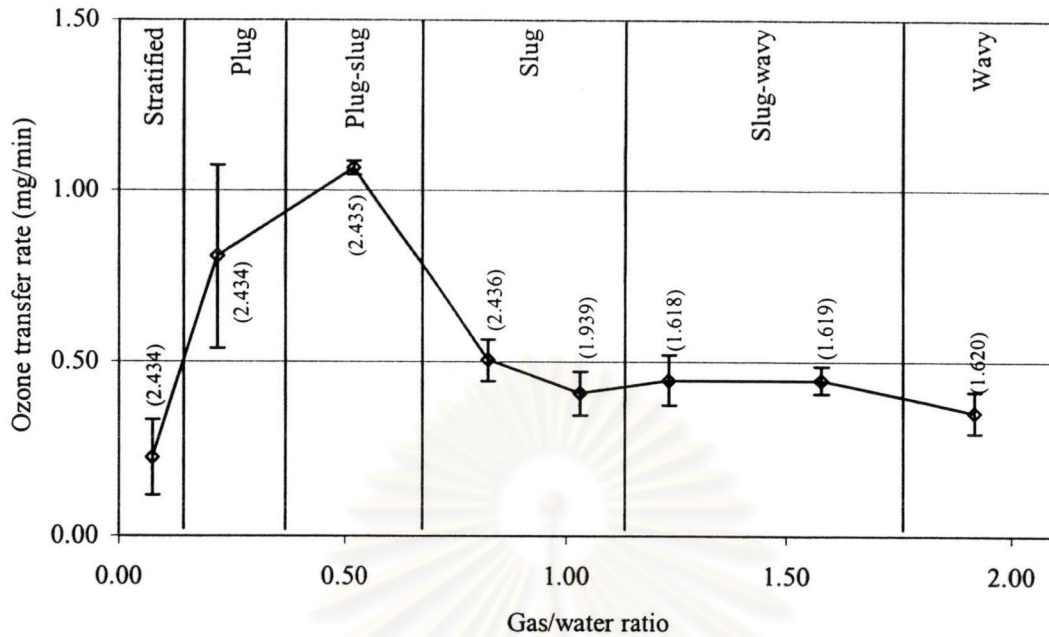
รูปที่ 4.10 ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำกราดลด ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, $\text{kg}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$)

ข. อัตราการถ่ายเทมวลโอโซน

อัตราการถ่ายเทมวลโอโซนคือมวลโอโซนที่ถ่ายเทจากภูมิภาคก๊าซไปยังภูมิภาคของเหลวต่อหน่วยเวลา ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณโอโซนทั้งหมดที่ถ่ายเทลงในภูมิภาคของเหลวต่อหน่วยเวลา อันเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลของระบบ ดังสมการ

$$\text{อัตราการถ่ายเทมวลโอโซน} = \text{ความเข้มข้นของโอโซน} * \text{อัตราการไหลของของเหลว} \quad 4.5$$

โดยจากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 เมื่อนำมาหาค่าอัตราการถ่ายเทมวลโอโซนจะพบว่าอัตราการถ่ายเทมวลมีค่าแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 อัตราการถ่ายเทมวลโอโซนของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm²)

- ค. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างก๊าซกับของเหลวต่อหน่วยปริมาตร (overall volumetric gas-liquid mass transfer coefficient, k_La)

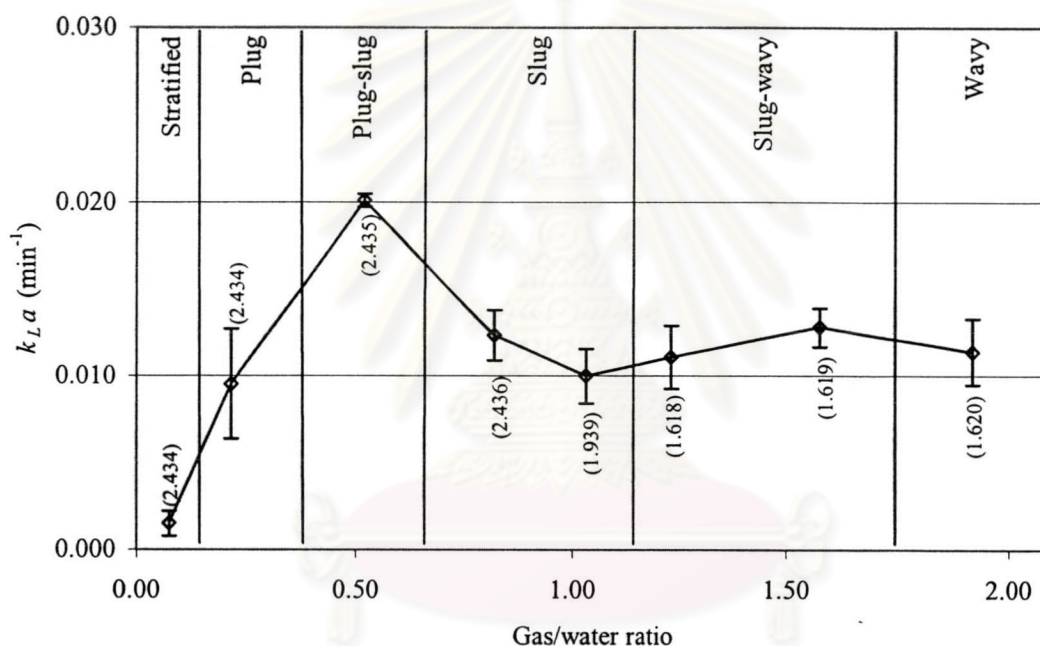
เนื่องจากในระบบที่ทำการศึกษามีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตโอโซนนำมาซึ่งความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซที่ผลิตได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซที่ป้อนเข้าระบบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล ดังนั้นในการศึกษาประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภูมิภาค

ตัวแปรที่นำมาใช้อธิบายประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลโดยคำนึงถึงผลของความแตกต่างของความเข้มข้นได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างก๊าซกับของเหลวต่อหน่วยปริมาตร (k_La) ที่ต่อไปนี้จะเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\frac{Q}{V} = k_L a (\Delta c)_m \quad 4.6$$

โดย Q คือ อัตราการถ่ายเทมวล (มิลลิกรัมต่อนาที)
 V คือ ปริมาตรของของเหลว (ลิตร)
 $k_L a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร (ต่อนาที)
 $(\Delta c)_m$ คือ ความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic ของความเข้มข้นไอโซน

จากอัตราการถ่ายเทมวลที่หาได้ในรูปที่ 4.11 และความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic ของความเข้มข้นในตารางที่ 4.3 จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm²)

จากปัจจัยหลายส่วนที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลไอโซนของระบบและปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลนอกเหนือจากปริมาณการถ่ายเทไอโซนที่มีหลากหลายนั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถเข้าใจในระบบการถ่ายเทมวลอย่างแท้จริงจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลักต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลแยกกันเพื่อให้สามารถแยกได้ถึงอิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัวเหล่านั้นที่มีต่อระบบการถ่ายเทมวลในท่อ กล่าวคือ

ก. อัตราการไหลของของไหล

ผลของอัตราการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลของระบบสามารถแยกพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือ อัตราการไหลของก๊าซและอัตราการไหลของของเหลว

การพิจารณาผลของอัตราการไหลของก๊าซทำได้โดยการคงอัตราการไหลของของเหลวให้คงที่และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้มากขึ้น และทำเช่นเดียวกันสำหรับการพิจารณาผลของอัตราการไหลของของเหลว ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซและของเหลว ส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปดังจะกล่าวถึงต่อไป แต่ในการทดลองครั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้สูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซลดลงตามตารางที่ 4.2 ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลที่หาได้เป็นผลรวมระหว่างความแตกต่างของความเข้มข้นและรูปแบบการไหลที่เปลี่ยน ดังนั้นการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแยกพิจารณาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลโดยลดยอิทธิพลของความแตกต่างของความเข้มข้นได้

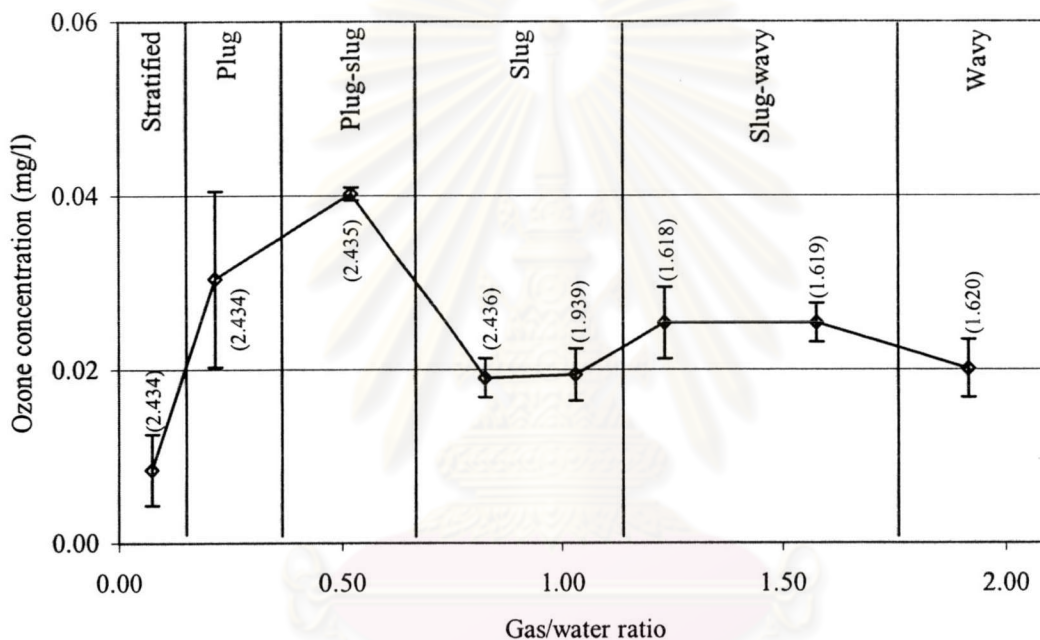
ข. รูปแบบการไหล

รูปแบบการไหลส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคซึ่งเป็นพื้นผิวที่จะเกิดการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังของเหลว รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเปลี่ยน ดังนั้นการพิจารณาอิทธิพลของรูปแบบการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลจึงต้องพิจารณาพร้อมกับอัตราการไหลของของไหล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

