รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ภาษาอังกฤษ

Abdul-Majeed, G. H. Liquid holdup in horizontal two-phase gas-liquid flow. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol.15 (1996): 271-280.

Akbar, M. K. and Ghiaasiaan, S. M. Stability of stratified gas-liquid flow in horizontal annular channels. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol.28. (2003): 17-21.

American Public Health Association. Methods of Air Sampling and Analysis, 2nd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 1977.

American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 1989.

Bader, H. and Hoigné, J. Determination of ozone in water by indigo method. Water Research. Vol.15. (1981): 449-456.

Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. New York: John Wiley & Sons, 1960.

Butterworth, D. and Hewitt G.F. Two-Phase Flow and Heat Transfer. London: Oxford, 1977.

Chang, B. J., and Chian, E. S. K. A model study of ozone-sparged vessels for the removal of organics from water. Water Research. Vol.15. No.7. (1981): 929-936.

Darby, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2001.

Evans III, F. L., ed. Ozone in Water and Wastewater Treatment. Michigan: Ann Arbor Science, 1972.

Farines, V., Baig, S., Albet, J., Molinier, J., and Legay, C. Ozone transfer from gas to water in a co-current upflow packed bed reactor containing siliga gel. Chemical Engineering Journal. Vol.91 (2003): 67-73.

Gottschalk, C., Libra, J. A., and Saupe, A. Ozonation of Water and WasteWater. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.

Heyouni, A., Roustan, M., and Do-Quang, Z. Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flow through static mixers. Chemical Engineering Science. Vol.57 (2002):3325-3333.

Hsu, Y. C., Chen, T. Y., Chen, J. H., and Lay C. W. Ozone transfer into water in a gas inducing reactor. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol.41. (2002): 120-127.

Hsu, Y. C. and Huang, C. J. Ozone transfer with optimal design of a new gas-induced reactor. AIChE Journal. Vol.43. No.9. (1997):2336-2342.

Langlais, B.; Reckhow, D. A., and Brink, D. R. Ozone in Water Treatment: Application and Engineering. Michigan: Lewis, 1991.

Le Sauze, N., Laplanche, A., Martin, N., and Martin, G. Modeling of ozone transfer in a bubble column. Water Research. Vol.27. No.6. (June 1993): 1071-1083.

Lev, O., and Regli, S. Evaluation of ozone disinfection systems: Characteristic concentration C. Journal of Environmental Engineering. Vol.118. No.4. (1992): 477-494.

Lewis, S., Fu, W. L., and Kojasoy, G. Internal flow structure description of slug flow pattern in a horizontal pipe. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol.45. No.19. (2002): 3897-3910.

Lun, I., Calay, R. K., and Holdo, A. E. Modelling two-phase flows using CFD. Applied Energy. Vol.53. (1996): 299-314.

Macabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

Morioka, T., Kato, Y., Hoshikawa, H., Okada, M., and Moniwa, T. Study of the reactor with down-flow injection on the characteristics of ozonation. Water Science and Technology. Vol.36. No.12. (1997): 367-374.

Peleg, M. The chemistry of ozone in the treatment of water. Water Research Vol.10. (1976): 361-365.

Perry, R. H., and Chilton, C. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

Reineche, N., Petritsch, G., Boddem, M. and Mewes, D. Tomographic imaging of the phase distribution in two-phase slug flow. International Journal of Multiphase Flow. Vol.24. No.4. (1998): 617-634.

Rice, G. R., Bollyky, L. J., and Lacy, W. J. Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater. Michigan: Lewis, 1986.

Sharma, S., Lewis, S., and Kojasoy, G. Local studies in horizontal gas-liquid slug flow. Nuclear Engineering and Design. Vol.184. (1998): 305-318.

Shechter, H. Spectrophotometric method for determination of ozone in aqueous solutions. Water Research. Vol.7 (1973):729-739.

Skelland, A. H. P. Diffustion Mass Transfer. New York: John Wiley & Sons, 1974.

Spedding, P. L. Prediction in stratified gas-liquid co-current flow in horizontal pipelines. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol.40. No.8. (1997): 1923-1935.

Sotelo, J. L., Beltran, F. J., Benitez, F. J., and Beltran-Heredia, J. Henry's law constant for the ozone-water system. Water Research. Vol.23. No.10. (1989): 1239-1246.

Treybal, R. E. Mass-transfer Operations. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1968.

Tribbe, C. and Müller-Steinhagen, H. M. An evaluation of the performance of phenomenological models for predicting pressure gradient during gas-liquid flow in horizontal pipelines. International Journal of Multiphase Flow. Vol.26. (2000): 1019-1036.

Yaws, C. L. Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals. New York: Mcgraw-Hill, 1999.

Wong, T. N., and Yau, Y. K. Flow patterns in two-phase air-water flow. International Communications in Heat and Mass Transfer. Vol.24. No.1. (1997): 111-118.

Zhou, H., and Smith, D. W. Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: Experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer. Water Research. Vol.34. No.3. (2000): 909-921.

Zhou, H., Smith, D. W., and Stanley, S. J. Modeling of dissolves ozone concentration profiles in bubble columns. Journal of Environmental Engineering-ASCE. Vol.120. No.4. (1994): 821-840.

Zürcher, O.,Favrat, D., and Thome., J.R. Development of a diabatic two-phase flow pattern map for horizontal flow boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol.45. No.2 (2002): 291-301.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

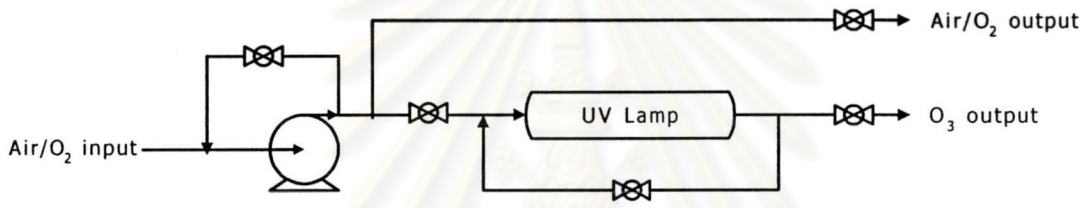
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

1. **การเตรียมก๊าซโอโซน**

ก๊าซโอโซนที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยผ่านอากาศหรือก๊าซออกซิเจนไปยังเครื่องผลิตโอโซนของบริษัท Cygnus International โดยดัดแปลงให้สามารถปรับอัตราการไหลก๊าซในสายต่างๆได้ ดังแสดงในแผนผังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 *แผนผังเครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการทดลอง*

2. **ก๊าซออกซิเจน**

ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการทดลองเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์ 99.8% ของบริษัท TIG

3. **น้ำกลั่น**

น้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลองผลิตโดยศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซน (Ozone Demand: Semi-Batch method) [APHA., 1989]

การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซน เป็นการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซโดยการผ่านก๊าซตัวอย่างลงในสารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ จากนั้นนำสารละลายมาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน เพื่อนำมาเทียบหาปริมาณโอโซน

1. หลักการพื้นฐาน (Principle of the Method)

วิธีการแบบกึ่งกะ (semi-batch) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนโดยการผ่านก๊าซที่ต้องการวัดไปยังขวดเก็บก๊าซตัวอย่างที่บรรจุสารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์

2. ความแม่นยำและเที่ยงตรงในการวัด (Precision and Accuracy)

ค่าความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทมวลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ และปริมาณโอโซนที่ถูกดักจับ โอโซนที่ถูกดักจับควรมีปริมาณมากพอสมควร เพื่อลดค่าความแปรปรวนของข้อมูล

3. จุดเด่นและจุดด้อย (Advantages and Disadvantages)

วิธีนี้มีจุดเด่นคือสามารถดักจับก๊าซโอโซนได้เกือบทั้งหมด แต่มีข้อด้อยคือต้องใช้สารเคมีปริมาณมากเพื่อดักจับก๊าซโอโซน และใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน

4. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

4.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

4.1.1 ขวดเก็บตัวอย่างก๊าซที่สามารถบรรจุสารละลายได้มากกว่า 200 มิลลิลิตร

4.1.2 ท่อแก้ว

4.1.3 ปั๊มอากาศ

4.1.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

4.1.5 เทอร์โมมิเตอร์

4.1.6 มานอมิเตอร์

4.1.7 นาฬิกาจับเวลา

4.2 เครื่องแก้ว

5. สารเคมี (Reagents)

5.1 น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากความต้องการโอโซน (Ozone-demand-free water)

เตรียมโดยพ่นก๊าซไนโตรเจนลงในน้ำที่ต้องการเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

5.2 กรดซัลฟุริกเข้มข้น 2N (Sulfuric acid, H_2SO_4, 2N)

เตรียมโดยเจือจางกรดซัลฟุริกเข้มข้น 56 มิลลิลิตรในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

5.3 สารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI)

เตรียมโดยละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ 20 กรัมในน้ำให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

5.4 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.1N (Standard sodium thiosulfate titrant, $Na_2S_2O_3$, 0.1N)

ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำกลั่นที่กำลังเดือดปริมาตร 1 ลิตร ทิ้งไว้อย่างน้อยสองสัปดาห์ก่อนนำมาใช้งาน โดยก่อนใช้งานต้องนำมาหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนด้วยการไทเทรตกับสารละลายโปแทสเซียมไบไอโอเดท ($KH(IO_3)_2$) หรือ โปแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) เข้มข้น 0.1000N

สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมทเข้มข้น 0.1000N ที่นำมาหาค่าความเข้มข้นเตรียมได้โดยละลายโปแทสเซียมไดโครเมทแอนไฮดรัส ($K_2Cr_2O_7$) 4.904 กรัม ในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บในขวดแก้ว (glass stoppered bottle)

5.5 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.005N (Standard sodium thiosulfate titrant, $Na_2S_2O_3$, 0.005N)

เจือจางสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.1N ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้เป็นปริมาตร 1 ลิตร

5.6 สารละลายแป้ง (Starch indicator solution)

ผสมแป้ง (แป้งมันฝรั่ง, arrowroot หรือ soluble starch) 5 กรัมกับน้ำเย็นเล็กน้อย บดจนละเอียด จากนั้นเทลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตรที่กำลังเดือด คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน แยกมาเฉพาะสารละลายใสส่วนบน โดยเติมกรดซาลิไซลิก 1.25 กรัมหรือซิงค์คลอไรด์ 4 กรัม เพื่อยืดอายุการใช้งานของสารละลายนี้

6. การเทียบวัด (Calibration)

เติมกรดซัลฟุริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร, สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมทเข้มข้น 0.1000N 10 มิลลิลิตร และโปแทสเซียมไอโอไดด์ 1 กรัมลงในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตรโดยต้องคนสารละลายอย่างต่อเนื่องขณะเติม ทิ้งไว้ 6 นาทีในที่มืดแล้วนำมาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1N จนสีเหลืองของไอโอดีนจางลงจนเกือบหายไป จากนั้นเติมสารละลายแป้ง (starch indicator solution) 1 มิลลิลิตรและไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นไปตามสมการ ข.1 ดังนี้

$$Normality \quad Na_2S_2O_3 = \frac{1}{mL \quad Na_2S_2O_3 \quad consumed} \qquad \text{ข.1}$$

7. ขั้นตอนการปฏิบัติ (Procedure)

7.1 ล้างอุปกรณ์ด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่น

7.2 การเก็บก๊าซตัวอย่าง

7.2.1 ใส่สารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2% ปริมาตร 200 มิลลิลิตรลงในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซ

7.2.2 ต่อขวดเก็บตัวอย่างก๊าซเข้ากับระบบที่ทำการทดลอง จากนั้นปล่อยก๊าซผ่านขวดเก็บตัวอย่าง วัดอัตราการไหลและเวลาที่ใช้

7.2.3 เทสารละลายในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซลงในขวดรูปชมพู่

7.2.4 เติมกรดซัลฟุริกเข้มข้น 2N ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

7.2.5 ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน 0.005N จนสีเหลืองของไอโอดีนจางลงจนเกือบหายไป จากนั้นเติมสารละลายแป้ง (starch indicator solution) 2 มิลลิลิตรและไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป

7.3 คำนวณหาปริมาณโอโซน

8. การคำนวณ (Calculation)

คำนวณหาปริมาณโอโซนในหน่วยมิลลิกรัมต่อนาทีได้ด้วยสมการ ข.2 ดังตัวอย่างในภาคผนวก ง.1

$$Ozone, mg/\min = \frac{(A+B)*N*2400}{T} \qquad \text{ข.2}$$

โดย A = mL titrant for Trap A

B = mL titrant for Trap B

N = normality of $Na_2S_2O_3$

T = ozonation time, min

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในน้ำด้วยวิธีอินดิโกคอโลริเมตริก (Indigo Colorimetric) [APHA., 1989]

การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในน้ำด้วยวิธีอินดิโกคอโลริเมตริก เป็นการวัดปริมาณโอโซนในน้ำโดยอาศัยปฏิกริยาเคมีระหว่างโอโซนกับสารละลายอินดิโก (indigo) ซึ่งจะทำให้สีของสารละลายอินดิโกเปลี่ยนไป จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนโดยเทียบกับสีของสารละลายด้วยการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

1. หลักการพื้นฐาน (Principle of the Method)

โอโซนจะทำให้สีของอินดิโก (indigo) จางลงอย่างรวดเร็วในสารละลายที่เป็นกรด โดยสามารถวัดได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเป็นสัดส่วนตามความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรมีค่า 0.42 ± 0.01 ต่อเซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อลิตร (/cm/mg/L) ($\Delta\in$=20000/M.cm) เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเลตของโอโซนบริสุทธิ์ที่ $\in$=2950/M.cm ที่ความยาวคลื่น 258 นาโนเมตร

2. ขอบเขตในการใช้งานและความว่องไว (Range and Sensitivity)

ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ด้วยการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง คือ 2 ไมโครกรัมโอโซนต่อลิตร แต่ถ้าใช้สายตาในการสังเกตจะสามารถวัดได้เพียง 10 ไมโครกรัมโอโซนต่อลิตร

3. สิ่งรบกวนระบบ (Interferences)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะลดสีของสารละลาย indigo ได้อย่างช้าๆ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่รบกวนระบบในกรณีที่วัดความเข้มข้นโอโซนภายในช่วงเวลา 6 ชั่วโมงหลังเติมสารละลาย ส่วนเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า การปรับแก้ค่าที่วัดได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องทำได้โดยวัดเทียบกับกรณีไม่ใช่ตัวอย่าง (blank)

ถ้าไม่มีการปรับแก้ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดไปจากความเข้มข้นที่แท้จริง เช่น แมงกานีสที่ถูกโอโซนออกซิไดซ์ที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะให้การตอบสนองเปรียบได้กับโอโซนเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนก็ส่งผลกระทบต่อการวัดเช่นกันแต่

สามารถป้องกันได้ด้วยกรดมาโลนิก โบรไมน์สามารถเกิดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของ Br^- โดย 1 โมลของ $HOBr$ จะให้ค่าเทียบได้กับโอโซน 0.4 โมล)

ถ้ามีคลอรีนในตัวอย่าง ให้ใส่สารละลายกรดมาโลนิกลงในขวดก่อนเติมสารตัวอย่างจนเต็ม แล้ววัดค่าการดูดกลืนภายใน 60 นาที

4. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

4.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ที่สามารถวัดได้ที่ความยาวคลื่น 600 ± 5นาโนเมตร

4.2 หลอดแก้ว (Glass cylinder) สำหรับกรณีใช้การสังเกตด้วยตาเปล่า ใช้หลอดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีก้นแบน

5. สารเคมี (Reagents)

5.1 Indigo stock solution

เตรียมได้โดยผสมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรเข้ากับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นเติมโปแทสเซียมอินดิโกไทรซัลโฟเนท (potassium indigo trisulfonate, $C_{15}H_7N_2O_{11}S_3K_3$) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80-85 แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

เมื่อนำมาเจือจางในสัดส่วน 1 ต่อ 100 แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรจะมีค่าการดูดกลืน 0.20 ± 0.010 เซนติเมตร สารละลายที่เตรียมนี้จะอยู่ได้นาน 4 เดือนเมื่อเก็บในที่มืด และไม่ควรนำมาใช้ถ้าทดสอบแล้วพบว่าค่าการดูดกลืนเมื่อเจือจางมีค่าน้อยกว่า 0.16 เซนติเมตร

5.2 Indigo reagent I

เติม indigo stock solution 20 มิลลิลิตร โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (sodium dihydrogen phosphate, NaH_2PO_4) และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 7 มิลลิลิตรลงไปในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้มีอายุการใช้งานประมาณหนึ่งสัปดาห์หรือเมื่อทดสอบด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรแล้วต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่วัดได้ในครั้งแรก

5.3 Indigo reagent II

เตรียมด้วยวิธีเช่นเดียวกับข้อ ข. แต่เติม indigo stock solution 100 มิลลิลิตรแทนที่จะเป็น 20 มิลลิลิตร

5.4 กรดมาโลนิก (Malonic acid reagent)

เตรียมโดยละลายกรดมาโลนิก 5 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

5.5 สารละลายไกลซีน (Glycine reagent)

เตรียมโดยละลายไกลซีน 7 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

6. ขั้นตอนการปฏิบัติ (Procedure)