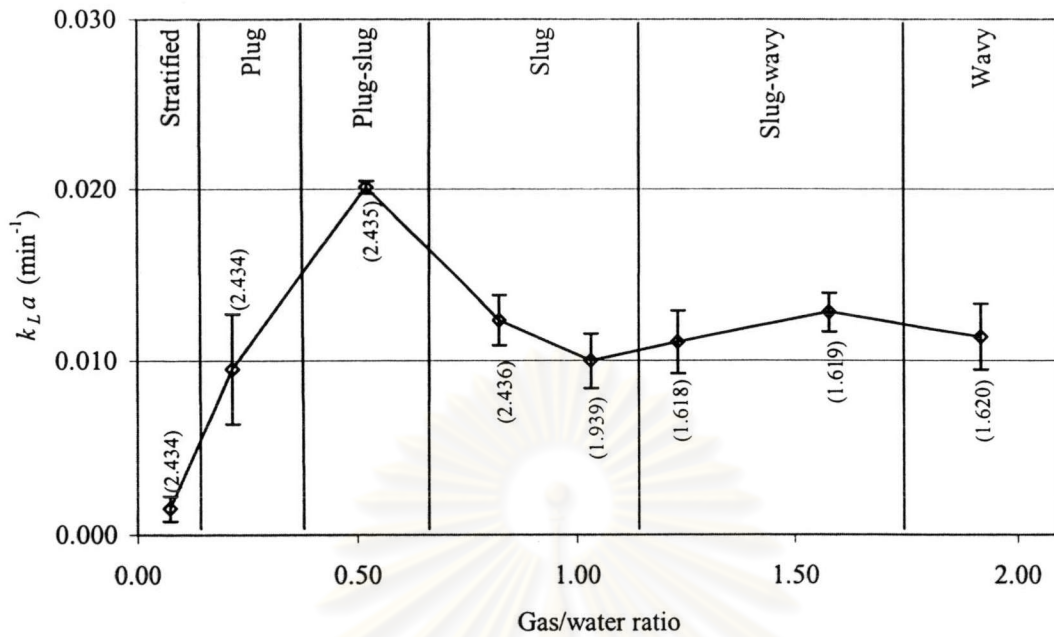
4.3.1 การถ่ายเทโอโซนในระบบการไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

จากการทดลองการไหลของของไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบ โดยวัฏภาคของเหลวคือน้ำกลั่นและวัฏภาคก๊าซคือก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนโดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น เก็บตัวอย่างของเหลวที่ตำแหน่งต่างๆตามความยาวของท่อมาหาความเข้มข้นของโอโซน จากนั้นปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของก๊าซต่อของเหลว เพื่อเปลี่ยนรูปแบบการไหลของของไหลในท่อ ได้ผลการทดลองดังนี้



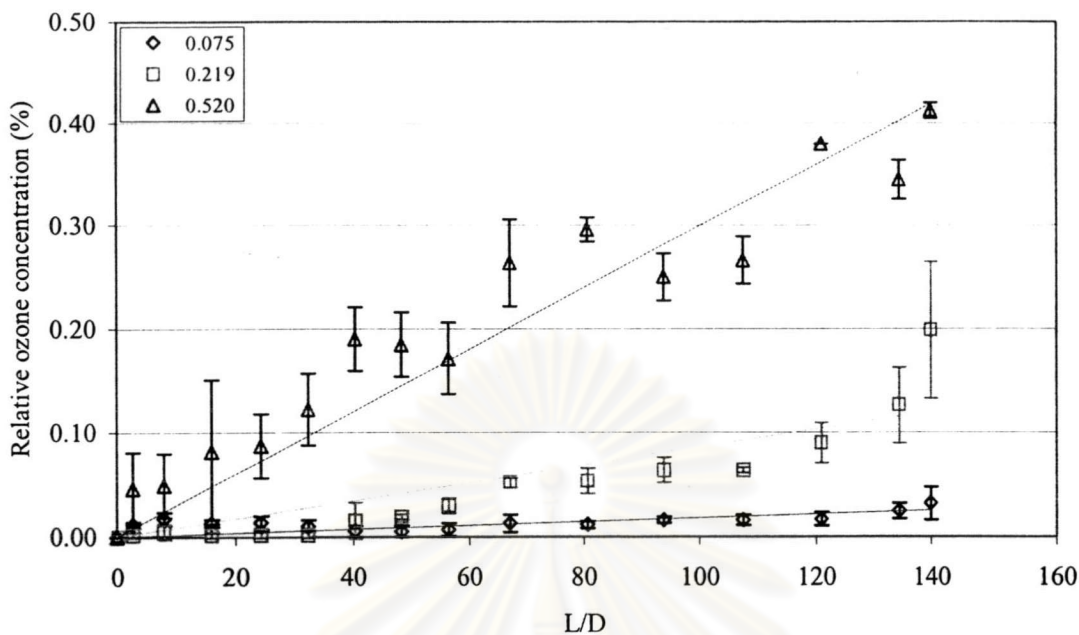
รูปที่ 4.13 อัตราการถ่ายเทมวลโอโซนของระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ ($\text{mass flux, kg/min.cm}^2$)

จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวต่ำสุดซึ่งรูปแบบการไหลเป็นแบบ stratified อัตราการถ่ายเทมวลมีค่าต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรในรูปที่ 4.14 ก็จะมีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำกราดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ ($\text{mass flux, kg/min.cm}^2$)

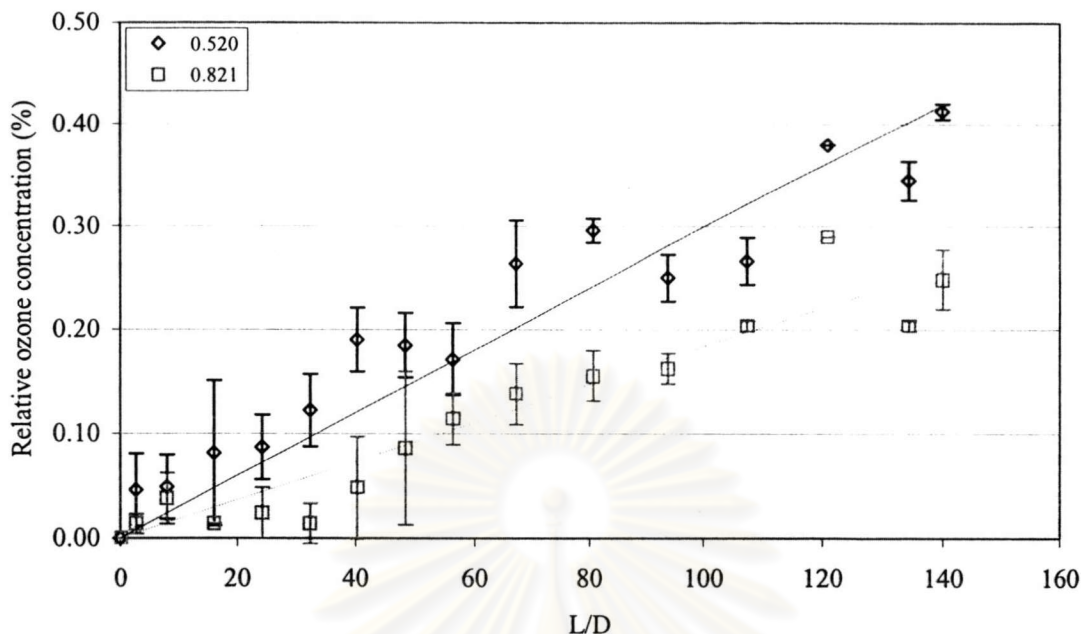
ประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซนมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 0.075 ไปเป็น 0.219 ทั้งในด้านอัตราการถ่ายเทมวลและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร รวมถึงเมื่อสังเกตค่าความเข้มข้นโอโซนของของเหลวในท่อพบว่ามีความเข้มข้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางจากจุดป้อนก๊าซมากขึ้นดังรูปที่ 4.15 ที่แสดงค่าร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวในท่อที่ระยะความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (L/D) ต่างๆ ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวในช่วงนี้เป็นการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซแต่คงอัตราการไหลของของเหลวให้คงที่ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวทำให้รูปแบบการไหลของระบบเปลี่ยนแปลงจาก stratified ไปเป็นการไหลแบบ plug ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลนี้ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีปริมาณสูงขึ้น [Wong และ Yau, 1997] สังเกตได้จากการที่มีฟองก๊าซไหลอยู่ภายในของเหลวในส่วนบนของท่อ ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนจากการที่มีผิวสัมผัสเป็นเส้นตรงในรูปแบบการไหล stratified การมีฟองก๊าซไหลอยู่ภายในช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้นนี้ นำมาซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าความเข้มข้นของโอโซนเริ่มต้นจะลดลงดังตารางที่ 4.2 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของไหลในระบบจาก stratified ไปเป็นแบบ plug เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลเหนือผลของความแตกต่างของความเข้มข้นที่ลดลง



รูปที่ 4.15 ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219 และ 0.520 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้มากขึ้นจากช่วงที่ผ่านมา โดยคงอัตราการไหลของของเหลวไว้ จนอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 0.520 ประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซนมีค่าสูงขึ้นต่อเนื่องจากช่วงที่ผ่านมา โดยเมื่อพิจารณารูปแบบการไหลจะพบว่าเป็นแบบ plug-slug ซึ่งมีฟองก๊าซขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ก่อนและหลังฟองก๊าซขนาดใหญ่ในกรณี plug ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่จะเกิดการถ่ายเทมวลสูงมากยิ่งขึ้น นำมาซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อหน่วยปริมาตรที่สูงกว่ารูปแบบการไหลแบบอื่นๆ