6.1 กระบวนการใช้ Spectrophotometric

6.1.1 ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.1 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

เติม indigo reagent I 10 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวัดจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยมีขวดหนึ่งที่เติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 ±5 นาโนเมตร ภายในเวลา 4 ชั่วโมงโดยควรใช้เซลขนาด 10 เซนติเมตร คำนวณความเข้มข้นโอโซนจะผลต่างระหว่างน้ำตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ

6.1.2 ความเข้มข้นในช่วง 0.05 ถึง 0.5 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

ปฏิบัติตามขั้นตอนในข้อ 1 แต่ใช้ indigo reagent II 10 มิลลิลิตรแทน และควรใช้ cell ขนาด 4 ถึง 5 เซนติเมตร

6.1.3 ความเข้มข้นมากกว่า 0.3 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

ใช้ indigo reagent II แต่เจือจางน้ำตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นก่อนนำมาวิเคราะห์ (ในการตวงปริมาตรตัวอย่างควรใช้ปิเปตที่ทำด้วยแก้ว โดยชะด้วยสารตัวอย่างก่อนใช้ และให้ปลายปิเปตอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ

6.2 กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

6.2.1 ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.1 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

เติม indigo reagent I 10 มิลลิลิตรลงในหลอดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร สองหลอด หลอดแรกเติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) ส่วนอีกหลอดเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเปรียบเทียบสีของทั้งสองหลอดโดยการมองจากด้านบน รินสารละลายในหลอดเปรียบเทียบออกจนกระทั่งมีสีใกล้เคียงกับหลอดตัวอย่าง บันทึกปริมาตรของหลอดเปรียบเทียบ โดยการเปรียบเทียบนี้ควรทำภายใน 4 ชั่วโมงหลังการเก็บตัวอย่าง

6.2.2 ความเข้มข้นสูงกว่า 0.1 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

ทำตามขั้นตอนในข้อ 1 แต่เพิ่มน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เพียง 30 หรือ 45 มิลลิลิตรจากนั้นจึงเติมน้ำจนได้ 100 มิลลิลิตร

หมายเหตุ: กรณีที่น้ำตัวอย่างมีแมงกานีส ไม่ควรใช้วิธีการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

7. การคำนวณ (Calculation)

7.1 กระบวนการใช้ Spectrophotometric

$$mgO_3 / L = \frac{100 * \Delta A}{f * b * V} \qquad \text{ข.3}$$

โดย ΔA = ความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนของตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ

b = ความกว้างของ cell (เซนติเมตร)

V = ปริมาตรของตัวอย่าง (มิลลิลิตร)(โดยทั่วไปมีค่า 90 มิลลิลิตร)

f = 0.42

ค่า f มาจากค่า sensitivity factor ที่ 20000/cm สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสดงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรต่อโมลของโอโซนที่เพิ่มเข้ามาต่อลิตร ซึ่งจะถูกเทียบวัด (calibrate) ด้วยการไทเทรชันแบบไอโอโดเมตริก (iodometric)

7.2 กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

$$mgO_3 / L = \frac{(100 - V) * k}{100} \qquad \text{ข.4}$$

โดย V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิลิตร)

k = conversion factor สำหรับ indigo stock solution เทียบวัด (calibrate) วิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง มีค่าประมาณ 0.10 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร เมื่อเจือจางที่สัดส่วน 1 ต่อ 100 ให้ค่าการดูดกลืนที่ 0.19 ต่อเซนติเมตร

เมื่อเติมตัวอย่างเพียงแค่ 45 หรือ 30 มิลลิลิตร ค่า coversion factor จะเป็น $2k$ หรือ $3k$ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. ความแม่นยำ (Precision and Bias)

8.1 กระบวนการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

เมื่อไม่มีสิ่งที่มารบกวนระบบในการวิเคราะห์ ค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการอาจให้ค่าความผิดพลาดน้อยเพียงร้อยละ 1

วิธีวิเคราะห์นี้อยู่บนพื้นฐานของความแตกต่างของค่าการดูดกลืนระหว่างตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ (blank) วิธีวิเคราะห์นี้ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีสารตัวอย่างมีคลอรีน และแมงกานีส โดยที่ถ้าสัดส่วนของแมงกานีสต่อโอโซนมีค่าน้อยกว่า 10 ต่อ 1 และความเข้มข้นโอโซนมากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดประมาณน้อยกว่าร้อยละ 20

8.2 กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

วิธีวิเคราะห์นี้มีค่าความเบี่ยงเบนประมาณร้อยละ 1 ถึง 1.5 แต่ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีมีแมงกานีสในตัวอย่างในสัดส่วนใกล้เคียงกับโอโซน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ค.1 คำนวณความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซที่วิเคราะห์ด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซน (Ozone Demand: Semi-Batch method)

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซน เป็นการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ ที่สามารถตรวจวัดได้จากการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

1. **การเทียบวัด** (Calibration)

ในการวิเคราะห์จะต้องหาค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน (standardize) ด้วยสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมตที่ทราบค่าความเข้มข้นแน่นอน ตามวิธีในภาคผนวก ข.1 ตัวอย่างผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 *ตัวอย่างผลการทดลองการทำการเทียบวัดความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตด้วยสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต เมื่อวันที่ 15 และ 16 ก.พ. 46*

วัน/เดือน/ปี	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
15/2/46	10.2	10.1	10.2	10.2
16/2/46	10.3	10.2	10.2	10.2

จากนั้นหาค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตด้วยสมการ ข.5

$$Normality \quad Na_2S_2O_3 = \frac{1}{mL \quad Na_2S_2O_3 \quad consumed}$$

ตัวอย่างเช่นการทดลองทำการเทียบวัดความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2546 ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในการไทเทรต 10.2 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมีค่า = $\frac{1}{10.2}$

= 0.098 *Normality*

2. การคำนวณ

ในการคำนวณปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่าง สามารถหาได้จากสมการ ข.2

$$Ozone, mg/\min = \frac{(A+B)*N*2400}{T} \qquad \text{ค.1}$$

กล่าวคือปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่างแปรผันตามปริมาตรและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต แต่แปรผกผันกับเวลาที่ใช้เก็บก๊าซตัวอย่าง ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาปริมาณโอโซนในก๊าซ

กำหนดให้

น้ำหนักโมเลกุลโอโซน	16*3	กรัมต่อโมล
ปริมาตรต่อโมลของโอโซน	24.45	ลิตรต่อโมล[1]
ทำการทดลองที่อัตราการไหลก๊าซ	28.63	ลิตรต่อนาที
ระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง	2	นาที
ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต		
ขวดเก็บตัวอย่างก๊าซ A	62.5	มิลลิลิตร
ขวดเก็บตัวอย่างก๊าซ B	6.9	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต	0.005 N	
ความหนาแน่นของอากาศ	1.2928	กรัมต่อลิตร[2]

---

[1] American Public Health Association., 1977.

[2] ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ (Perry, R. H., and Chilton, C. H., 1984.)

การคำนวณปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา

ปริมาณโอโซนที่คำนวณได้ตามสมการ ง.1 $= \frac{(62.5+6.9)*0.005*2400}{2}$

$= 416.4$ มิลลิกรัมต่อนาที

หรือเทียบเท่า $= \frac{416.4}{1000}*60$

$= 24.98$ กรัมต่อชั่วโมง

หรือเทียบเท่า $= \frac{24.98}{1000}*24$

$= 0.60$ กิโลกรัมต่อวัน

ดังนั้นปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลามีค่า 416.4 มิลลิกรัมต่อนาที **หรือเทียบเท่ากับ** 24.98 กรัมต่อชั่วโมง หรือเทียบเท่ากับ 0.60 กิโลกรัมต่อวัน

การคำนวณหาความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซ (หน่วยในล้านหน่วย, ppm)

ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ $= 416.4$ มิลลิกรัมต่อนาที

$= 0.4164$ กรัมต่อนาที

เทียบเท่ากับ $= \frac{0.4164}{16*3}$

$= 8.675*10^{-3}$ โมลต่อนาที

เนื่องจากปริมาตรต่อโมลของโอโซนมีค่า 24.45 ลิตรต่อโมล

ดังนั้นอัตราการไหลโอโซน $= (8.675*10^{-3})*24.45$

$= 0.2121$ ลิตรต่อนาที

หรือเทียบเท่า $= \frac{0.2121}{1*10^{-6}}$

$= 2.2121*10^{5}$ ไมโครลิตรต่อนาที

เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซมีค่า 28.63 ลิตรต่อนาที

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซตัวอย่าง $= \frac{2.121*10^{5}}{28.63}$

$= 7.408*10^{3}$ ไมโครลิตรต่อลิตร

= 7408.31 ไมโครลิตรต่อลิตร

หรือเทียบเท่า = 7408 หน่วยในล้านหน่วย (ppm)

การคำนวณหาความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, %wt)

ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ = 416.4 มิลลิกรัมต่อนาที

= 0.4164 กรัมต่อนาที

เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซมีค่า 28.63 ลิตรต่อนาที

และความหนาแน่นของอากาศมีค่า 1.2928 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหลของก๊าซ = 28.63*1.2928

= 37.01 กรัมต่อนาที

ดังนั้นร้อยละโดยน้ำหนักของความเข้มข้นโอโซนในก๊าซตัวอย่าง = $\frac{0.4164}{37.01}*100$

= 1.12

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซตัวอย่างมีค่า 7407 หน่วยในล้านหน่วย (ppm) หรือเทียบเท่ากับร้อยละโดยน้ำหนัก 1.12 (%wt)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 การคำนวณความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่วิเคราะห์ด้วยวิธีอินดิโกคอโลริเมตริก (Indigo Colorimetric)

การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในน้ำด้วยวิธีอินดิโกคอโลริเมตริก เป็นการวัดปริมาณโอโซนในน้ำโดยเทียบกับสีของสารละลายอินดิโกซึ่งจะจางลงเมื่อทำปฏิกริยาเคมีกับโอโซน จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนโดยเทียบกับสีของสารละลายด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

การคำนวณปริมาณโอโซนในน้ำตัวอย่าง หลังจากอ่านค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยากับสารละลายอินดิโกแล้ว สามารถหาปริมาณโอโซนได้จากสมการ ข.3

$$mgO_3 / L = \frac{100 * \Delta A}{f * b * V} \qquad \text{ค.4}$$

กล่าวคือปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่างแปรผันตามความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างกับสารละลายเปรียบเทียบ แต่แปรผกผันกับความกว้างของเซลที่ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงและปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาปริมาณโอโซนในน้ำ

กำหนดให้

ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง	0.047	
ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเปรียบเทียบ	0.040	
ความกว้างของเซลที่ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสง	2	เซนติเมตร
ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	90	มิลลิลิตร

ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสง (ΔA) = 0.047-0.040

= 0.007

ปริมาณโอโซนในน้ำ = $\frac{100 * 0.007}{0.42 * 2 * 90}$

= 0.009 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร

ค.3 การคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ

กำหนดให้

อัตราการไหลของก๊าซ	13.79	ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของน้ำ	26.51	ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาเข้าระบบท่อ	37.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าระบบท่อ	0	มิลลิกรัมต่อลิตร[3]
ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาออกจากระบบท่อ	0.040	มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าคงที่ของเฮนรี	3.8	(มก.ก๊าซต่อล.อากาศ)/(มก.ก๊าซต่อล.น้ำ)[4]

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อ

ให้ค่าความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อ = x

จากสมการสมดุลมวลภายใต้สมมุติฐานว่าไม่มีการสลายตัวของโอโซนเนื่องจากเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบสั้นมาก ดังนั้น

ปริมาณโอโซนที่เข้าสู่ระบบ = ปริมาณโอโซนที่ออกจากระบบ

$$(13.79*37.02) + (26.51*0) = (13.79*x) + (26.51*0.040)$$

$$x = \frac{(13.79*37.02) + (26.51*0) - (26.51*0.040)}{13.79}$$

$$x = 36.94$$

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อมีค่า 36.94 มิลลิกรัมต่อลิตร

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าที่สภาวะสมดุล

จากสมการที่ 4.2

$$C_{in,out} = HC^{*}_{in,out}$$

---

[3] ภายใต้สมมุติฐานว่าไม่มีโอโซนละลายอยู่ในน้ำก่อนเข้าระบบท่อ

[4] [Venosa และ Opatken, 1983 อ้างถึงใน Rice และคณะ, 1986]

ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุล $= \frac{37.02}{3.8}$

= 9.74 มิลลิกรัมต่อลิตร

หาค่าร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์

จากสมการที่ 4.4

$$\text{ร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลว}}{\text{ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุล}} * 100$$

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์} = \frac{0.040}{9.74} * 100$$

$$= 0.4107$$

ดังนั้นร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ที่ความเข้มข้นโอโซนในน้ำมีค่า 0.41 %

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทมวล

กำหนดให้

อัตราการไหลของน้ำ	26.51	ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาออกจากระบบท่อ	0.040	มิลลิกรัมต่อลิตร

หาค่าอัตราการถ่ายเทมวลโอโซน

จากสมการที่ 4.5

อัตราการถ่ายเทมวลโอโซน = ความเข้มข้นของโอโซน * อัตราการไหลของของเหลว

อัตราการถ่ายเทมวลโอโซน = 0.040*26.51

= 1.066 มิลลิกรัมต่อนาที

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทมวลโอโซนมีค่า 1.066 มิลลิกรัมต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร

กำหนดให้

อัตราการไหลของก๊าซ	13.79	ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของน้ำ	26.51	ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาเข้าระบบท่อ	37.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าระบบท่อ	0	มิลลิกรัมต่อลิตร[5]
ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาออกจากระบบท่อ	0.040	มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าคงที่ของเฮนรี	3.8	(มก.ก๊าซต่อล.อากาศ)/(มก.ก๊าซต่อล.น้ำ)[6]
พื้นที่หน้าตัดของวัฏภาคของเหลว	10.48	ตารางเซนติเมตร
ความเร็วของของเหลวในระบบ	42.00	เซนติเมตรต่อวินาที

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อ

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อตามตัวอย่างวิธีการคำนวณหาร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซขาออกจากระบบท่อมีค่า 36.94 มิลลิกรัมต่อลิตร

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าและขาออกจากระบบท่อที่สภาวะสมดุล

หาค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าและขาออกจากระบบท่อตามตัวอย่างวิธีการคำนวณหาร้อยละของความเข้มข้นโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาเข้าที่สภาวะสมดุล $= \frac{37.02}{3.8}$

$= 9.74$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำขาออกที่สภาวะสมดุล $= \frac{36.94}{3.8}$

$= 9.72$ มิลลิกรัมต่อลิตร

---

[5] ภายใต้สมมุติฐานว่าไม่มีโอโซนละลายอยู่ในน้ำก่อนเข้าระบบท่อ

[6] [Venosa และ Opatken, 1983 อ้างถึงใน Rice และคณะ, 1986]

หาค่าความแตกต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยเชิง logarithmic

จากสมการ 4.1

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

โดย $\Delta C_{\ln}$ = ความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic

C_{in} = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ

C_{in}^{*} = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ

C_{out} = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ

C_{out}^{*} = ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นโอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ

ดังนั้น

$$\Delta C_{\ln} = \frac{(9.74 - 0) - (9.72 - 0.040)}{\ln\left(\frac{9.74 - 0}{9.72 - 0.040}\right)}$$

$$\Delta C_{\ln} = 9.71$$

หาปริมาตรของของเหลว

V = 550*10.48

= 5746 ลูกบาศ์กเซนติเมตร

= 5.746 ลิตร

หาค่าอัตราการถ่ายเทมวลโอโซน

หาค่าอัตราการถ่ายเทมวลโอโซนตามตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทมวล

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทมวลโอโซน = 0.040*26.51

= 1.066 มิลลิกรัมต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร

จากสมการที่ 4.6

$$\frac{Q}{V} = k_L a(\Delta c)_{\ln}$$

หรือ

$$k_L a = \frac{Q/V}{(\Delta c)_{\ln}}$$

โดย Q คือ อัตราการถ่ายเทมวล (มิลลิกรัมต่อนาที)

V คือ ปริมาตรของของเหลว (ลิตร)

$k_L a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (ต่อนาที)

$(\Delta c)_{\ln}$ คือ ความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic ของความเข้มข้นโอโซน

เพราะฉะนั้น

$$K_L a = \frac{1.066/5.746}{9.71}$$

$$= 0.0191 \quad \text{ต่อนาที}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรรวมมีค่า 0.0191 ต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
การศึกษาสมรรถนะของเครื่องผลิตโอโซน

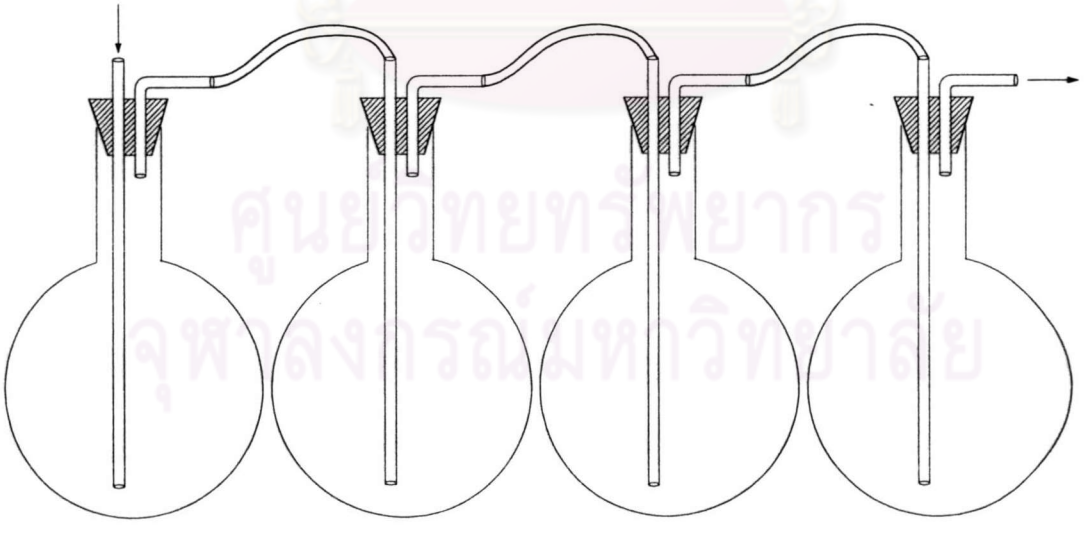
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
การศึกษาสมรรถนะของเครื่องผลิตโอโซน

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาหาวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่าง การศึกษาโดยใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ และการศึกษาโดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ โดยปัจจัยที่จะศึกษาคืออัตราการป้อนก๊าซ

ง.1 การศึกษาหาวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่าง

การศึกษาในช่วงนี้เป็นการหาวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซตัวอย่างโดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธีอัลตราไวโอเลตโฟโตเมตริกกับวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซน โดยนำขวดเก็บก๊าซตัวอย่างมาต่ออนุกรมกัน 4 ขวดเพื่อใช้ดักจับก๊าซโอโซนดังรูปที่ ง.1 ป้อนอากาศที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ 55%) เข้าสู่เครื่องผลิตโอโซนด้วยอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 33.61 ลิตรต่อนาที วิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่สารละลายในขวดเก็บก๊าซตัวอย่างแต่ละขวดโดยใช้ทั้งสองวิธี ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ ง.1 *ขวดเก็บก๊าซตัวอย่างสี่ขวดต่ออนุกรมกัน*

ตารางที่ ง.1 *ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเลตโฟโตเมตริกที่ขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดเก็บได้ที่อัตราการไหลก๊าซ 33.61 ลิตรต่อนาที*

	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	ขวดที่ 4
ความเข้มข้นโอโซน (ppm)	40.66	6.53	0.75	0.07

ตารางที่ ง.2 *ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนที่ขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดเก็บได้ที่อัตราการไหลก๊าซ 33.61 ลิตรต่อนาที*

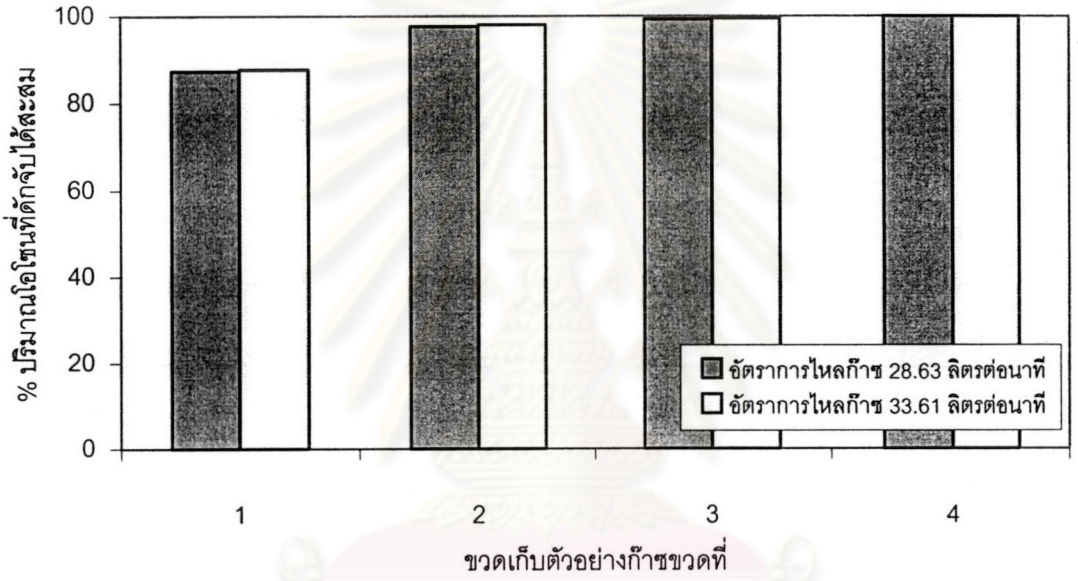
	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	ขวดที่ 4
ความเข้มข้นโอโซน (ppm)	6101	720	95	38

พิจารณาความเข้มข้นของโอโซนที่ดักจับได้จากทั้งสองวิธีจะพบว่าความเข้มข้นที่หาได้ด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่หาได้จากวิธีอัลตราไวโอเลตโฟโตเมตริก ทั้งนี้เนื่องจากวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนเป็นการหาปริมาณโอโซนทั้งหมดในก๊าซตัวอย่าง แต่วิธีอัลตราไวโอเลตโฟโตเมตริกเป็นการเก็บตัวอย่างก๊าซบางส่วนมาหาปริมาณโอโซนแล้วเทียบสัดส่วนเพื่อหาปริมาณโอโซนทั้งหมดในก๊าซตัวอย่าง ดังนั้นวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนจะให้ค่าความเข้มข้นที่เชื่อถือได้มากกว่า การทดลองในขั้นถัดไปจึงเลือกใช้วิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนในการศึกษา

การทดลองขั้นต่อมาเป็นการหาจำนวนขวดเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เก็บตัวอย่างก๊าซ โดยเมื่อพิจารณาความเข้มข้นโอโซนที่ดักจับได้ของขวดเก็บตัวอย่างที่ต่ออนุกรมกันพบว่าหลังจากขวดที่ 4 แล้วความเข้มข้นโอโซนมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถดักจับได้ จึงสมมุติให้การต่ออนุกรม 4 ขวด สามารถดักจับปริมาณโอโซนได้ 100% จากนั้นคำนวณหาปริมาณโอโซนที่ดักจับได้และปริมาณโอโซนที่ดักจับได้สะสมของขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดได้ผลดังตารางที่ ง.3 และนำมาเขียนกราฟปริมาณโอโซนที่ดักจับได้สะสมดังรูปที่ ง.2

ตารางที่ ง.3 *ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนที่ขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดเก็บได้ ณ อัตราการไหลก๊าซ 28.63 และ 33.61 ลิตรต่อนาที*

	อัตราการไหล 28.63 ลิตรต่อนาที				อัตราการไหล 33.61 ลิตรต่อนาที			
	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	ขวดที่ 4	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	ขวดที่ 4
ปริมาณโอโซน (กรัมต่อชั่วโมง)	23.14	2.74	0.41	0.19	24.15	2.85	0.38	0.15
% ปริมาณโอโซนที่ดักจับได้	87.39	10.34	1.56	0.71	87.74	10.35	1.36	0.54
% ปริมาณโอโซนที่ดักจับได้สะสม	87.39	97.73	99.29	100	87.74	98.09	99.46	100

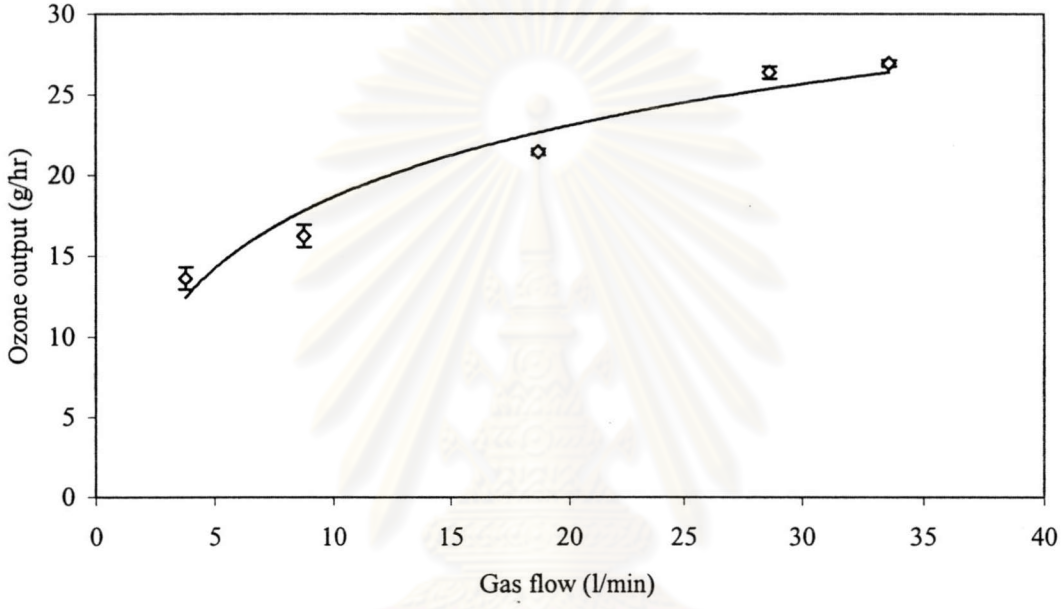


รูปที่ ง.2 *ร้อยละปริมาณโอโซนที่ดักจับได้สะสมที่ขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดเก็บได้ ณ อัตราการไหลก๊าซ 28.63 และ 33.61 ลิตรต่อนาที*

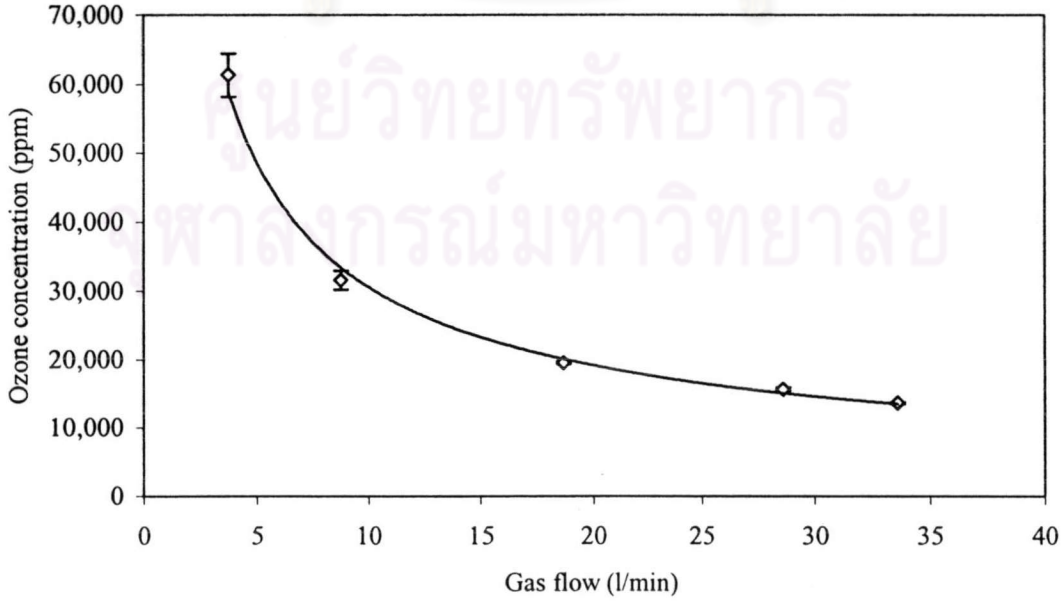
จากรูปที่ ง.2 จะเห็นว่าขวดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 สามารถดักจับปริมาณโอโซนได้ร้อยละ 87.39, 97.73 และ 99.29 ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลก๊าซ 28.63 ลิตรต่อนาที และร้อยละ 87.74, 98.09 และ 99.46 ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลก๊าซ 33.61 ลิตรต่อนาที ดังนั้นจึงได้แนวทางในการทดลองขั้นต่อไปว่าจะเลือกใช้ขวดเก็บตัวอย่างสองขวดต่อออนุกรมกัน เพราะสามารถดักจับก๊าซโอโซนได้มากกว่าร้อยละ 97 ของปริมาณโอโซนที่อยู่ในก๊าซทั้งหมด

ง.2 การศึกษาโดยใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ

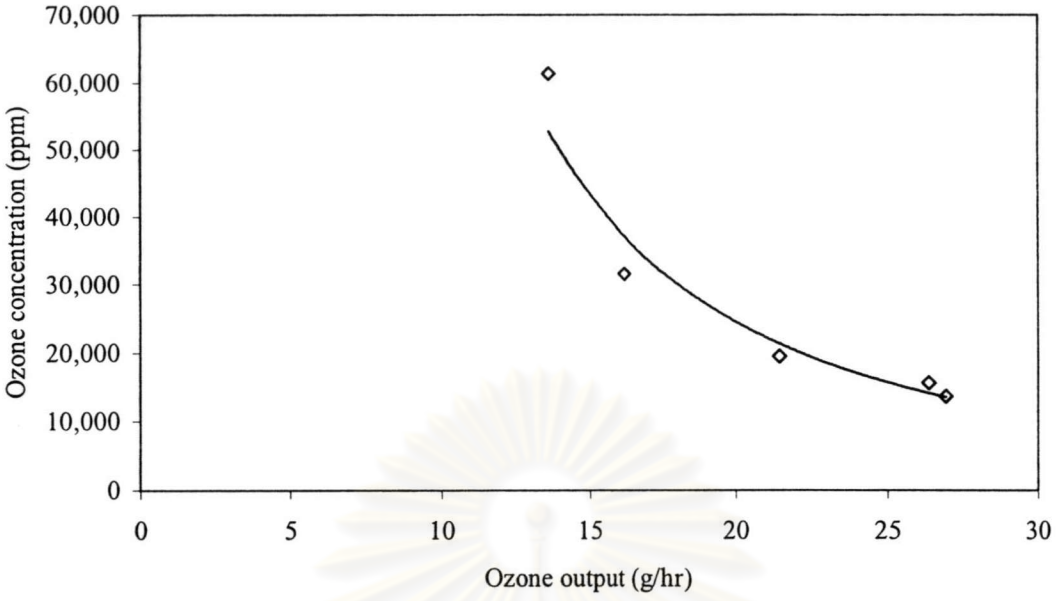
การทดลองหาปริมาณก๊าซโอโซนที่เครื่องผลิตโอโซนผลิตได้ ทำโดยนำขวดเก็บก๊าซตัวอย่างมาต่ออนุกรมกัน 2 ขวดเพื่อใช้ดักจับก๊าซโอโซน ที่เกิดจากการป้อนอากาศที่สภาวะปกติเข้าสู่เครื่องผลิตโอโซนโดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ จากนั้นดักจับก๊าซโอโซนด้วยขวดเก็บตัวอย่าง 2 ขวดที่ต่ออนุกรมกันแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโอโซนที่สารละลายในขวดเก็บก๊าซตัวอย่างดักจับ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ ง.3 *ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ*

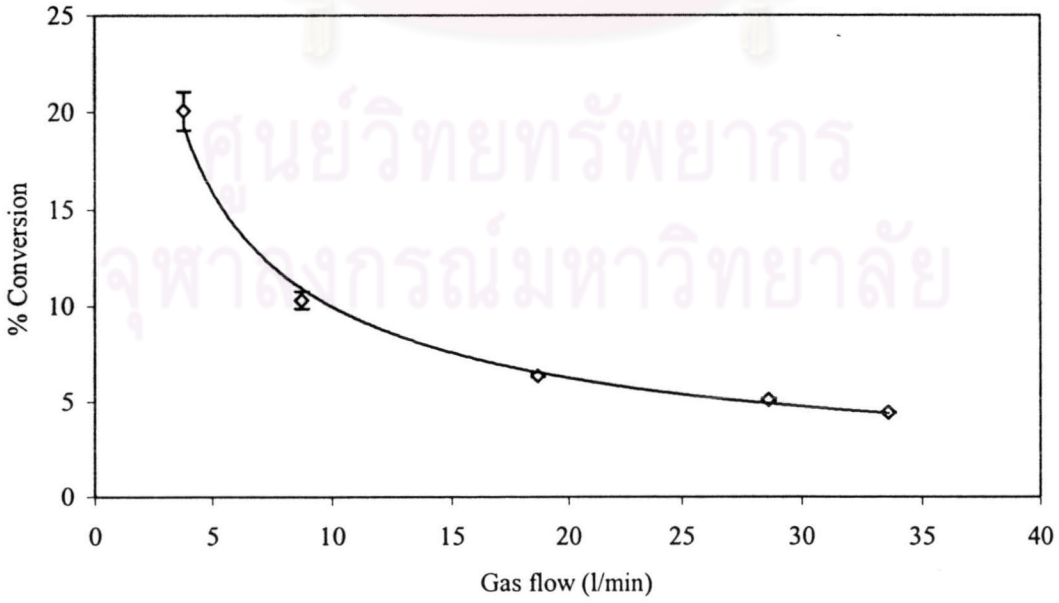


รูปที่ ง.4 *ความเข้มข้นของโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ*



รูปที่ ง.5 *ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ณ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ*