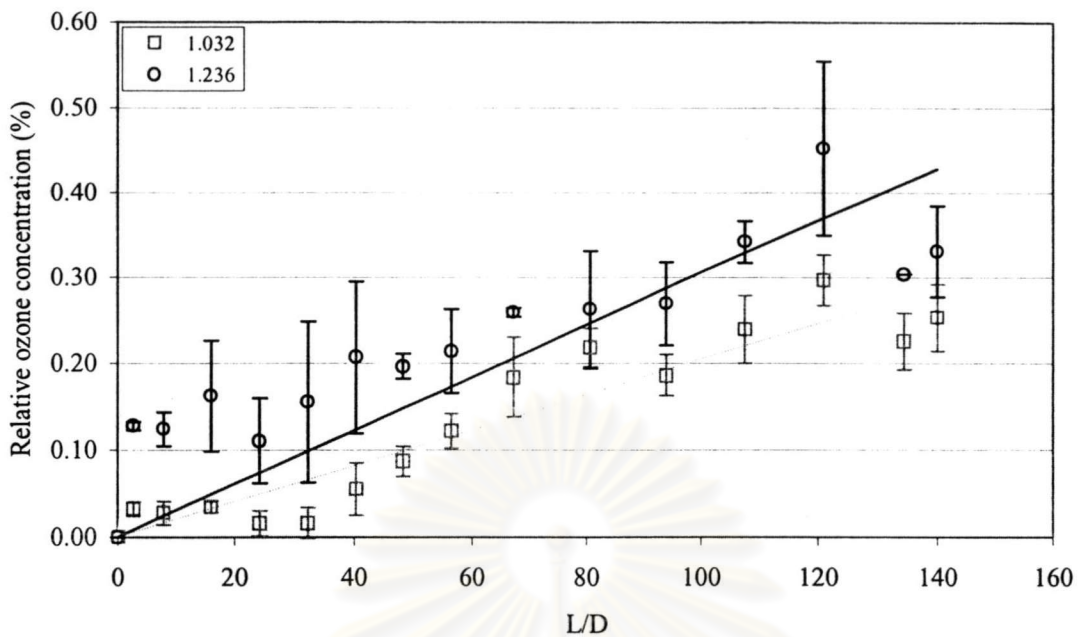
เมื่อเพิ่มอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวให้มากขึ้นเป็น 0.821 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าลดลงจากช่วงที่ผ่านมา ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนนี้เป็นการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้มากขึ้นเช่นเดียวกับช่วงที่ผ่านมา โดยรูปแบบการไหลของระบบเปลี่ยนแปลงเป็น slug ซึ่งมีความปั่นป่วนสูงเช่นเดียวกับ plug-slug แต่เมื่อพิจารณาลักษณะผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจะพบว่าการไหลแบบ slug นี้จะมีระยะห่างระหว่างยอดคลื่นที่สัมผัสกับผิวท่อด้านบนยาวกว่าระยะห่างของฟองก๊าซในกรณี plug-slug ทำให้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก๊าซแล้วพบว่าการไหลแบบ slug ให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก๊าซน้อยกว่าการไหลแบบ plug-slug ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลรวมต่ำกว่ารวมถึงร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่จุดต่างๆตลอดความยาวท่อกรณีอัตราส่วน 0.821 ที่มีค่าน้อยกว่าที่อัตราส่วน 0.520 ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพันธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.520 และ 0.821 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

การทดลองขั้นถัดไปกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซคงที่และลดอัตราการไหลของของเหลว ทำให้อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเพิ่มจาก 0.821 เป็น 1.032 จากการสังเกตพบว่ารูปแบบการไหลของอัตราส่วน 1.032 เป็นแบบ slug เช่นเดียวกับอัตราส่วน 0.821 แต่การลดอัตราการไหลของของเหลวทำให้ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นที่ค่ามากขึ้นตามอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวที่สูงขึ้น ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นที่มากขึ้นทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรก๊าซลดลง ประกอบกับความปั่นป่วนของของเหลวภายในท่อที่สามารถแสดงได้ด้วยค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ที่ลดลงดังรูปที่ 4.9 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าลดลงจากช่วงที่ผ่านมา