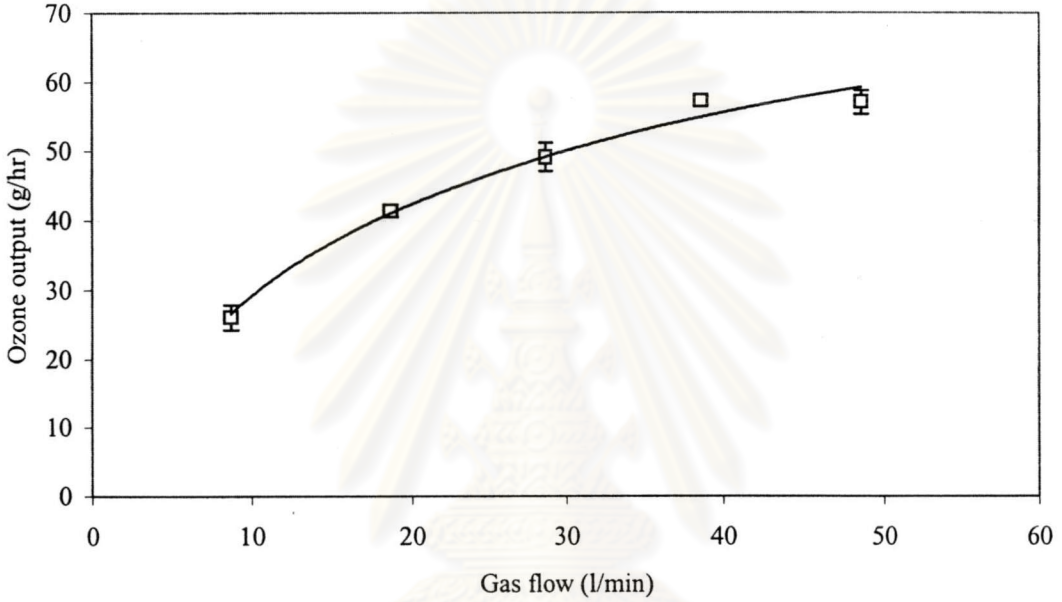
ค่าเปอร์เซ็นต์ conversion ของก๊าซออกซิเจนในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซนเมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ง.7 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ conversion นี้เป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนของปริมาณก๊าซออกซิเจนส่วนที่มีการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซโอโซนต่อปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมด โดยปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ป้อนเข้าระบบหาได้จากการคำนวณโดยกำหนดให้ในอากาศที่ป้อนเข้าเครื่องมีก๊าซออกซิเจนในสัดส่วนร้อยละ 21 โดยปริมาตร



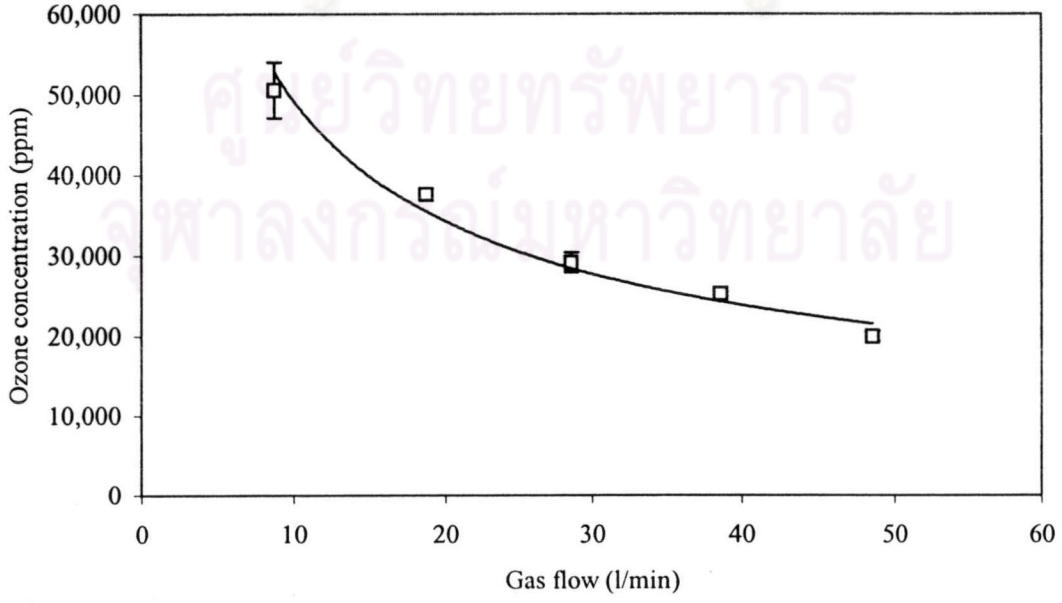
รูปที่ ง.6 *เปอร์เซ็นต์ conversion ของก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ*

ง.3 การศึกษาโดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ

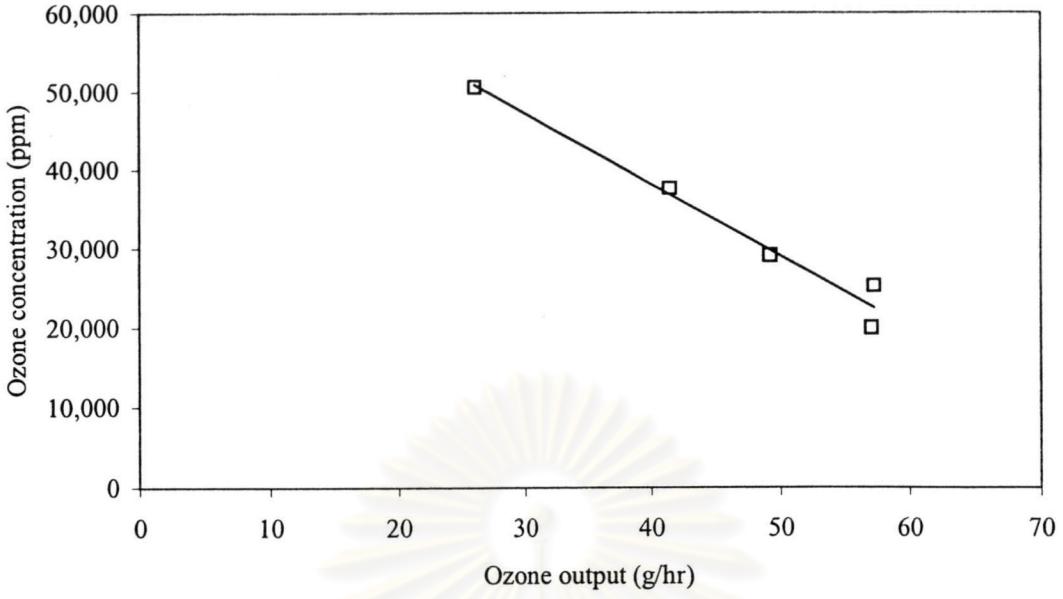
การทดลองหาปริมาณก๊าซโอโซนที่เครื่องผลิตโอโซนผลิตได้โดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ จะทำการป้อนก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 เข้าเครื่องผลิตโอโซนโดยใช้ความดันภายในถังออกซิเจนโดยตรงไม่ผ่านปั๊มอากาศ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้ด้วยวิธีเช่นเดียวการใช้อากาศเป็นวัตถุดิบได้ผลการทดลองดังนี้



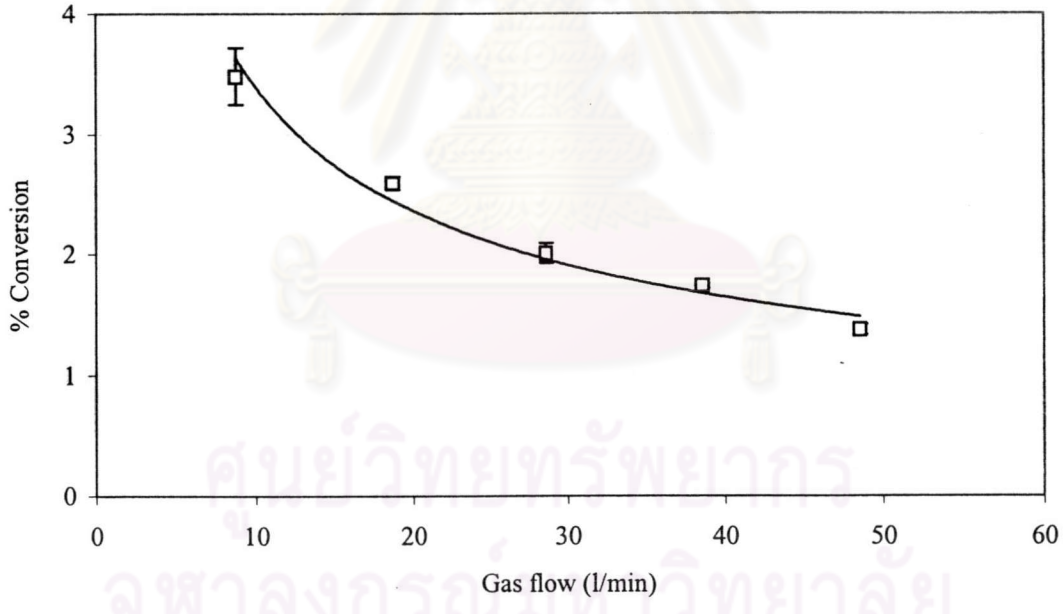
รูปที่ ง.7 *ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ*



รูปที่ ง.8 *ความเข้มข้นของโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ*



รูปที่ ง.9 *ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ณ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ*

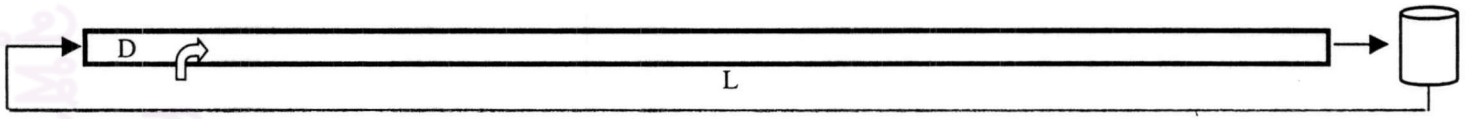


รูปที่ ง.10 *เปอร์เซ็นต์ conversion ของก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ*

ภาคผนวก จ
ผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

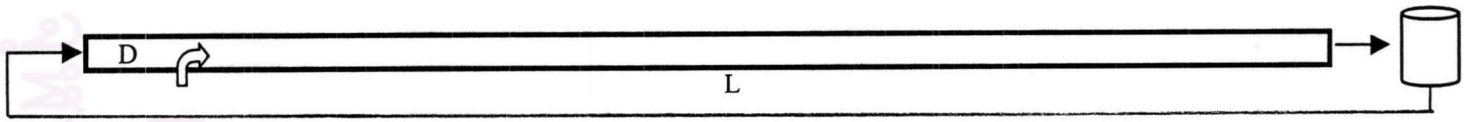
ตารางที่ จ.1 *ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น*



				Ozone cencentration (mg/l)																
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow	Water Flow	Air/water	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
(L/min)	(L/min)	ratio	L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.003	0.005	0.003	0.004	0.003	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.007		0.008
5.81	26.51	0.219		0	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.004	0.008	0.008	0.010	0.010	0.014	0.019		0.030
13.79	26.51	0.520		0	0.004	0.005	0.008	0.008	0.012	0.019	0.018	0.017	0.026	0.029	0.024	0.026	0.037	0.034		0.040
21.76	26.51	0.821		0	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.004	0.007	0.009	0.011	0.012	0.012	0.016	0.022	0.016		0.019
21.76	21.09	1.032		0	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.004	0.007	0.009	0.014	0.017	0.014	0.018	0.023	0.017		0.019
21.76	17.60	1.236		0	0.010	0.010	0.012	0.008	0.012	0.016	0.015	0.016	0.020	0.020	0.021	0.026	0.035	0.023		0.025
27.74	17.60	1.576		0	0.012	0.011	0.015	0.014	0.017	0.019	0.023	0.021	0.024	0.027	0.028	0.031	0.034	0.025		0.025
33.72	17.60	1.916		0	0.008	0.007	0.004	0.006	0.004	0.007	0.014	0.012	0.018	0.020	0.019	0.028	0.022	0.019		0.020

				Ozone cencentration (Standard Deviation)																
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow	Water Flow	Air/water	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
(L/min)	(L/min)	ratio	L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002		0.004
5.81	26.51	0.219		0	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.003	0.006		0.010
13.79	26.51	0.520		0	0.003	0.003	0.007	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.001	0.002	0.002	0.000	0.002		0.001
21.76	26.51	0.821		0	0.001	0.002	0.000	0.002	0.001	0.004	0.006	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000		0.002
21.76	21.09	1.032		0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.004	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003		0.003
21.76	17.60	1.236		0	0.000	0.001	0.005	0.004	0.007	0.007	0.001	0.004	0.000	0.005	0.004	0.002	0.008	0.000		0.004
27.74	17.60	1.576		0	0.001	0.001	0.004	0.002	0.006	0.005	0.004	0.006	0.006	0.002	0.004	0.003	0.003	0.001		0.002
33.72	17.60	1.916		0	0.003	0.002	0.000	0.002	0.004	0.001	0.002	0.003	0.001	0.003	0.000	0.001	0.001	0.003		0.003

ตารางที่ จ.2 *ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น*



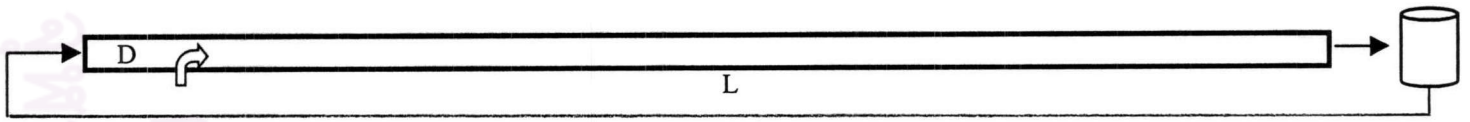
Ozone cencentration (mg/l)

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
			distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.002		0.006
5.81	26.51	0.219		0	0.003	0.005	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.003	0.004	0.006		0.008
13.79	26.51	0.520		0	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.006	0.006		0.008
21.76	26.51	0.821		0	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.006	0.005		0.006
21.76	21.09	1.032		0	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.005	0.004	0.006	0.005		0.007
21.76	17.60	1.236		0	0.005	0.007	0.006	0.004	0.005	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.007	0.007	0.007		0.010
27.74	17.60	1.576		0	0.005	0.007	0.008	0.006	0.007	0.007	0.009	0.007	0.008	0.006	0.005	0.008	0.010	0.009		0.010
33.72	17.60	1.916		0	0.007	0.009	0.007	0.008	0.007	0.007	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.012	0.013	0.006		0.008

Ozone cencentration (Standard Deviation)

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
			distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001		0.000
5.81	26.51	0.219		0	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002	0.004		0.000
13.79	26.51	0.520		0	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.003		0.001
21.76	26.51	0.821		0	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.003	0.001		0.001
21.76	21.09	1.032		0	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.002
21.76	17.60	1.236		0	0.003	0.001	0.003	0.002	0.003	0.005	0.006	0.003	0.005	0.004	0.001	0.001	0.004	0.002		0.004
27.74	17.60	1.576		0	0.003	0.002	0.005	0.005	0.006	0.008	0.006	0.004	0.000	0.004	0.003	0.003	0.006	0.004		0.003
33.72	17.60	1.916		0	0.000	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002	0.007		0.004

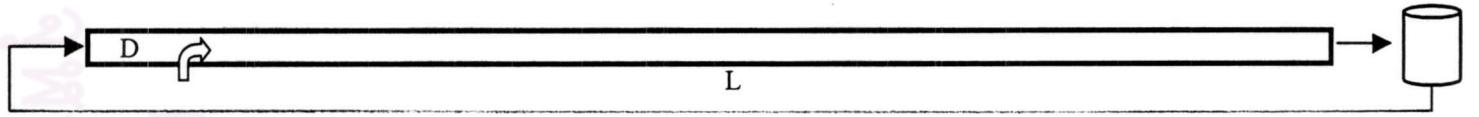
ตารางที่ จ.3 *ร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น*



				Relative ozone cencentration (%)																	
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.011	0.017	0.013	0.013	0.010	0.005	0.005	0.007	0.013	0.011	0.016	0.016	0.017	0.025		0.032
5.81	26.51	0.219		0	0.002	0.005	0.002	0.002	0.002	0.016	0.019	0.029	0.052	0.054	0.064	0.064	0.090	0.126		0.199
13.79	26.51	0.520		0	0.046	0.049	0.081	0.087	0.122	0.190	0.185	0.171	0.263	0.296	0.250	0.266	0.380	0.345		0.413
21.76	26.51	0.821		0	0.014	0.038	0.014	0.024	0.014	0.048	0.086	0.114	0.138	0.155	0.162	0.204	0.290	0.204		0.248
21.76	21.09	1.032		0	0.032	0.028	0.035	0.016	0.016	0.055	0.087	0.122	0.184	0.219	0.186	0.239	0.297	0.225		0.253
21.76	17.60	1.236		0	0.128	0.124	0.162	0.110	0.155	0.207	0.197	0.214	0.259	0.262	0.269	0.342	0.452	0.304		0.331
27.74	17.60	1.576		0	0.176	0.169	0.219	0.212	0.251	0.274	0.337	0.317	0.361	0.396	0.415	0.466	0.509	0.368		0.376
33.72	17.60	1.916		0	0.139	0.113	0.065	0.104	0.065	0.122	0.230	0.191	0.295	0.326	0.308	0.460	0.369	0.304		0.330

				Relative ozone cencentration (Standard Deviation)																	
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.002	0.006	0.003	0.007	0.006	0.005	0.005	0.006	0.008	0.003	0.003	0.005	0.007	0.007		0.015
5.81	26.51	0.219		0	0.002	0.007	0.002	0.002	0.002	0.017	0.002	0.007	0.005	0.012	0.012	0.002	0.020	0.037		0.066
13.79	26.51	0.520		0	0.035	0.031	0.069	0.031	0.035	0.031	0.031	0.035	0.042	0.012	0.023	0.023	0.000	0.019		0.008
21.76	26.51	0.821		0	0.010	0.024	0.000	0.024	0.020	0.049	0.073	0.024	0.029	0.024	0.015	0.005	0.000	0.005		0.029
21.76	21.09	1.032		0	0.008	0.014	0.007	0.014	0.017	0.030	0.017	0.020	0.046	0.022	0.024	0.039	0.030	0.033		0.039
21.76	17.60	1.236		0	0.005	0.020	0.063	0.049	0.093	0.088	0.015	0.049	0.005	0.068	0.049	0.024	0.102	0.000		0.054
27.74	17.60	1.576		0	0.017	0.017	0.055	0.033	0.089	0.078	0.055	0.083	0.089	0.028	0.055	0.050	0.044	0.011		0.033
33.72	17.60	1.916		0	0.049	0.037	0.006	0.037	0.068	0.025	0.031	0.049	0.012	0.055	0.006	0.025	0.018	0.049		0.055

ตารางที่ จ.4 *ร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น*



				Relative ozone cencentration (%)																
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.012	0.013	0.012	0.009	0.005	0.003	0.006	0.001	0.003	0.001	0.006	0.001	0.004	0.008		0.024
5.81	26.51	0.219		0	0.017	0.035	0.021	0.017	0.021	0.017	0.014	0.007	0.021	0.017	0.014	0.019	0.026	0.040		0.055
13.79	26.51	0.520		0	0.019	0.027	0.022	0.016	0.024	0.027	0.035	0.024	0.027	0.035	0.030	0.041	0.062	0.057		0.081
21.76	26.51	0.821		0	0.035	0.041	0.035	0.041	0.021	0.035	0.028	0.021	0.048	0.031	0.021	0.055	0.076	0.062		0.076
21.76	21.09	1.032		0	0.038	0.048	0.052	0.035	0.045	0.031	0.035	0.024	0.035	0.062	0.066	0.052	0.079	0.066		0.090
21.76	17.60	1.236		0	0.062	0.097	0.076	0.055	0.066	0.090	0.072	0.079	0.079	0.079	0.062	0.097	0.097	0.090		0.124
27.74	17.60	1.576		0	0.074	0.098	0.114	0.086	0.098	0.106	0.137	0.110	0.125	0.090	0.078	0.125	0.149	0.129		0.141
33.72	17.60	1.916		0	0.113	0.143	0.122	0.130	0.117	0.109	0.182	0.156	0.156	0.169	0.165	0.204	0.217	0.096		0.139

				Relative ozone cencentration (Standard Deviation)																
			point	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	distance,L (cm)	0	10	30	60	90	120	150	180	210	250	300	350	400	450	500		
			L/D	0.00	2.69	8.06	16.13	24.19	32.26	40.32	48.39	56.45	67.20	80.65	94.09	107.53	120.97	134.41		
2.00	26.51	0.075		0	0.003	0.001	0.000	0.004	0.004	0.004	0.000	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001	0.006	0.003		0.000
5.81	26.51	0.219		0	0.010	0.020	0.015	0.015	0.015	0.024	0.015	0.020	0.020	0.020	0.020	0.007	0.012	0.027		0.000
13.79	26.51	0.520		0	0.019	0.008	0.008	0.008	0.004	0.023	0.019	0.004	0.008	0.019	0.019	0.004	0.004	0.027		0.008
21.76	26.51	0.821		0	0.005	0.029	0.015	0.000	0.000	0.020	0.010	0.015	0.010	0.005	0.000	0.039	0.039	0.010		0.010
21.76	21.09	1.032		0	0.024	0.010	0.015	0.000	0.005	0.015	0.000	0.024	0.010	0.000	0.005	0.005	0.005	0.005		0.029
21.76	17.60	1.236		0	0.039	0.010	0.039	0.029	0.044	0.068	0.073	0.034	0.063	0.054	0.010	0.020	0.049	0.024		0.059
27.74	17.60	1.576		0	0.039	0.028	0.072	0.078	0.094	0.116	0.094	0.055	0.000	0.061	0.044	0.044	0.089	0.061		0.044
33.72	17.60	1.916		0	0.000	0.031	0.025	0.012	0.043	0.018	0.025	0.025	0.000	0.006	0.012	0.043	0.037	0.111		0.074

ตารางที่ จ.5 *ความเข้มข้นของโอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	Input gas characteristic			O_3 concentration (mg/l)				
			O_3 concentration		O_3 input rate	Input		Output		log-mean
			(%wt)	(mg/l)	(mg/min)	Gas	Water*	Gas**	Water	difference
2.00	26.51	0.075	7.885	101.94	203.88	101.94	0	101.83	0.008	26.81
5.81	26.51	0.219	4.505	58.24	338.55	58.24	0	58.10	0.030	15.29
13.79	26.51	0.520	2.864	37.02	510.34	37.02	0	36.94	0.040	9.71
21.76	26.51	0.821	2.254	29.14	633.96	29.14	0	29.11	0.019	7.65
21.76	21.09	1.032	2.254	29.14	633.96	29.14	0	29.12	0.019	7.66
21.76	17.60	1.236	2.254	29.14	633.96	29.14	0	29.12	0.025	7.65
27.74	17.60	1.576	1.984	25.65	711.51	25.65	0	25.64	0.025	6.74
33.72	17.60	1.916	1.791	23.15	780.68	23.15	0	23.14	0.020	6.08

*Assume to be 0

**Assume that no ozone decomposition

ตารางที่ จ.6 *ความเข้มข้นของโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	Input gas characteristic			O_3 concentration (mg/l)				
			O_3 concentration		O_3 input rate	Input		Output		log-mean
			(%wt)	(mg/l)	(mg/min)	Gas	Water	Gas	Water	difference
2.00	26.51	0.075	6.855	88.62	177.23	88.62	0	88.53	0.006	23.31
5.81	26.51	0.219	3.342	43.20	251.12	43.20	0	43.16	0.008	11.36
13.79	26.51	0.520	1.868	24.15	332.94	24.15	0	24.14	0.008	6.35
21.76	26.51	0.821	1.374	17.76	386.45	17.76	0	17.75	0.006	4.67
21.76	21.09	1.032	1.374	17.76	386.45	17.76	0	17.75	0.007	4.67
21.76	17.60	1.236	1.374	17.76	386.45	17.76	0	17.75	0.010	4.67
27.74	17.60	1.576	1.167	15.08	418.35	15.08	0	15.08	0.010	3.96
33.72	17.60	1.916	1.023	13.22	445.89	13.22	0	13.22	0.008	3.48

ตารางที่ จ.7 *พื้นที่หน้าตัด ความเร็วและเวลาที่อยู่ในระบบของของไหลแต่ละวัฏภาค*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	Cross sectional area (cm^2)		Velocity (cm/s)		Retention time (s)	
			Gas	Water	Gas	Water	Gas	Water
2.00	26.51	0.075	0.10	10.77	330	41	1.52	12.20
5.81	26.51	0.219	0.25	10.62	390	42	1.28	11.90
13.79	26.51	0.520	0.39	10.48	570	42	0.88	11.90
21.76	26.51	0.821	0.60	10.27	610	43	0.82	11.63
21.76	21.09	1.032	0.59	10.28	510	35	0.98	14.29
21.76	17.60	1.236	0.74	10.13	450	28	1.11	17.86
27.74	17.60	1.576	0.90	9.97	500	29	1.00	17.24
33.72	17.60	1.916	1.05	9.82	540	30	0.93	16.67

ตารางที่ จ.8 *ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของของไหลแต่ละวัฏภาค*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	Reynolds number	
			Gas	Water
2.00	26.51	0.075	841	14,857
5.81	26.51	0.219	1,572	15,113
13.79	26.51	0.520	2,869	15,013
21.76	26.51	0.821	3,808	15,216
21.76	21.09	1.032	3,157	12,391
21.76	17.60	1.236	3,120	9,840
27.74	17.60	1.576	3,823	10,111
33.72	17.60	1.916	4,460	10,381

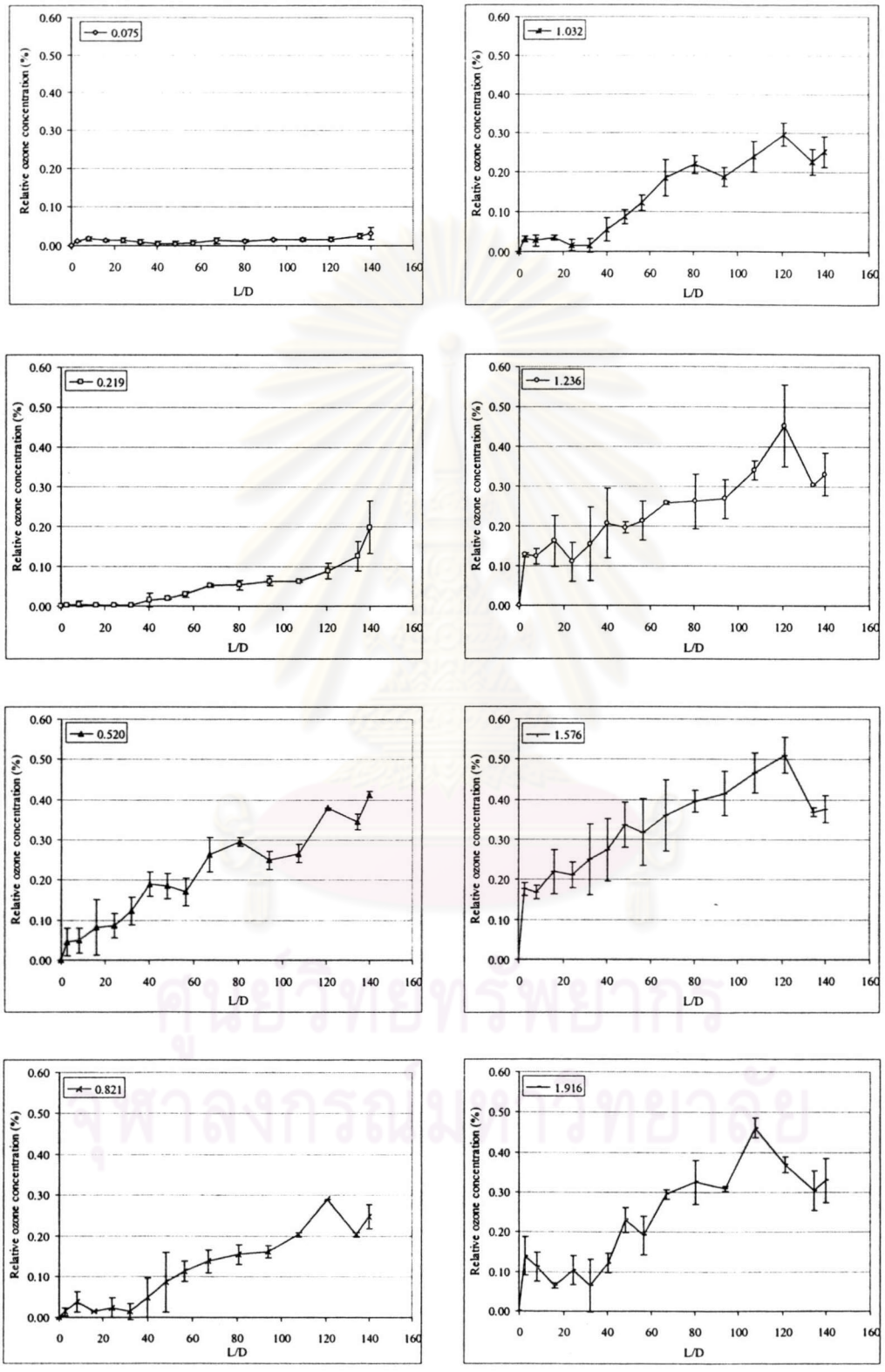
ตารางที่ จ.9 *อัตราการถ่ายเทโอโซนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	O_3 transfer rate (mg/min)	SD*	k_La (min^{-1})	SD
2.00	26.51	0.075	0.224	0.109	0.0015	0.0007
5.81	26.51	0.219	0.806	0.268	0.0095	0.0032
13.79	26.51	0.520	1.066	0.020	0.0201	0.0004
21.76	26.51	0.821	0.505	0.060	0.0123	0.0015
21.76	21.09	1.032	0.409	0.063	0.0100	0.0015
21.76	17.60	1.236	0.447	0.072	0.0111	0.0018
27.74	17.60	1.576	0.447	0.040	0.0128	0.0011
33.72	17.60	1.916	0.354	0.059	0.0114	0.0019

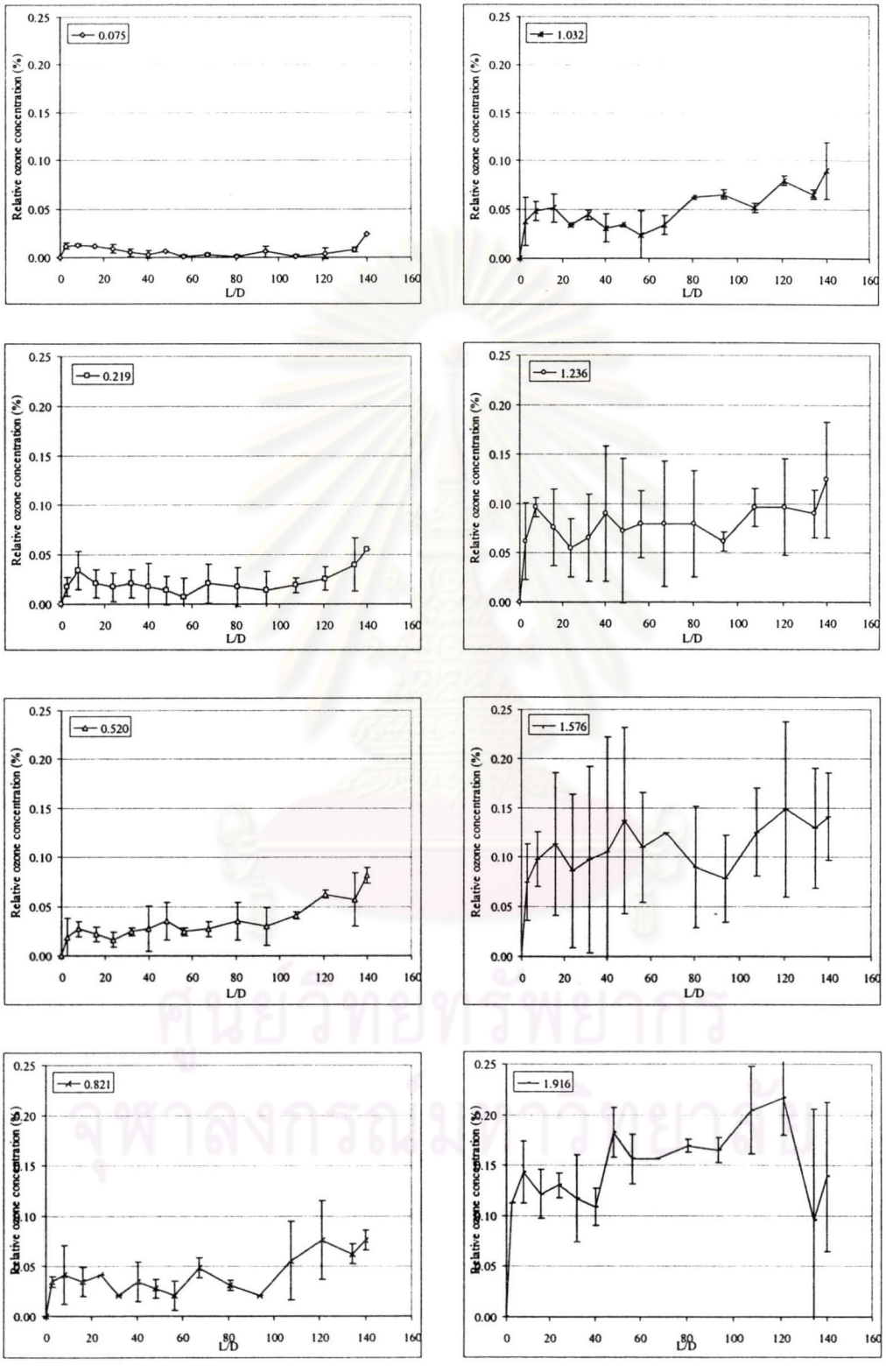
*SD = Standard Deviation

ตารางที่ จ.10 *อัตราการถ่ายเทโอโซนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น*

Air flow (L/min)	Water Flow (L/min)	Air/water ratio	O_3 transfer rate (mg/min)	SD	k_La (min^{-1})	SD
2.00	26.51	0.075	0.168	0.000	0.0013	0.0000
5.81	26.51	0.219	0.224	0.000	0.0036	0.0000
13.79	26.51	0.520	0.210	0.020	0.0061	0.0006
21.76	26.51	0.821	0.154	0.020	0.0062	0.0008
21.76	21.09	1.032	0.145	0.047	0.0058	0.0019
21.76	17.60	1.236	0.168	0.079	0.0068	0.0032
27.74	17.60	1.576	0.168	0.053	0.0081	0.0026
33.72	17.60	1.916	0.149	0.079	0.0084	0.0044