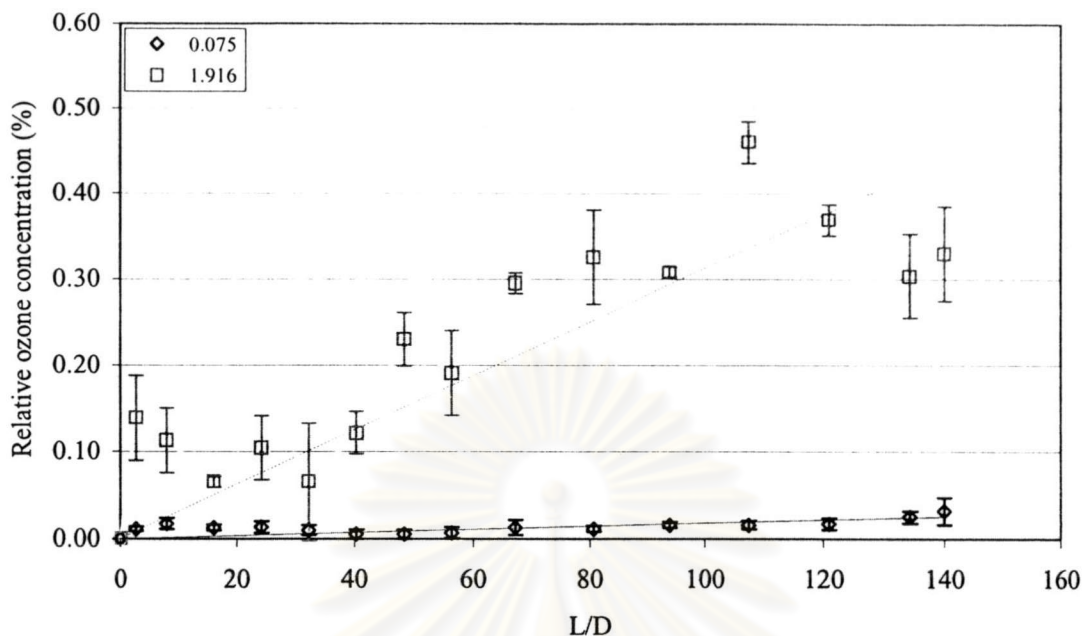
เมื่อลดอัตราการไหลของของเหลวโดยคงอัตราการไหลของก๊าซจนอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเพิ่มจาก 1.032 เป็น 1.236 รูปแบบการไหลของของไหลในระบบเริ่มเปลี่ยนจาก slug ไปเป็น slug-wavy การไหลแบบ slug-wavy เป็นรูปแบบที่คล้ายกับ slug แต่เมื่อพิจารณาบริเวณผิวสัมผัสจะพบว่ามีลักษณะเป็นคลื่นอันนำมาซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่สูงขึ้นกว่าแบบ slug ทำให้ความเข้มข้นไอโซนสัมพันธ์ของของเหลวที่ตำแหน่งต่างๆของอัตราส่วน 1.236 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1.032 ดังรูปที่ 4.17 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรที่อัตราส่วนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงที่ผ่านมา



รูปที่ 4.17 ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.032 และ 1.236 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

การทดลองในช่วงถัดมาเป็นการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซโดยคงอัตราการไหลของของเหลวให้คงที่ จนค่าอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 1.576 ลักษณะการไหลของของไหลในช่วงนี้เป็นแบบ slug-wavy เช่นเดียวกับช่วงที่ผ่านมา แต่จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากคลื่นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่มากขึ้นกว่าที่อัตราส่วน 1.236

แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจนรูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบ wavy ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 1.916 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องมาจากรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนจาก slug-wavy ไปเป็นแบบ wavy ที่สมบูรณ์อันนำมาซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่ลดลงเริ่มกลับมามีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทมวลอีกครั้ง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรระหว่างรูปแบบการไหล wavy กับ stratified จะพบว่ารูปแบบการไหลแบบ wavy มีความสามารถในการถ่ายเทมวลสูงกว่าซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าเพราะคลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสนั่นเอง โดยเมื่อพิจารณาร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่ตำแหน่งต่างๆ ก็จะมีแนวโน้มสอดคล้องไปในทางเดียวกันดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

จากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทมวลของระบบของไหลโดยรูปแบบการไหลแบบ stratified มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวให้มากขึ้นรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนจาก stratified ไปเป็น plug และ slug นำมาซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลที่สูงขึ้น [Reinecke และคณะ, 1998] และการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจนรูปแบบการไหลแบบ slug-wavy เปลี่ยนเป็น wavy ก็นำมาซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลที่ลดลง ทั้งนี้เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลแบบ plug และ slug จะพบว่าอัตราการถ่ายเทมวลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความปั่นป่วนภายในสองภูมิภาคดังกล่าวมาแล้ว

4.3.2 การถ่ายเทไอโซนในระบบการไหล 2 ภูมิภาคในท่อแนวระนาบเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น แต่เปลี่ยนก๊าซที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตไอโซนจากออกซิเจนเป็นอากาศที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวและเก็บตัวอย่างของเหลวที่ตำแหน่งต่างๆตามความยาวท่อมาหาความเข้มข้นของไอโซนเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา จากการทดลองพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนก๊าซที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตไอโซนเป็นอากาศ ความเข้มข้นของไอโซนที่ได้มีค่าลดลงดังตารางที่ 4.6 โดยมีค่าความแตกต่างของความเข้มข้นดังตารางที่ 4.7

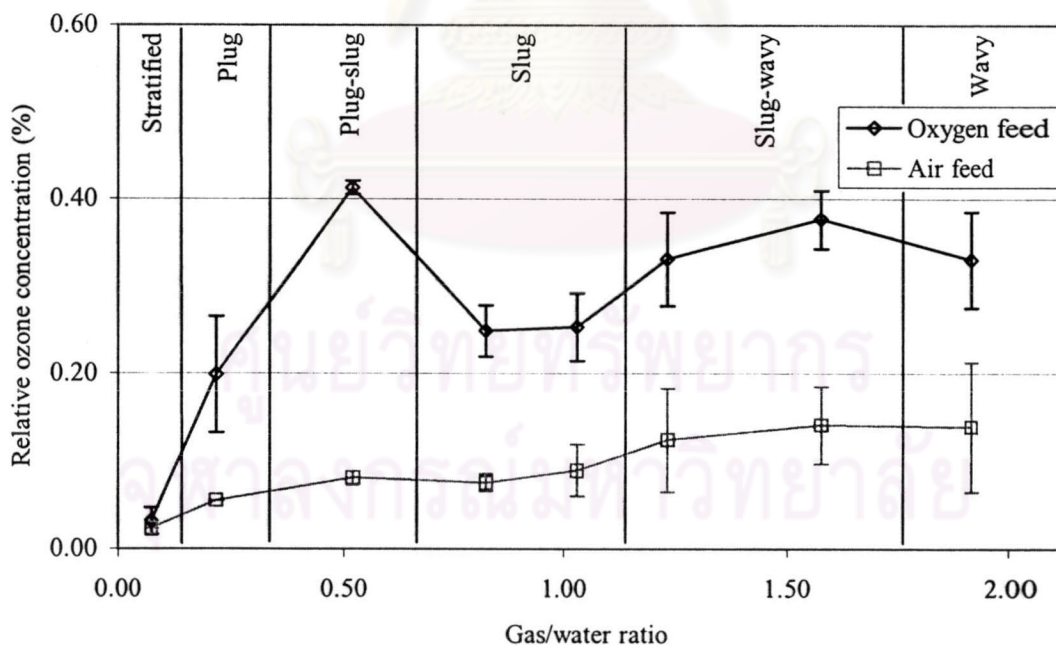
ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะของก๊าซขาเข้าที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น

อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	ความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซ		อัตราการป้อนไอโซน (มิลลิกรัมต่อนาที)
	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	
0.075	6.855	88.62	177.23
0.219	3.342	43.20	251.12
0.520	1.868	24.15	332.94
0.821	1.374	17.76	386.45
1.032	1.374	17.76	386.45
1.236	1.374	17.76	386.45
1.576	1.167	15.08	418.35
1.916	1.023	13.22	445.89

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของโอโซนในสายขาเข้าและขาออกและความแตกต่างของความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น

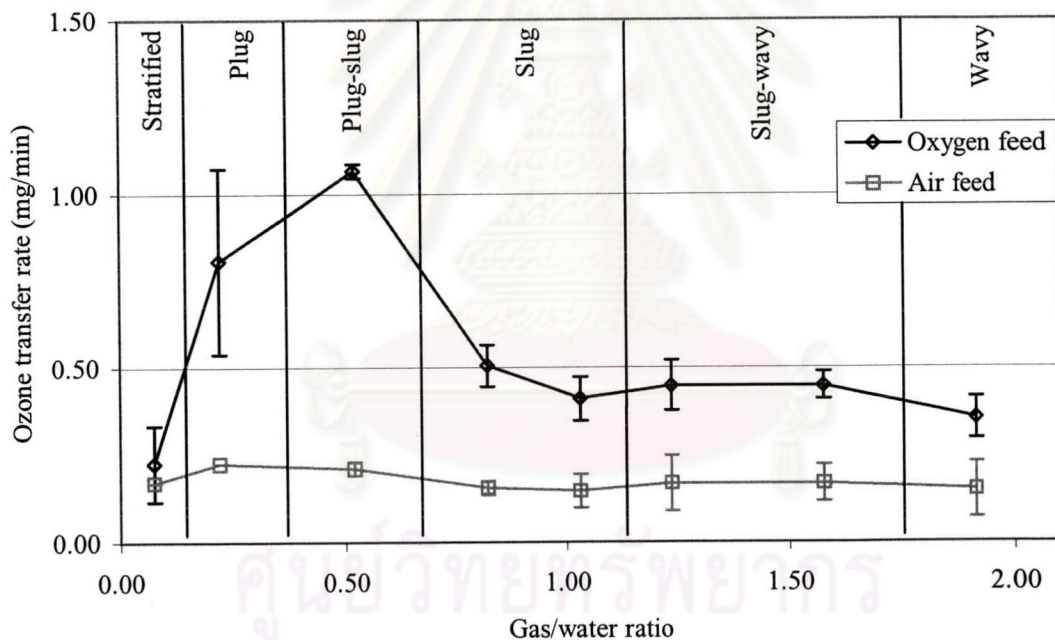
อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว	ความเข้มข้นของโอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				$(\Delta C)_{in}$
	ขาเข้า		ขาออก		
	ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว	
0.075	88.62	0.0	88.53	0.006	23.31
0.219	43.20	0.0	43.16	0.008	11.36
0.520	24.15	0.0	24.14	0.008	6.35
0.821	17.76	0.0	17.75	0.006	4.67
1.032	17.76	0.0	17.75	0.007	4.67
1.236	17.76	0.0	17.75	0.010	4.67
1.576	15.08	0.0	15.08	0.010	3.96
1.916	13.22	0.0	13.22	0.008	3.48

จากการศึกษาได้ผลการทดลองดังนี้



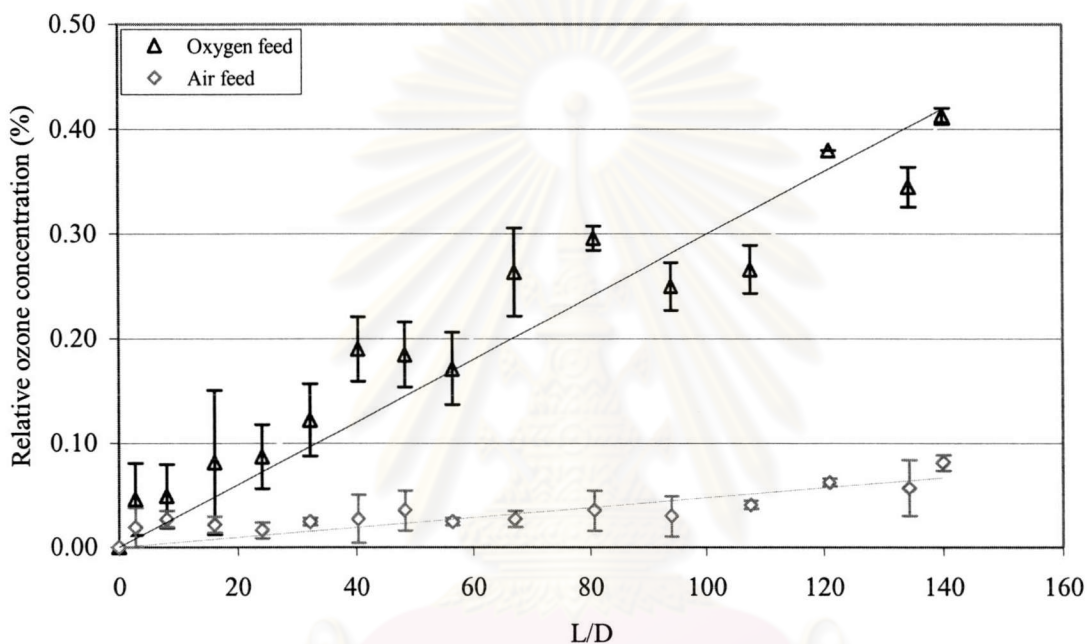
รูปที่ 4.19 ร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

จากการทดลองพบว่าร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการศึกษากรณีใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้นมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ก๊าซออกซิเจนมาก เช่นเดียวกับอัตราการถ่ายเทมวลโอโซนดังรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลโอโซนในกรณีใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้นมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซออกซิเจน โดยความร้อยละความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ของของเหลวที่จุดเกิดตัวอย่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากแม้รูปแบบการไหลจะเป็นแบบ plug-slug ที่อัตราส่วนการไหล 0.520 ที่มีค่าผลต่างของอัตราการถ่ายเทมวลสูงสุดดังรูปที่ 4.21 รวมทั้งอัตราการถ่ายเทมวลโอโซนที่มีค่าเกือบคงที่ตลอดช่วงอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวที่เปลี่ยนไปในการทำการทดลอง ทั้งนี้อัตราการถ่ายเทมวลเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญในการพิจารณา เนื่องจากค่าที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ภายใต้ส่วนเบี่ยงเบนค่าเฉลี่ย (error bar)



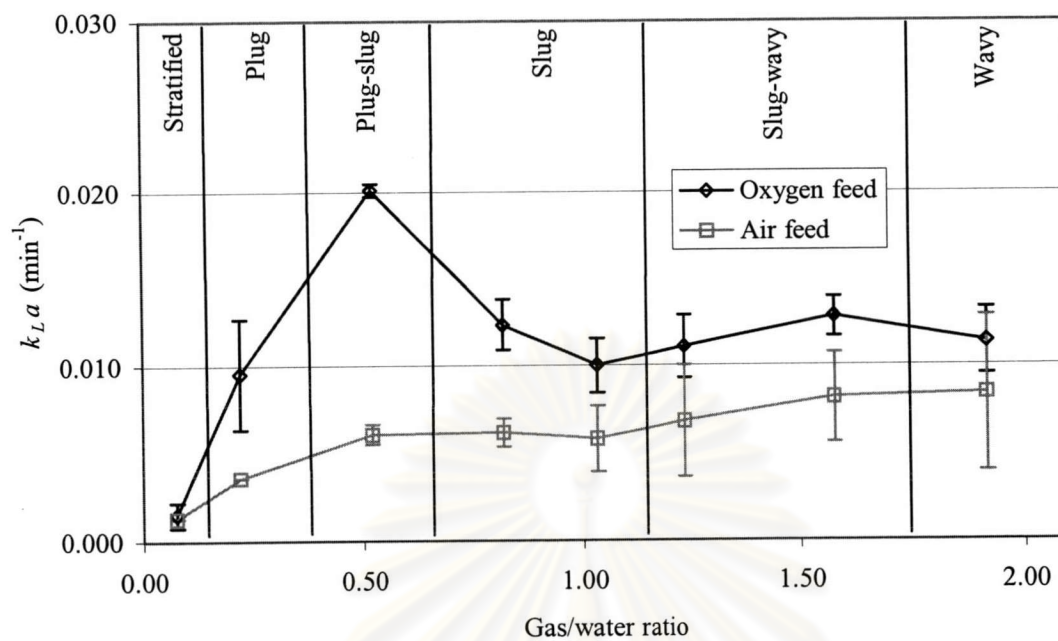
รูปที่ 4.20 อัตราการถ่ายเทมวลโอโซนของระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

จากอัตราการถ่ายเทมวลที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อดังรูปที่ 4.22 จึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทไอโซนในระบบของไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบในกรณีการใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้นมีค่าต่ำมาก และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทมวลสารอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.21 ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.520 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น