รูปที่ จ.1 *ผลการทดลองในหน่วยร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น*

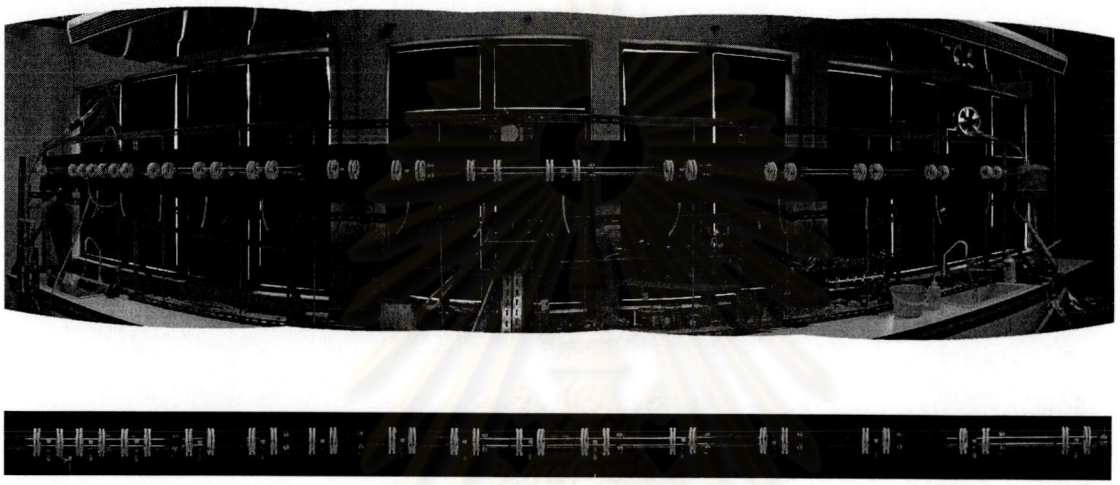


รูปที่ จ.2 *ผลการทดลองร้อยละความเข้มข้นของโอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น*

ภาคผนวก ฉ
ภาพอุปกรณ์ทดลอง

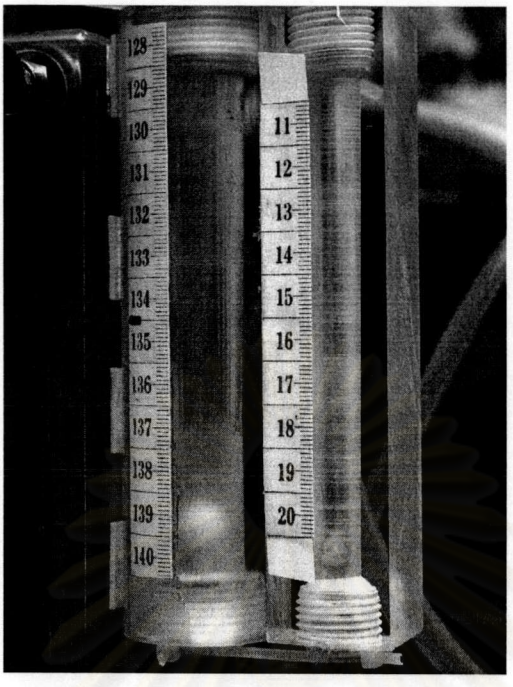
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ
ภาพอุปกรณ์ทดลอง

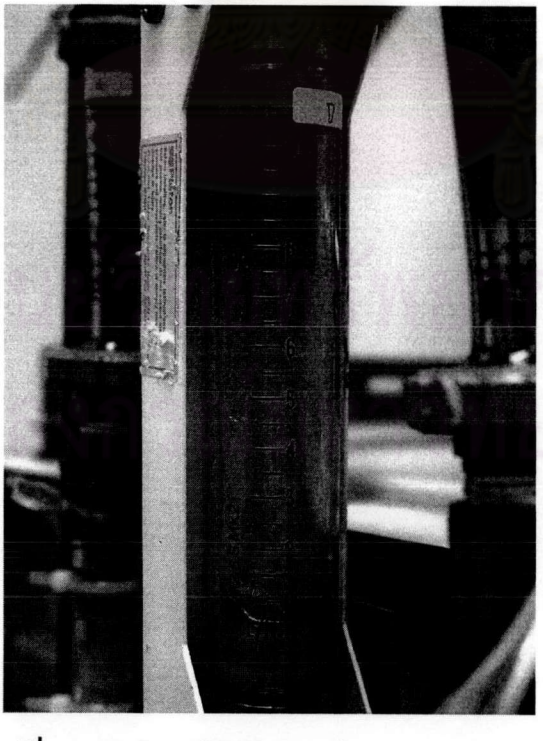


รูปที่ ฉ.1 *ท่อที่ใช้ทำการทดลอง*

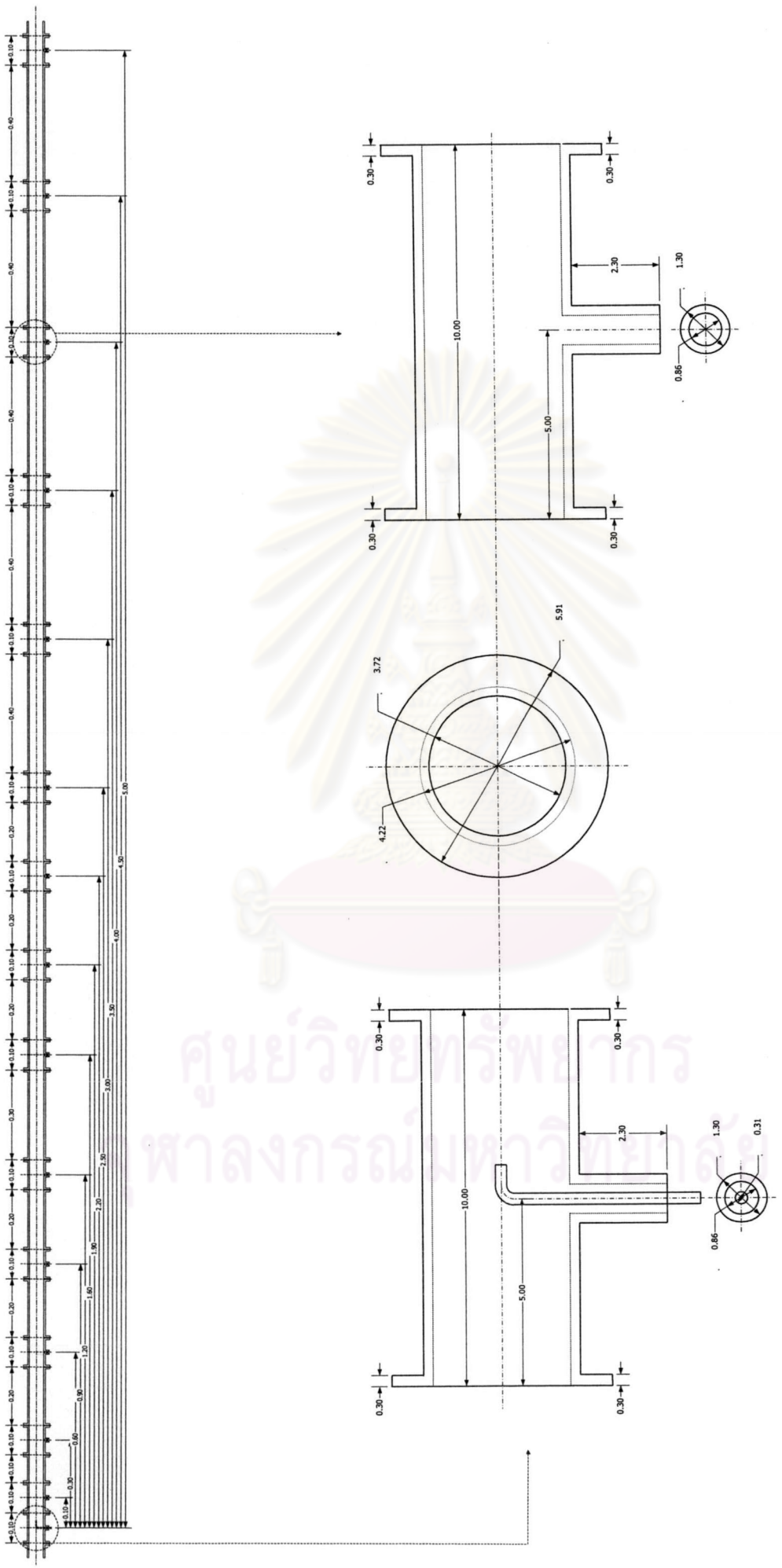
รูปที่ ฉ.2 *เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการทดลอง*



รูปที่ ฉ.3 *อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ*



รูปที่ ฉ.4 *อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของเหลว*

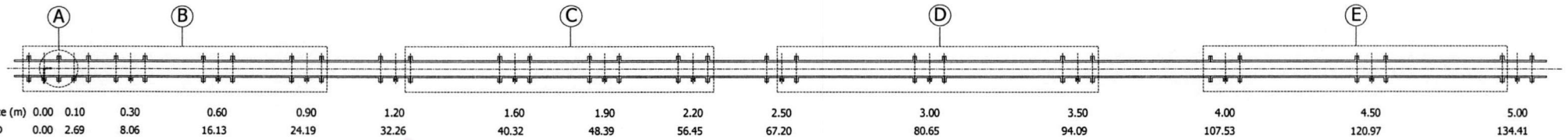


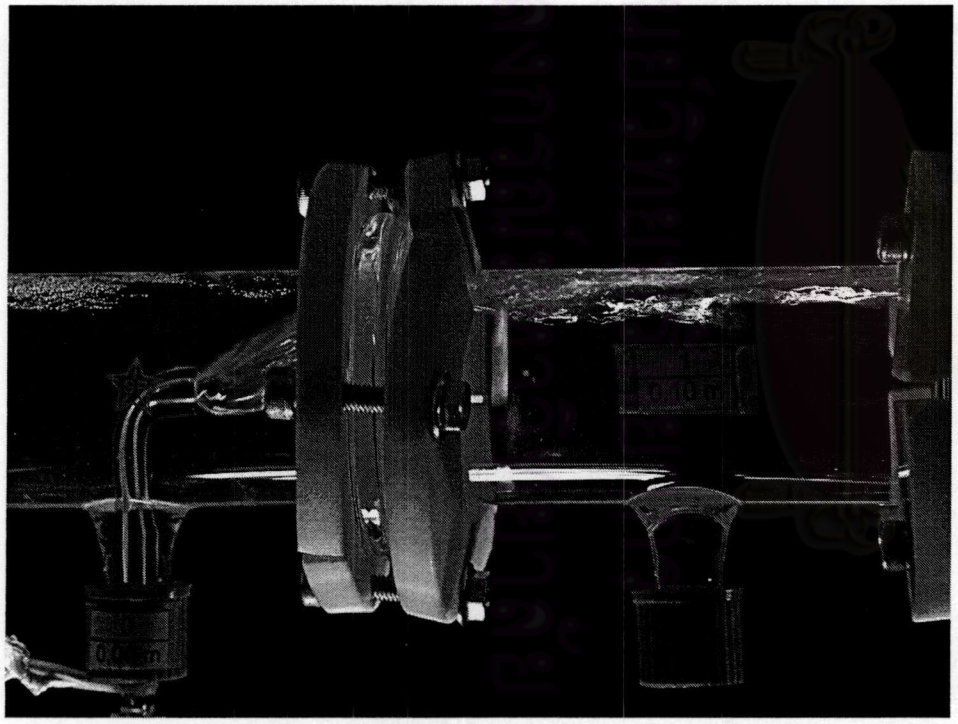
รูปที่ ฉ.5 *แผนผังท่อที่ใช้ทดลอง*

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

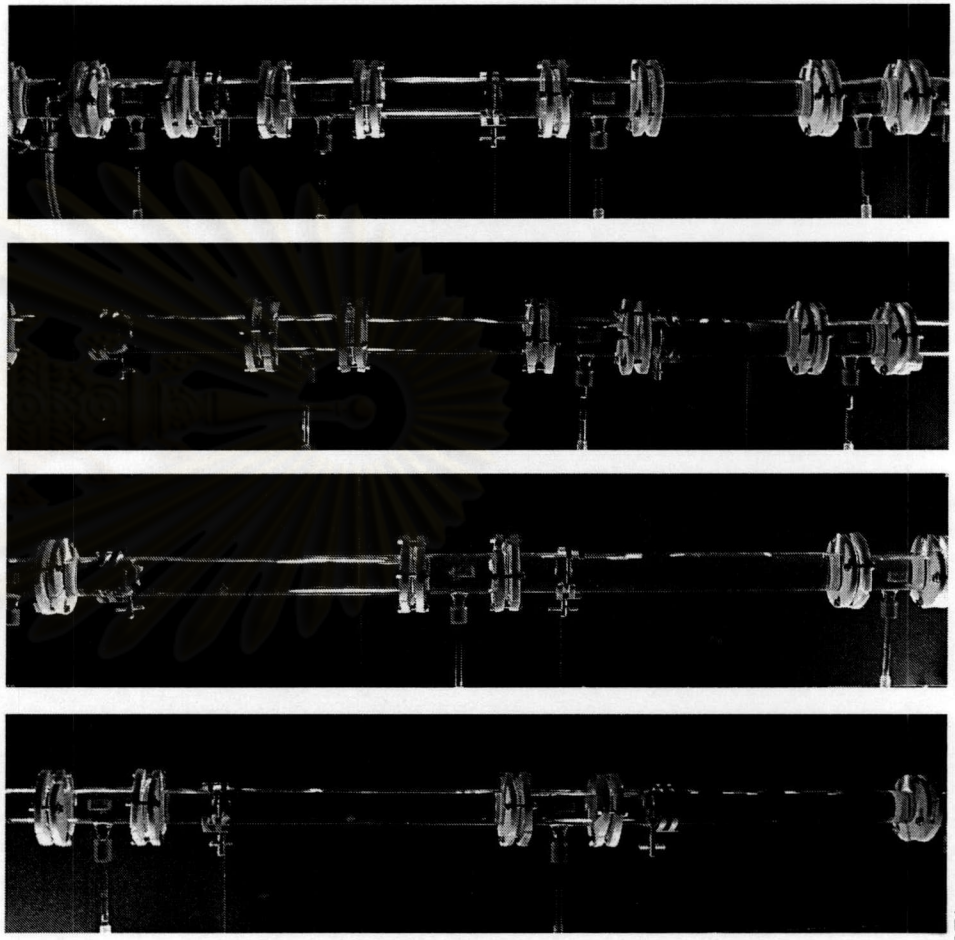
ภาคผนวก ซ
ภาพแสดงรูปแบบการไหล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

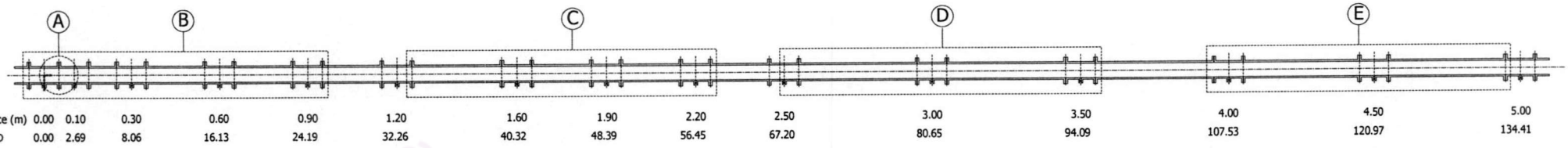


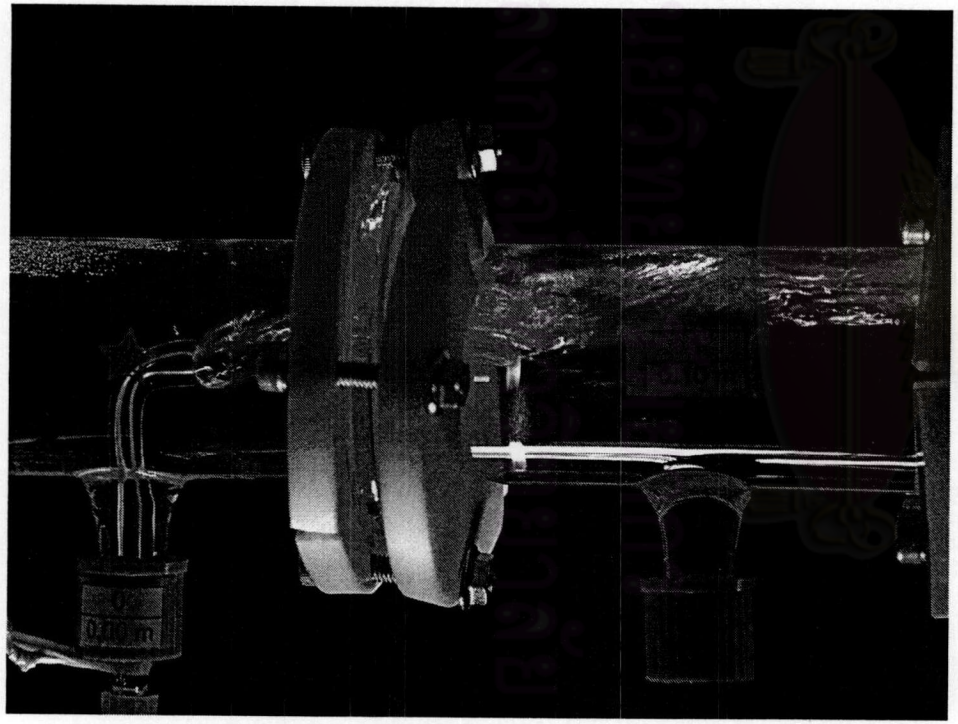


A



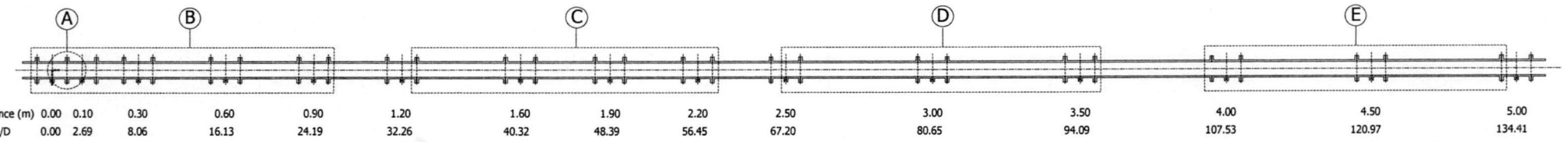
รูปที่ ซ.1 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075*

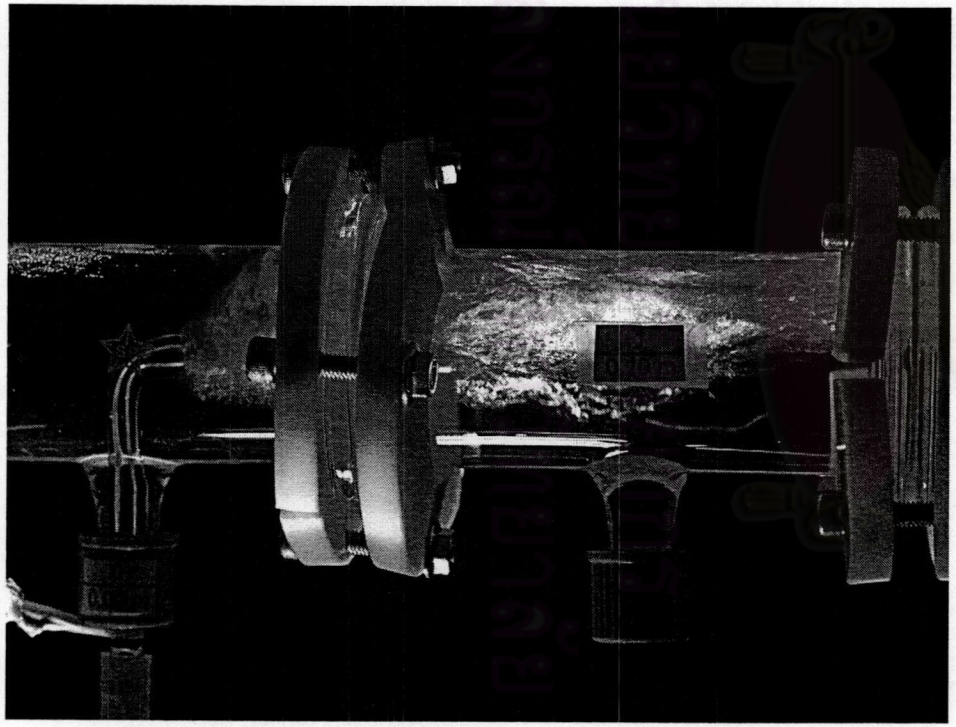




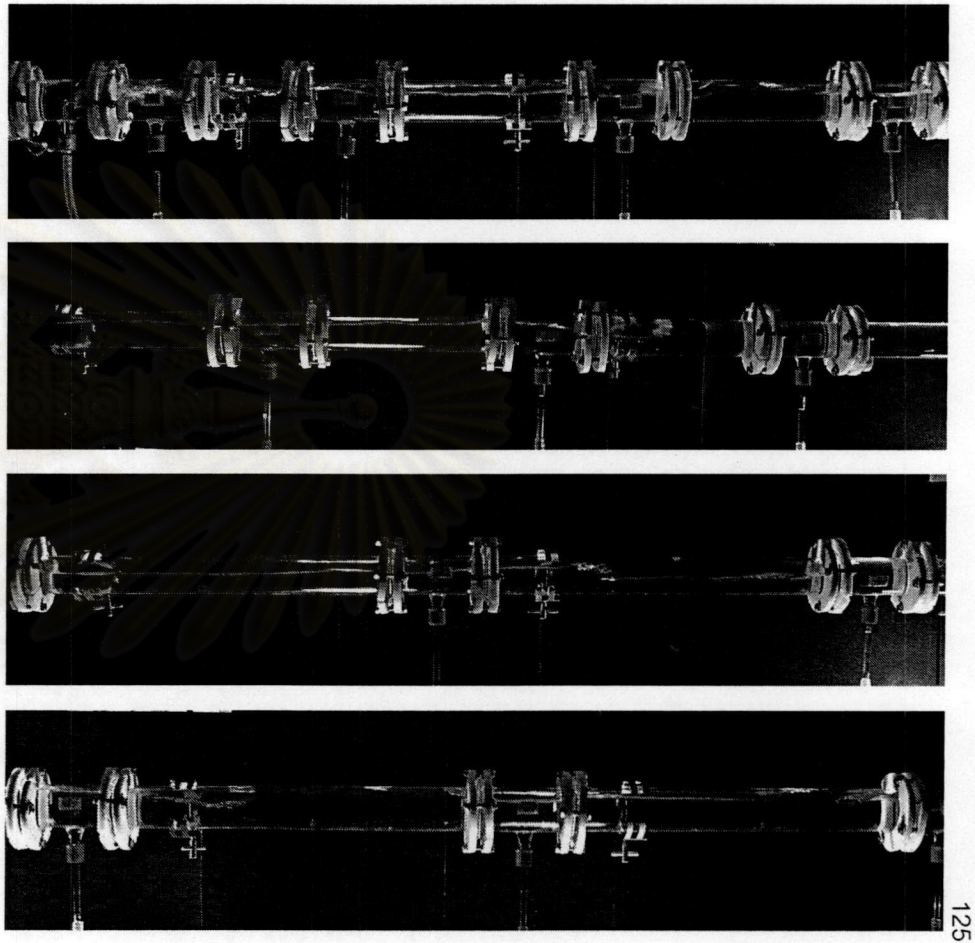
A

รูปที่ ซ.2 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.219*

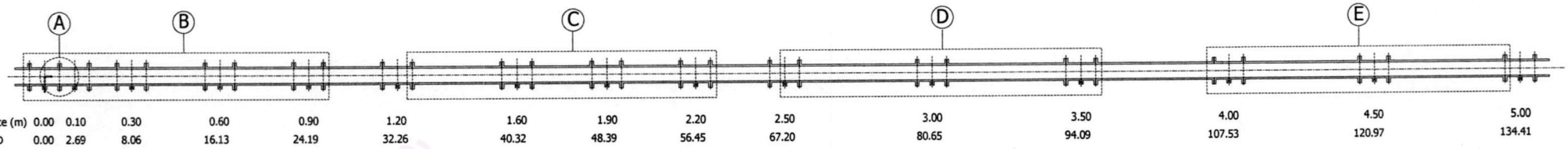


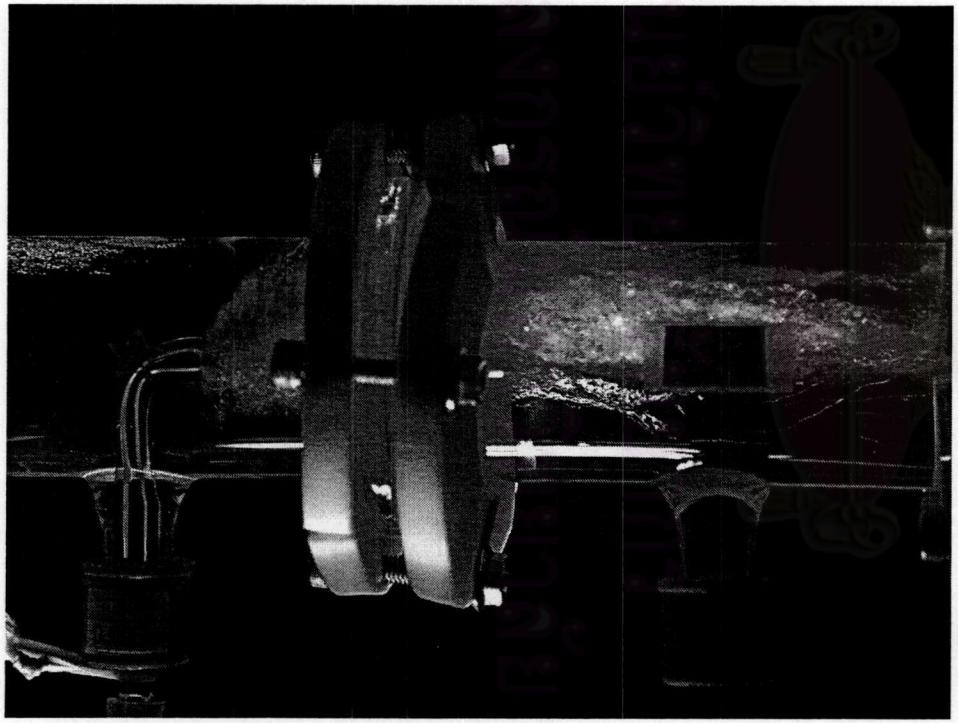


A

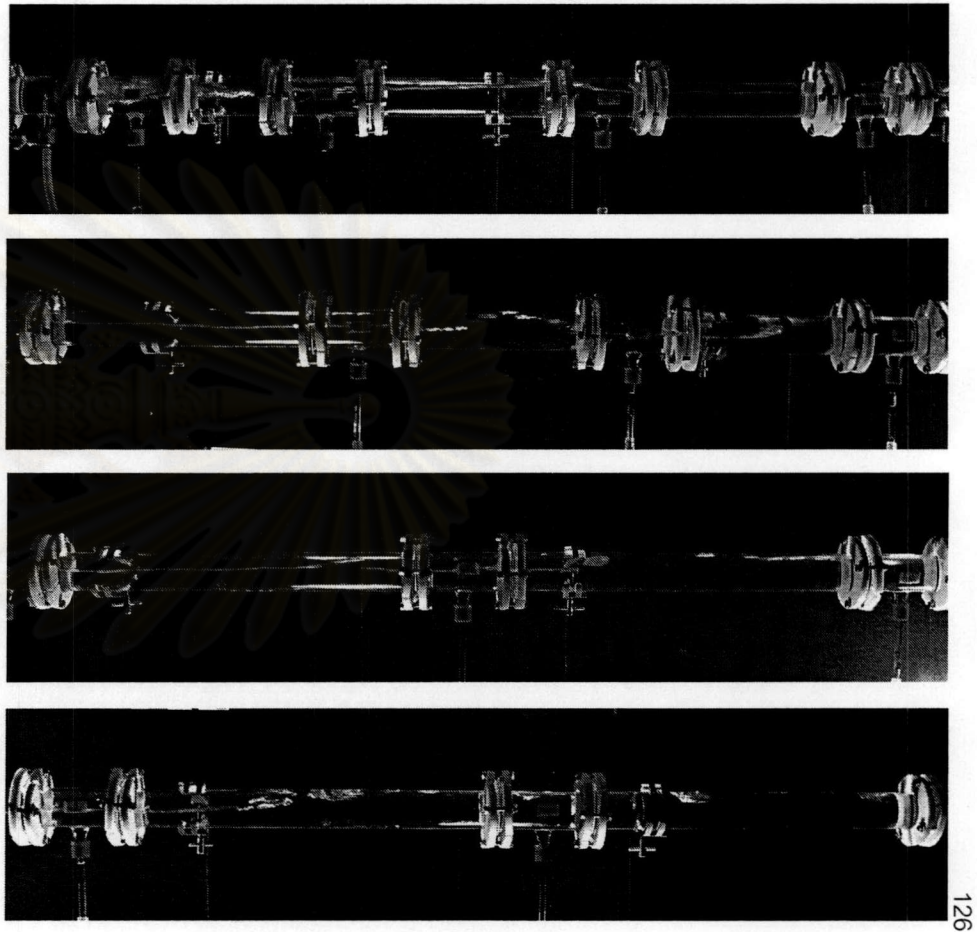


รูปที่ ซ.3 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.520*

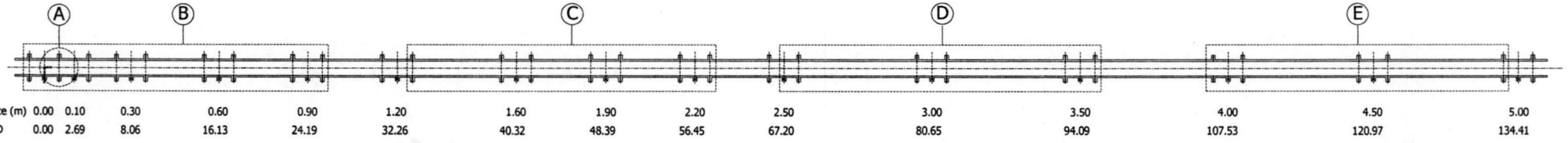




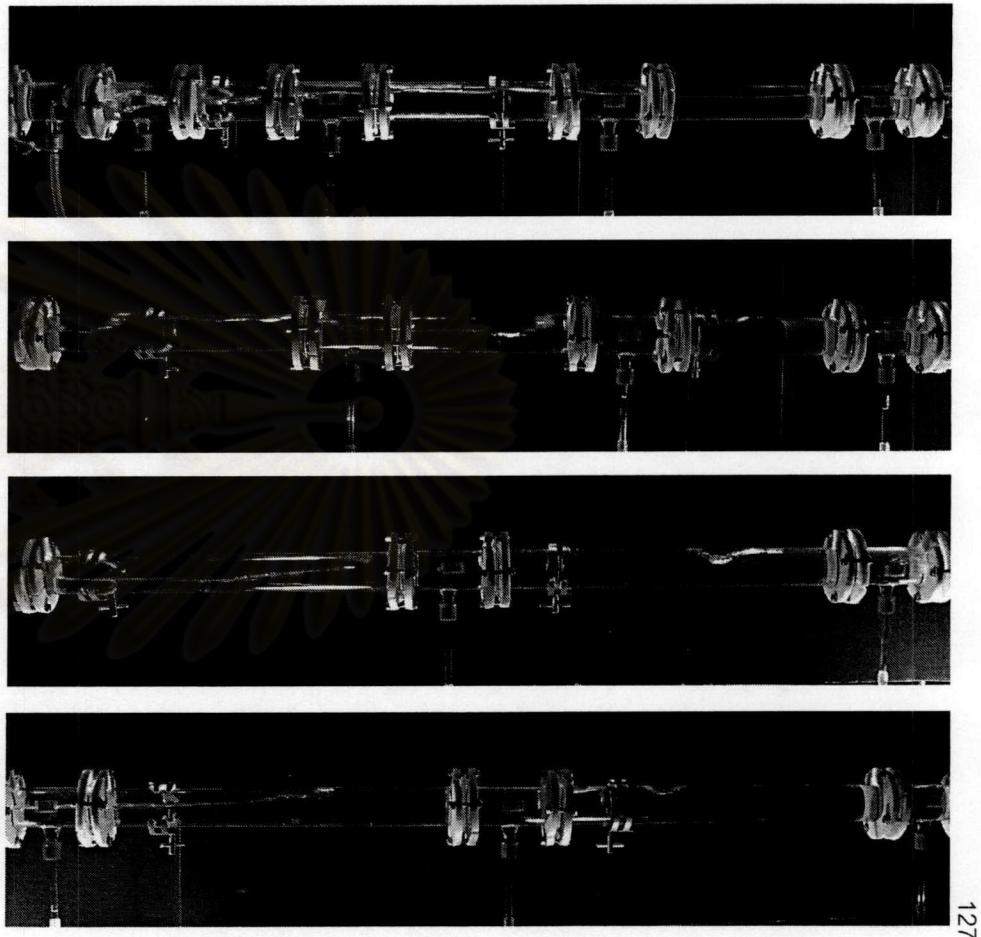
A



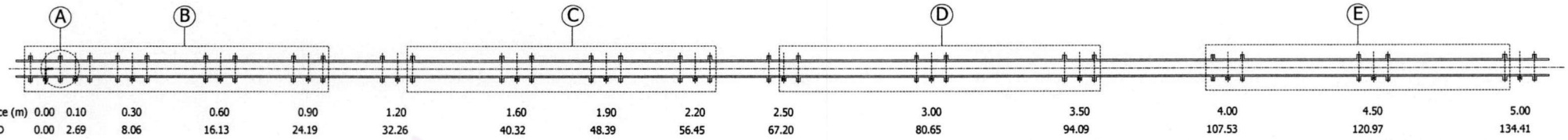
รูปที่ ซ.4 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.821*

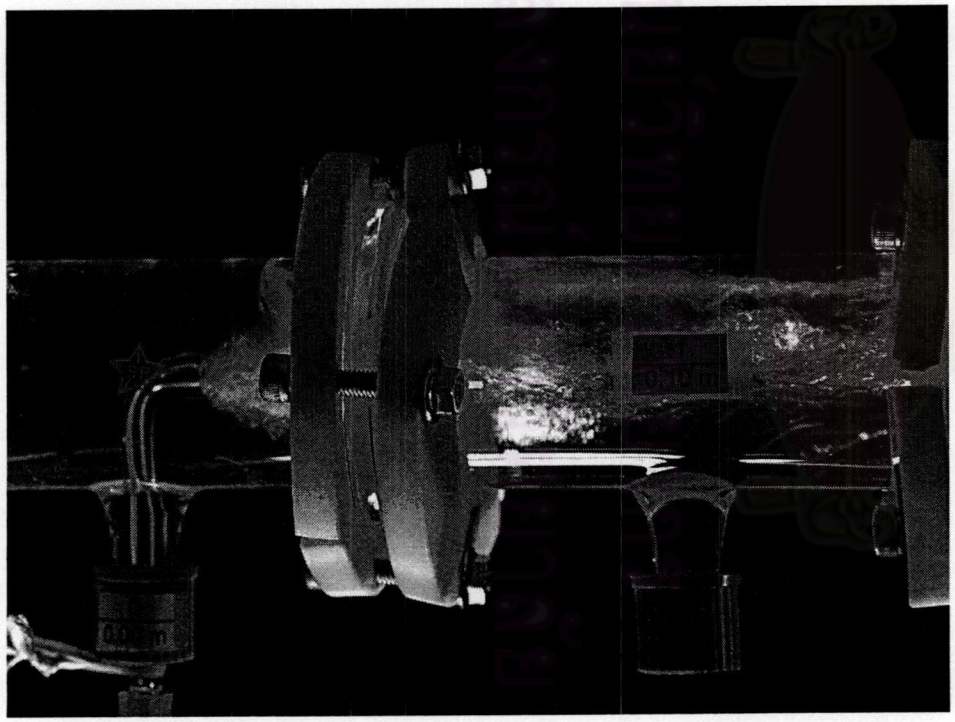


A

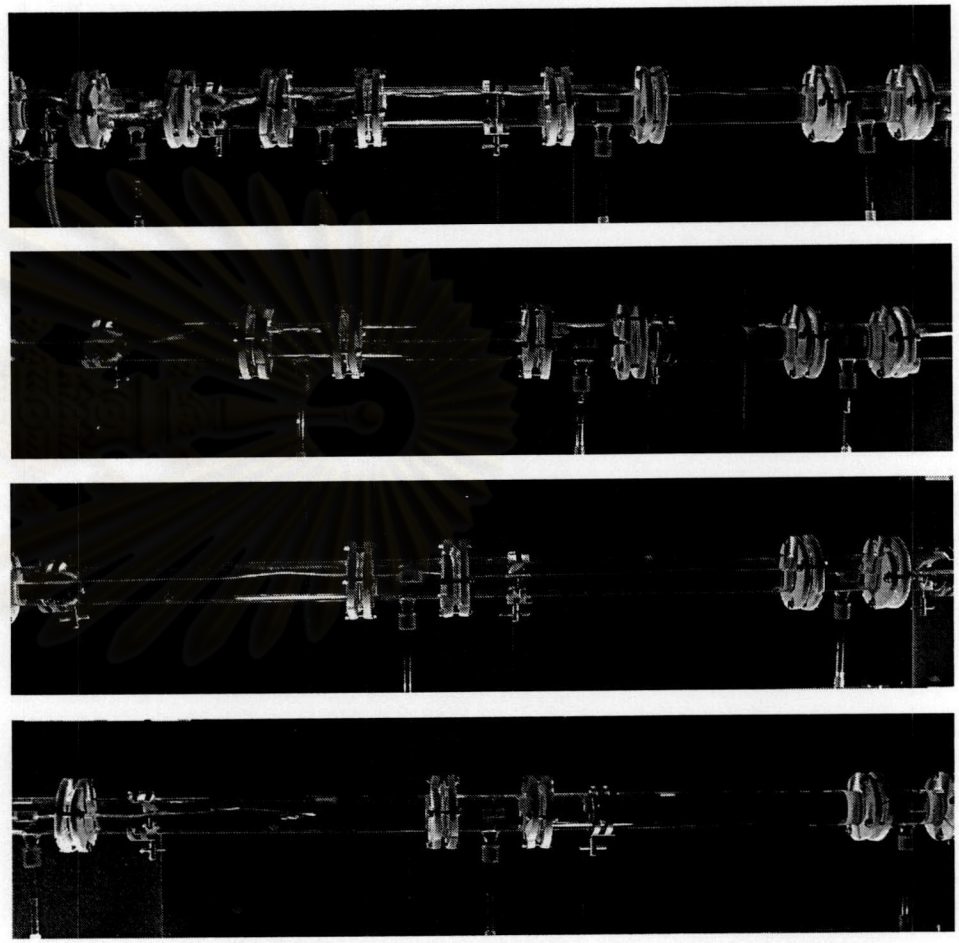


รูปที่ ช.5 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.032*





A



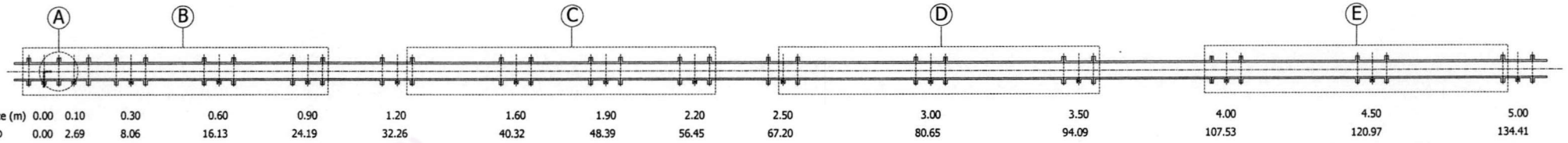
B

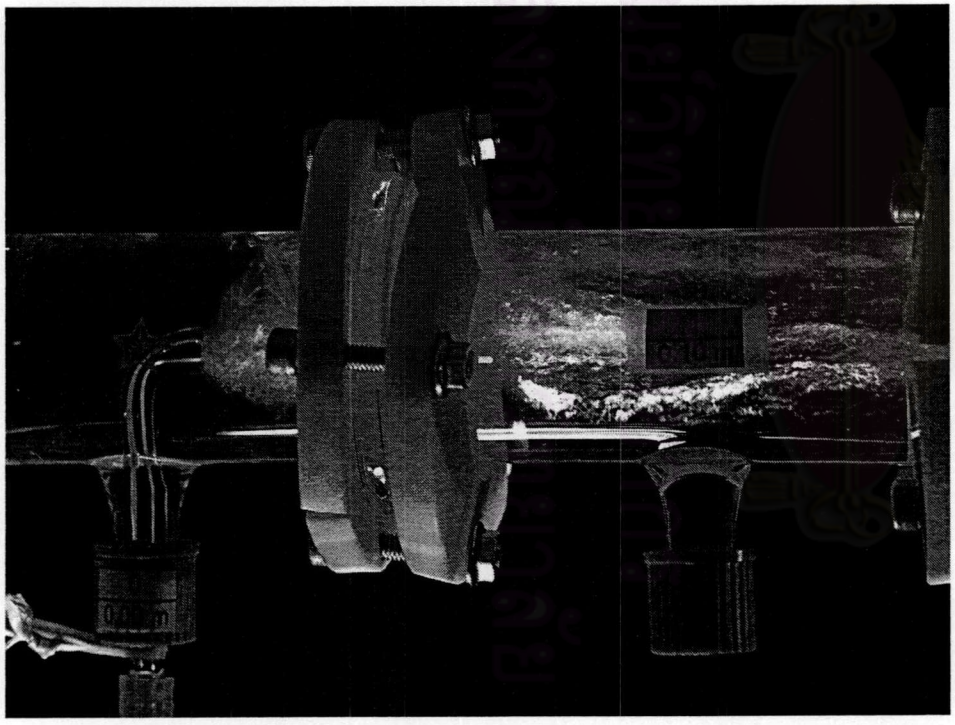
C

D

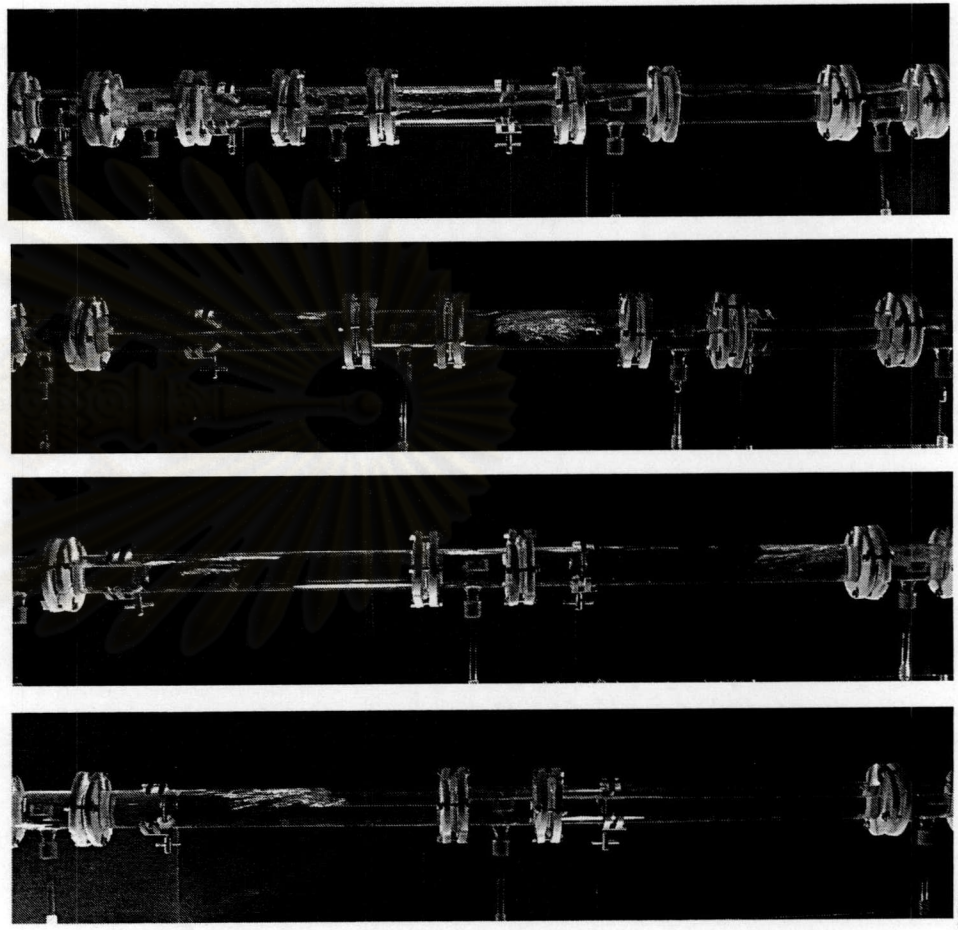
E

รูปที่ ช.6 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.236*

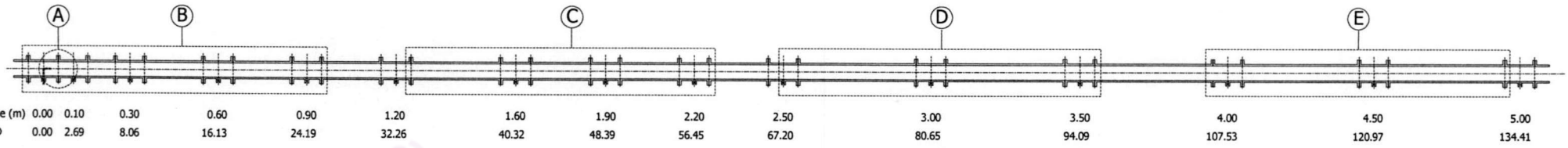


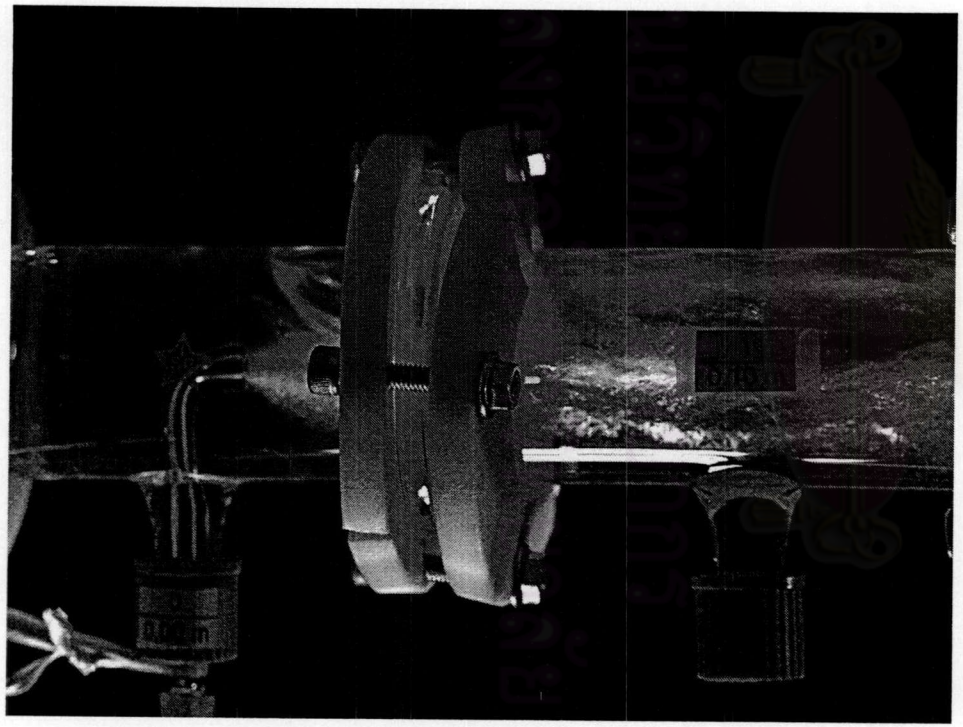


A

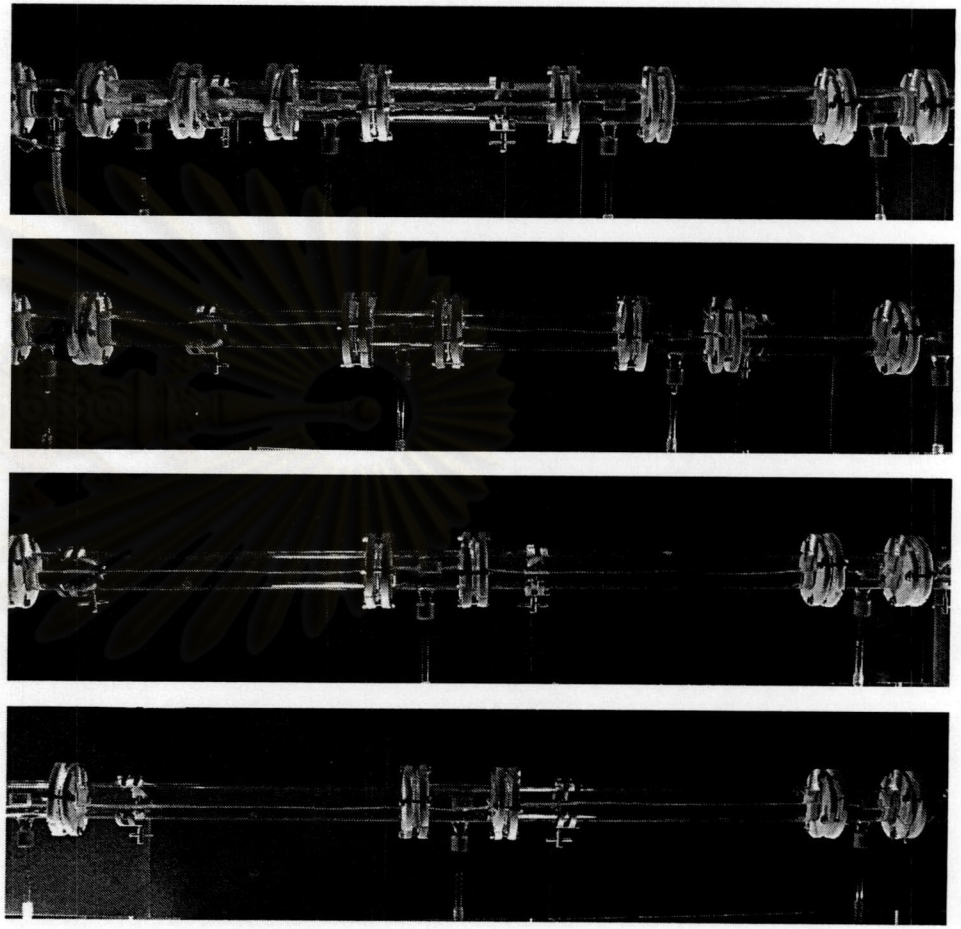


รูปที่ ช.7 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.576*





A



รูปที่ ซ.8 *ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.916*

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษฎิ์ ลิลิตการตกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2521 ที่อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาในปีการศึกษา 2538 จากนั้นเข้าศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ในปีการศึกษา 2543

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย