

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การรายงานผลการทดลอง

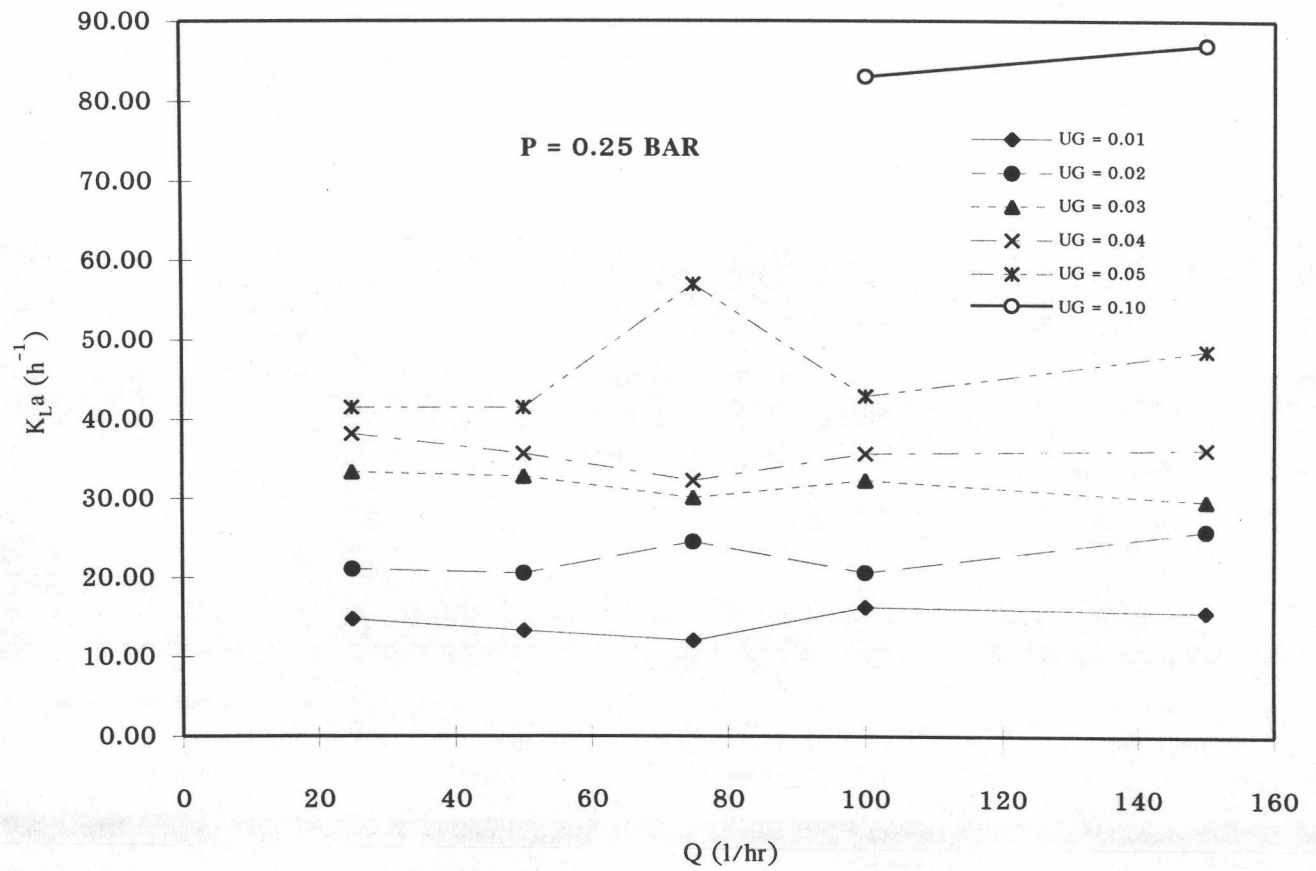
การรายงานผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองหัวข้อใหญ่ๆคือ หัวข้อที่ 4.2 เป็นผลการทดลองที่ใช้ น้ำสะอาด เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน หัวข้อ 4.3 เป็นผลการทดลองที่ใช้ น้ำเสียจริงจากแหล่งต่างๆ เพื่อศึกษาการเติมออกซิเจนในน้ำเสีย

4.2 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

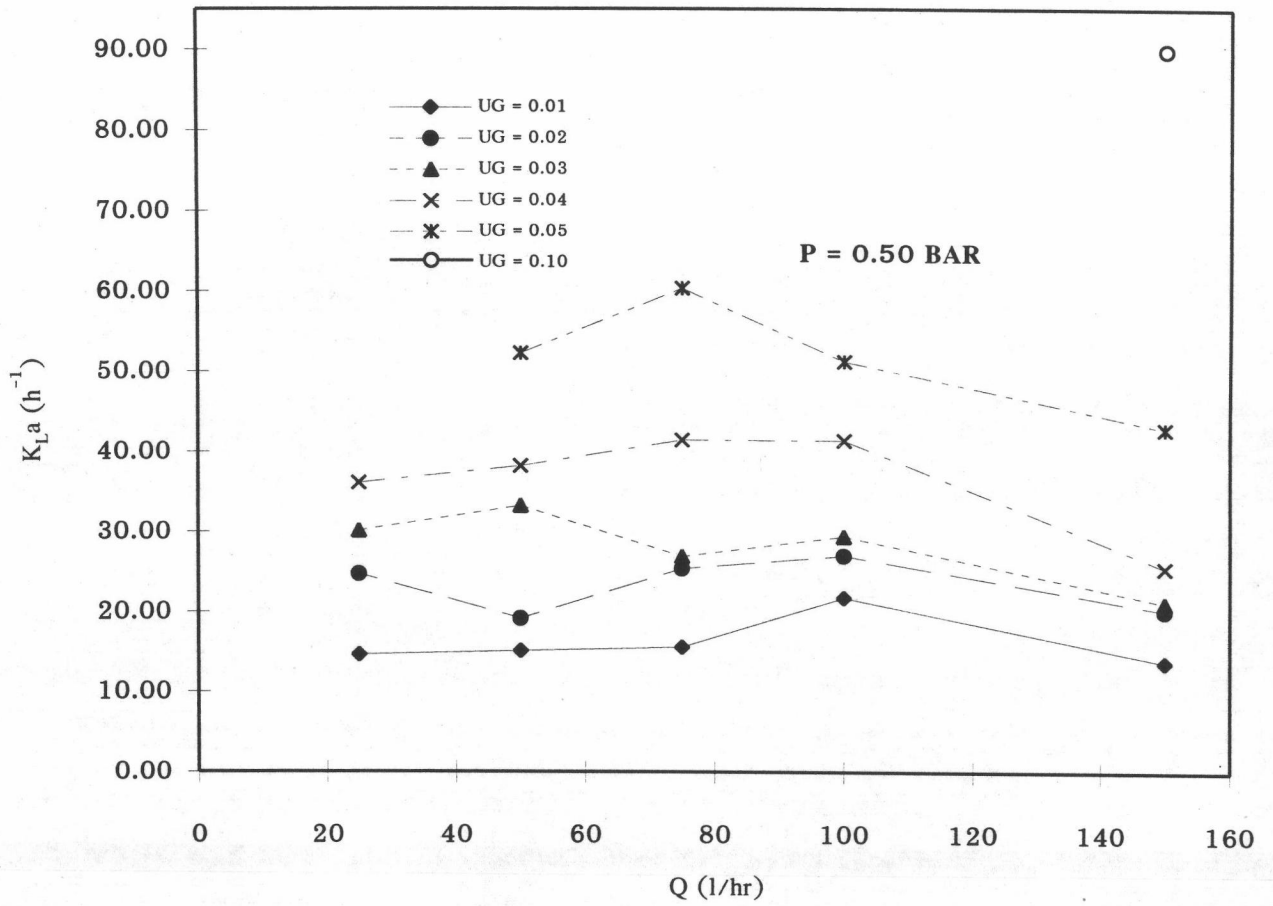
การศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษาจะทำการทดลองโดยใช้น้ำสะอาดซึ่งเตรียมด้วยวิธีในหัวข้อที่ 3.2.3

4.2.1 อิทธิพลของอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

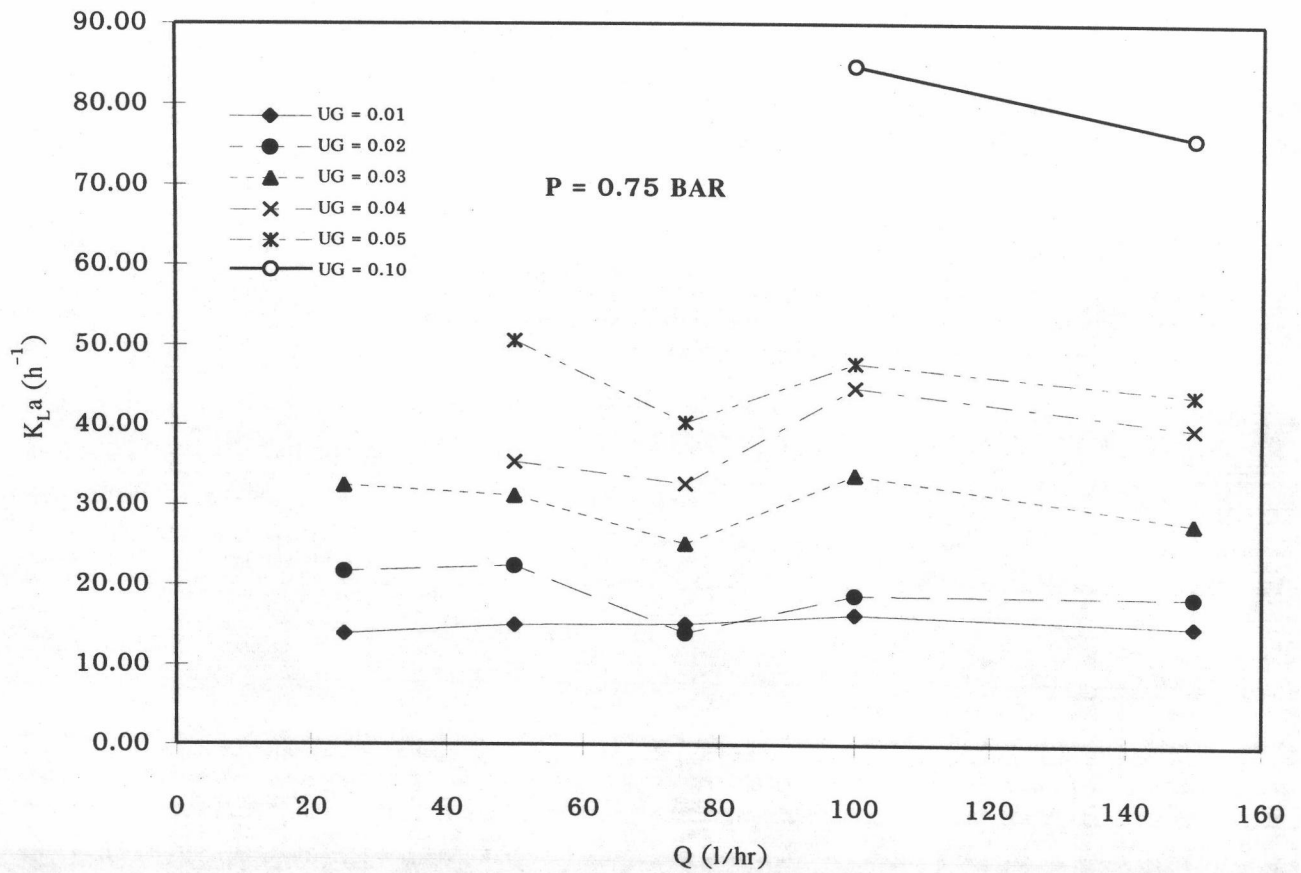
ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำสะอาด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์กับค่าของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยใช้ค่าอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25, 50, 75, 100, 150 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดัน 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 บาร์ และความเร็วก๊าซ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ. ได้แก่ ตารางที่ จ.1 ถึง จ. 4



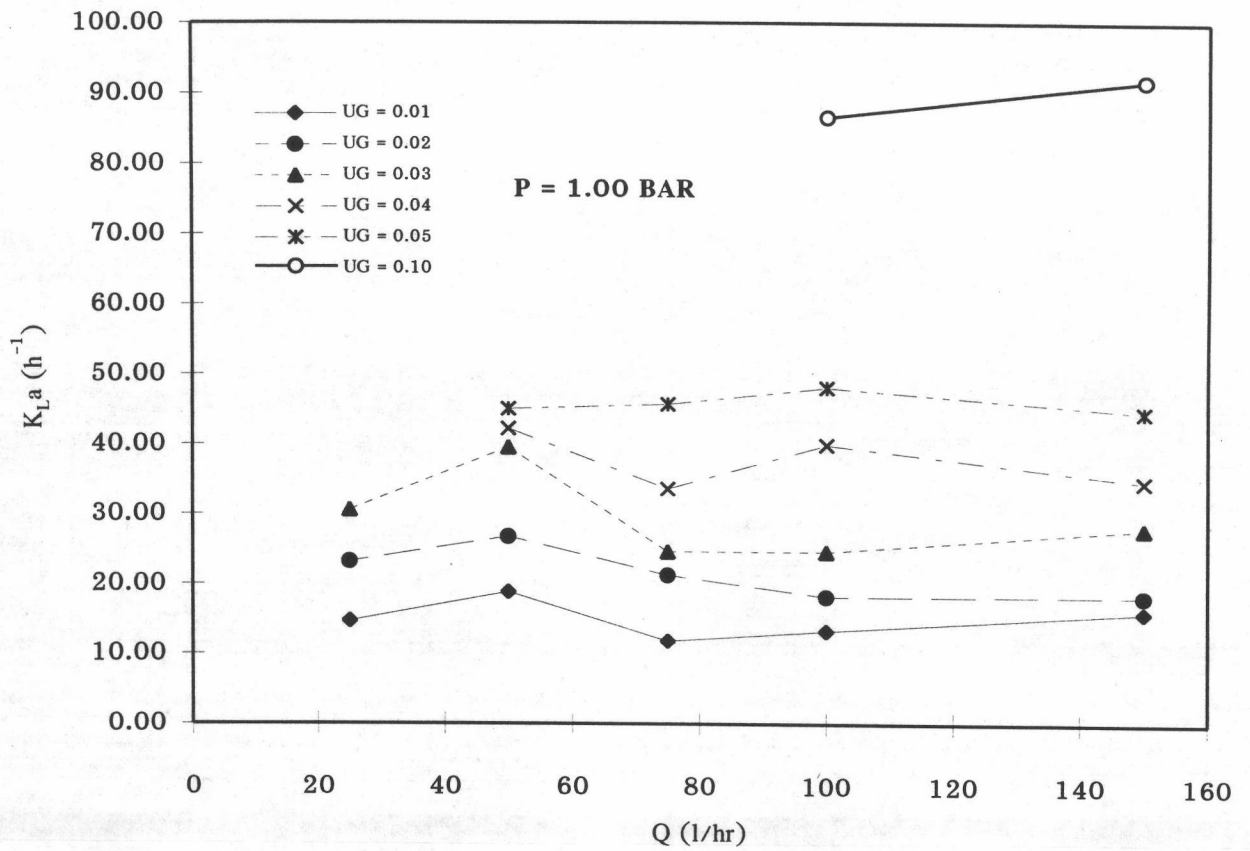
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่ความดัน 0.25 บาร์



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่ความดัน 0.50 บาร์



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่ความดัน 0.75 บาร์



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่ความดัน 1.00 บาร์

รูปที่ 4.1 ถึง 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25, 50, 75, 100, 150 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ทุก ๆ ความดันในถังปฏิกรณ์ และความเร็วก๊าซที่จ่ายเข้าระบบ จะเห็นได้ว่า ค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์มีค่าคงที่เมื่อค่าอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์เปลี่ยนในแต่ละความดันในถังปฏิกรณ์และความเร็วก๊าซ

การทดลองอิทธิพลของอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 สอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะกล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของเหลว ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ในฟิล์มของเหลวและความหนาของฟิล์มของเหลว (Azbel, 1981) ดังสมการ

$$k_L = D_L / \Delta x_L$$

โดยที่

k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของฟิล์มของเหลว

D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว

Δx_L = ความหนาของฟิล์มของเหลว

นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล จะมีค่าแปรเปลี่ยนตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวและขนาดความหนาของฟิล์มของเหลวเท่านั้น หากว่าชนิดของของเหลวไม่เปลี่ยน อุณหภูมิคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวของก๊าซก็จะมีค่าคงที่ด้วย (Chisti, 1989) ส่วนขนาดความหนาของฟิล์มของเหลวจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ ความปั่นป่วนของของเหลว ซึ่งจะคงที่ในแต่ละสภาวะการทำงานของถังปฏิกรณ์ (Chisti, 1989)

จากผลการทดลอง อิทธิพลของอัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน สามารถสรุปได้ว่า ค่า K_{La} ไม่ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.2.2 อิทธิพลของความดันในถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำสะอาด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันในถังปฏิกรณ์กับค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยใช้ค่าความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 บาร์ ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25, 50, 75, 100, 150 ลิตรต่อชั่วโมง และความเร็วก๊าซ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ. ได้แก่ ตารางที่ จ.5 ถึง จ.15

รูปที่ 4.5 ถึง 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 บาร์ ที่ทุกอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และอัตราเร็วของก๊าซที่จ่ายเข้าระบบ จะเห็นได้ว่าค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์มีค่าคงที่ เมื่อความดันในระบบเปลี่ยน ในแต่ละอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ และความเร็วก๊าซ

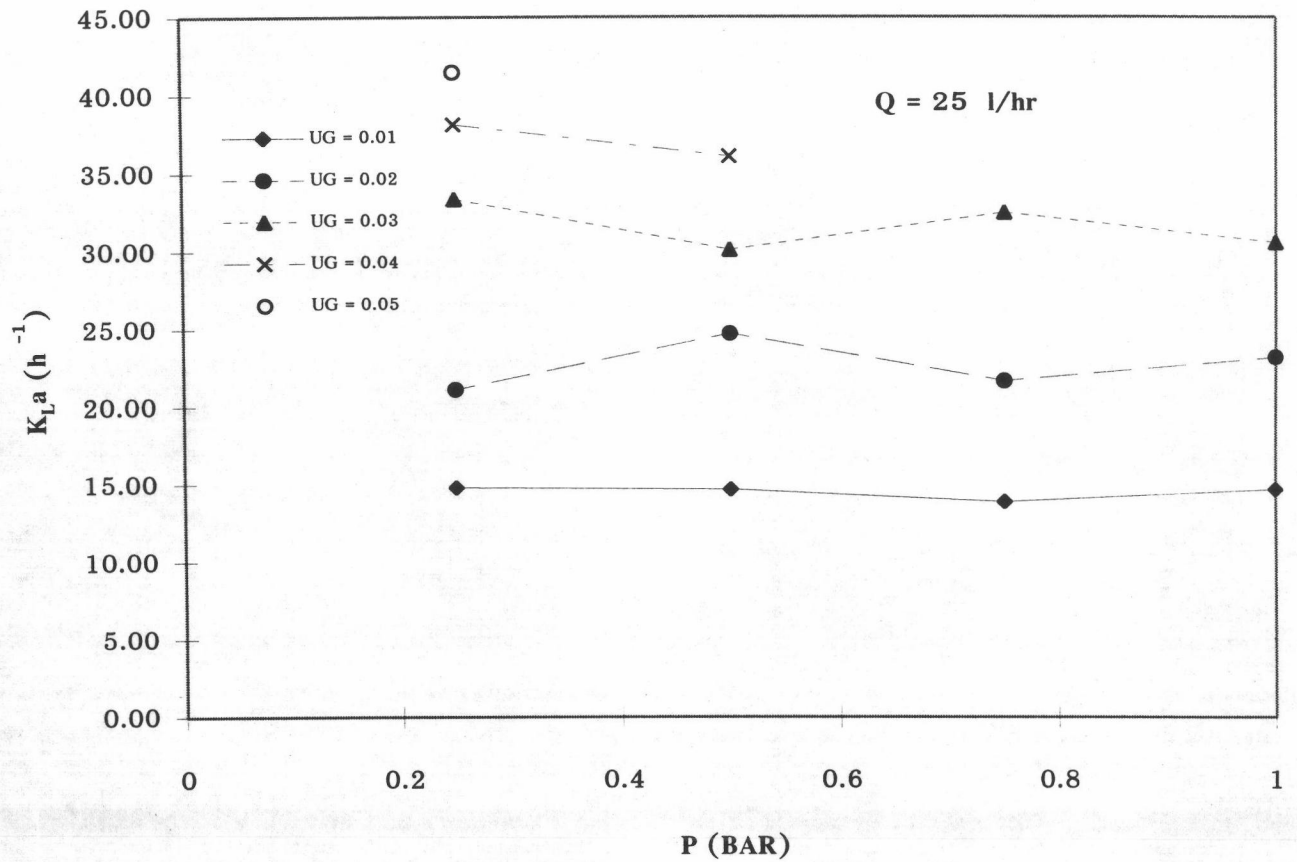
การทดลองอิทธิพลของความดันในถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ในรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 สอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะ กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของเหลวขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว และความหนาของฟิล์มของเหลว (Azbel, 1981) ดังสมการ

$$k_L = D_L / \Delta x_L$$

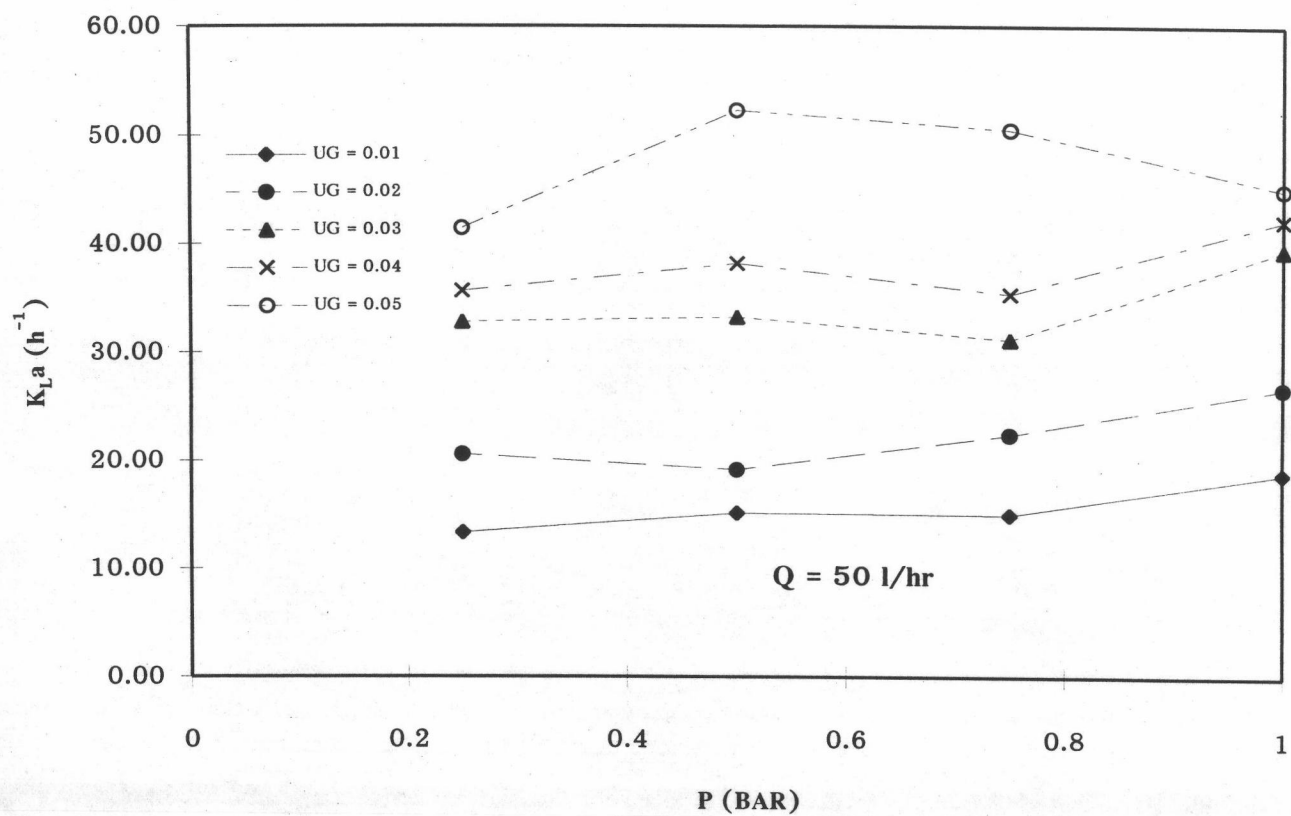
โดยที่

$$\begin{aligned} k_L &= \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของฟิล์มของเหลว} \\ D_L &= \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว} \\ \Delta x_L &= \text{ความหนาของฟิล์มของเหลว} \end{aligned}$$

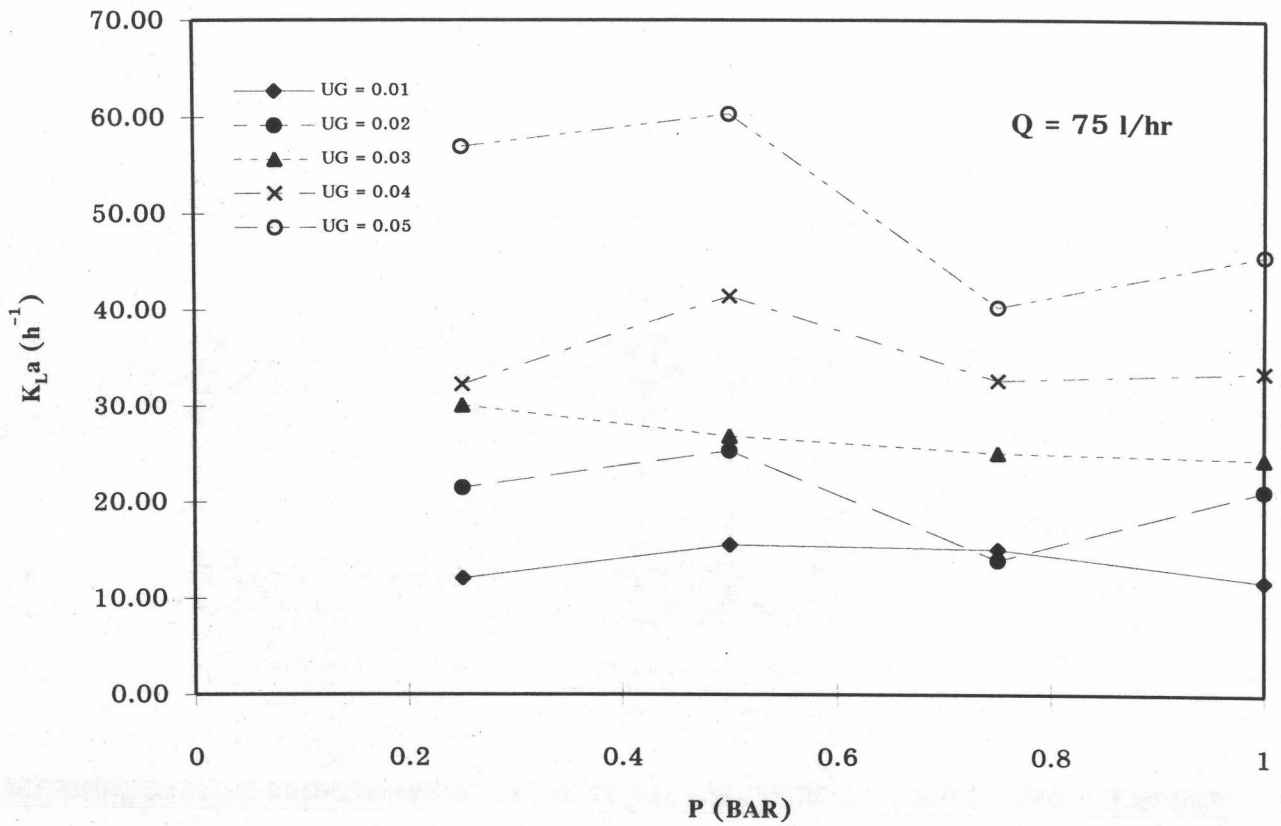
นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในของเหลว และขนาดความหนาของฟิล์มของของเหลวเท่านั้น หากว่าของเหลวเป็นชนิดเดิมและอุณหภูมิคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ก็จะคงที่ด้วย (Chisti, 1989) ส่วนขนาดความหนาของฟิล์มของเหลวจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ ความปั่นป่วนของของเหลวในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะคงที่ในแต่ละสภาวะการทำงานของถังปฏิกรณ์ (Chisti, 1989)



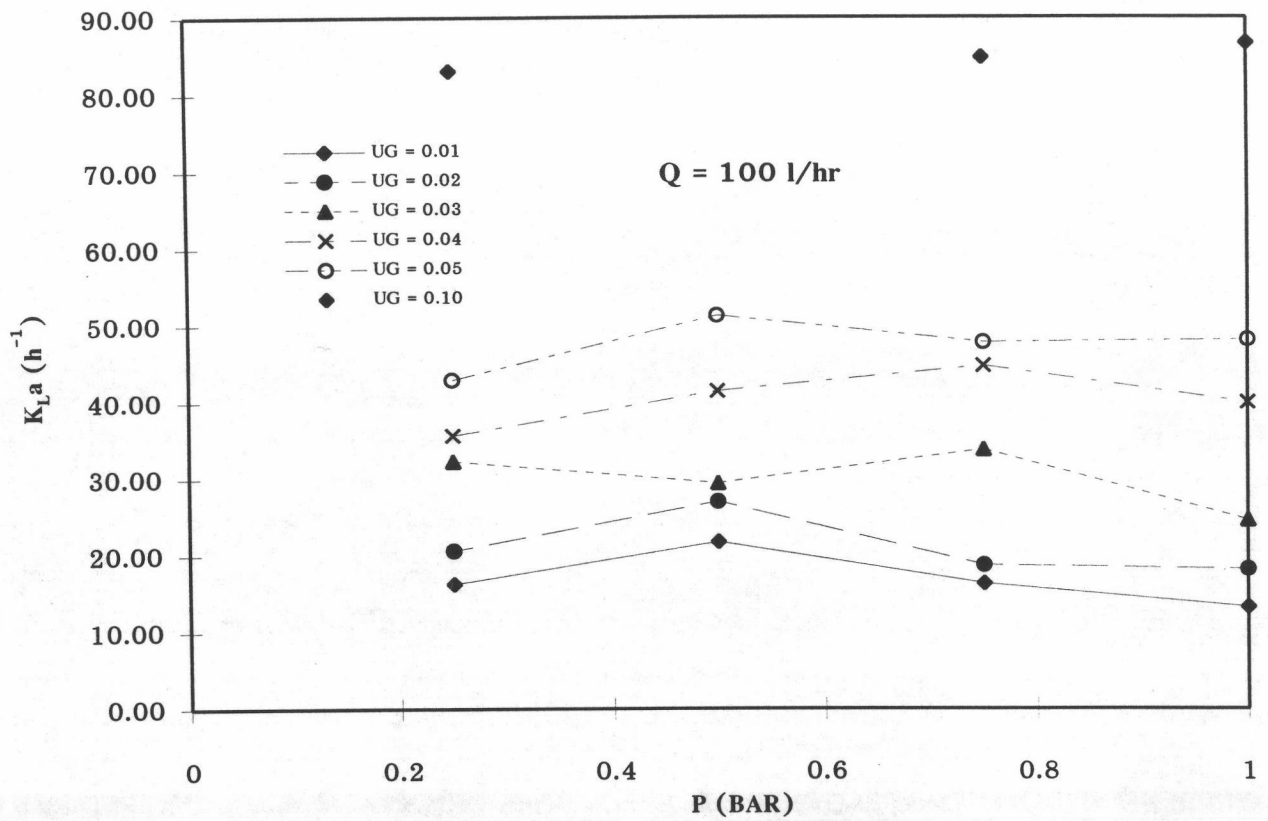
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25 ลิตรต่อชั่วโมง



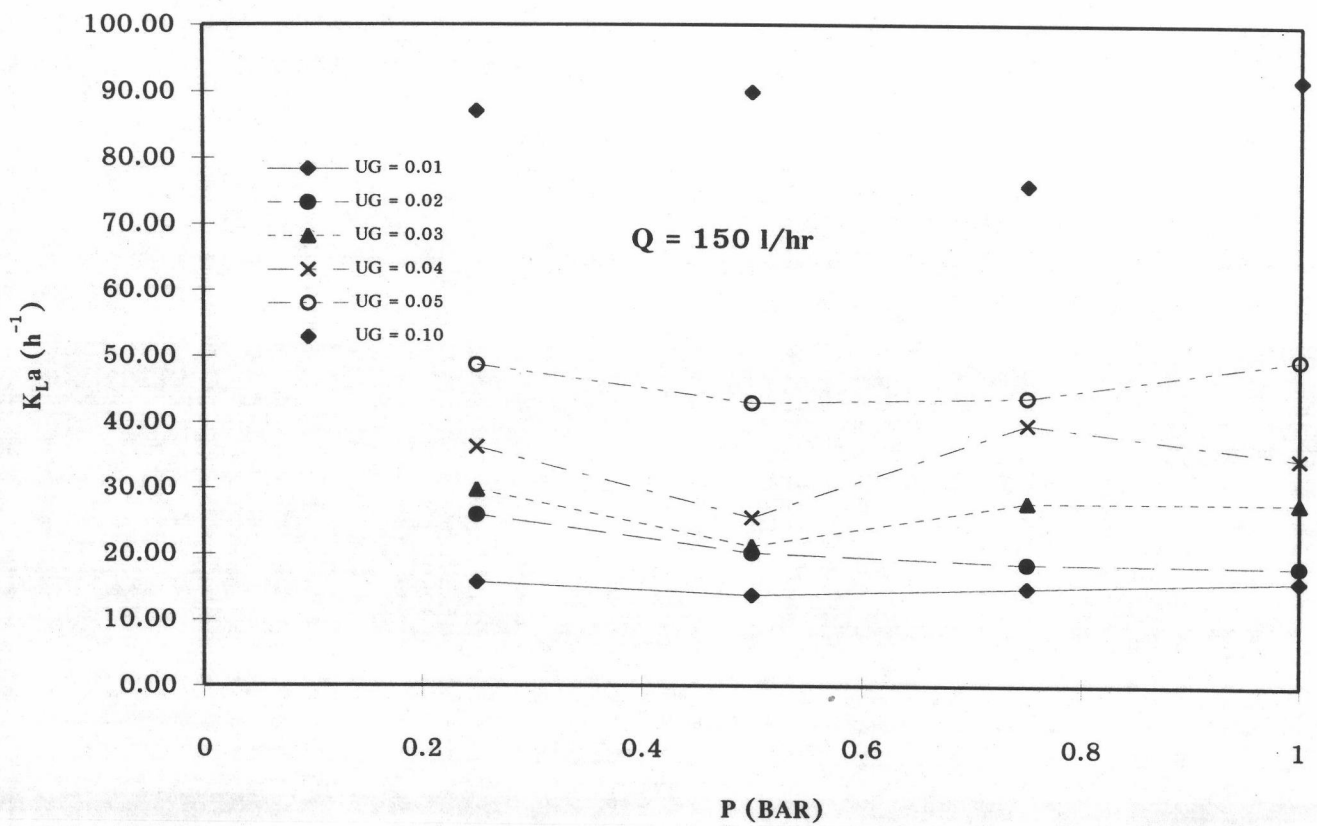
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 50 ลิตรต่อชั่วโมง



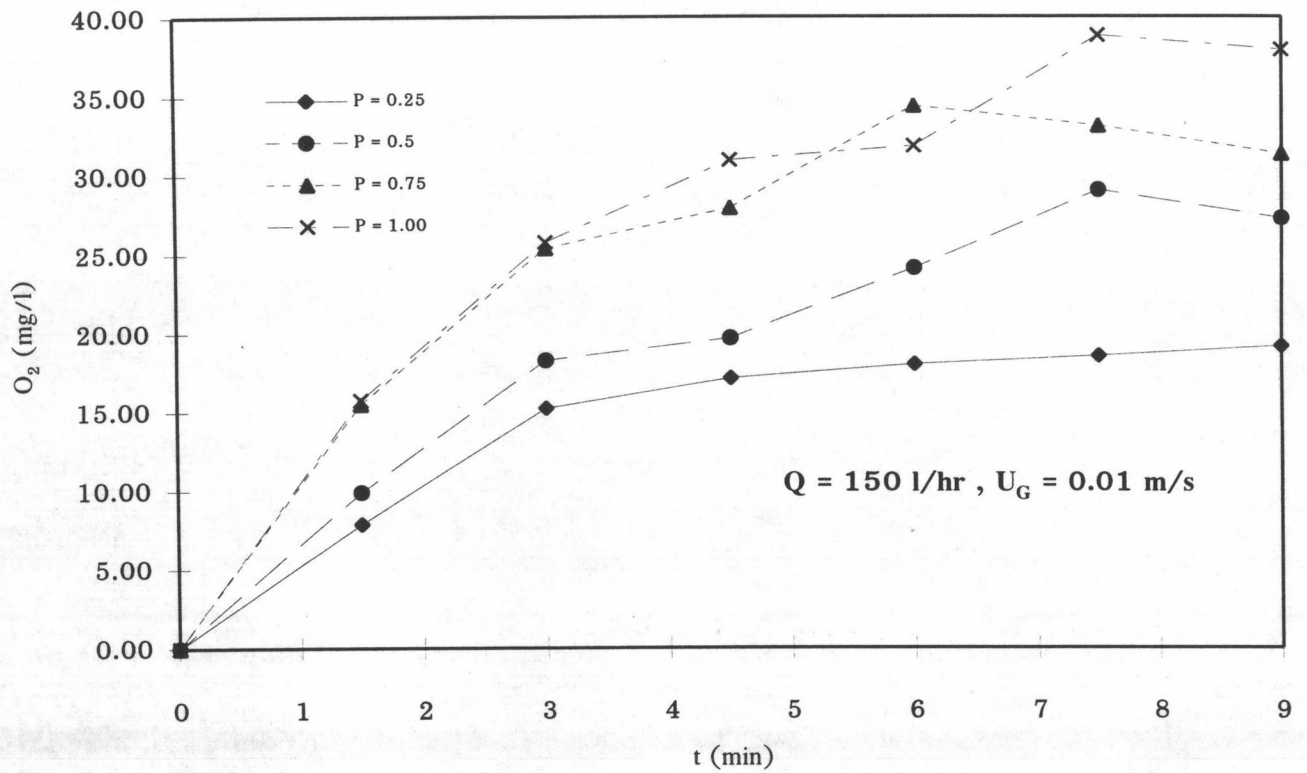
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 75 ลิตรต่อชั่วโมง



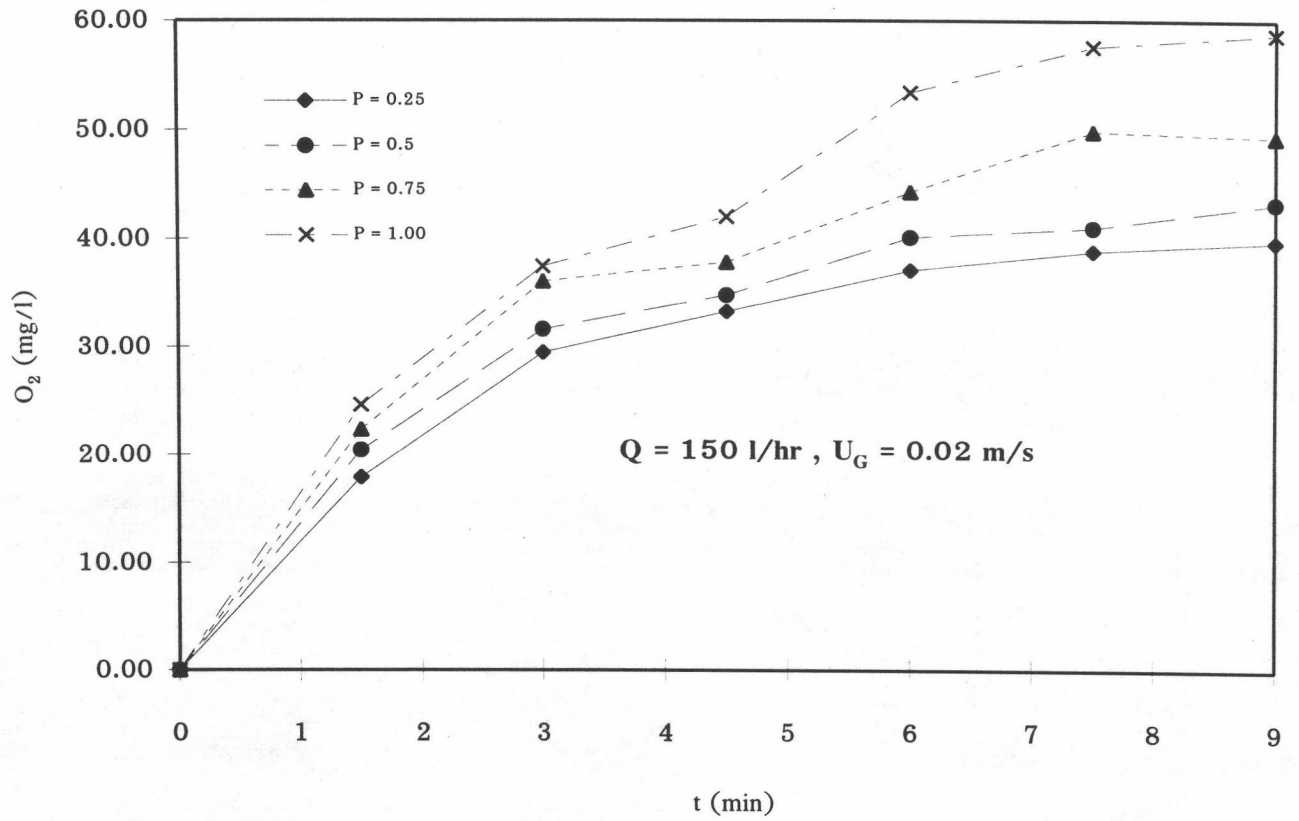
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{L,a}$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง



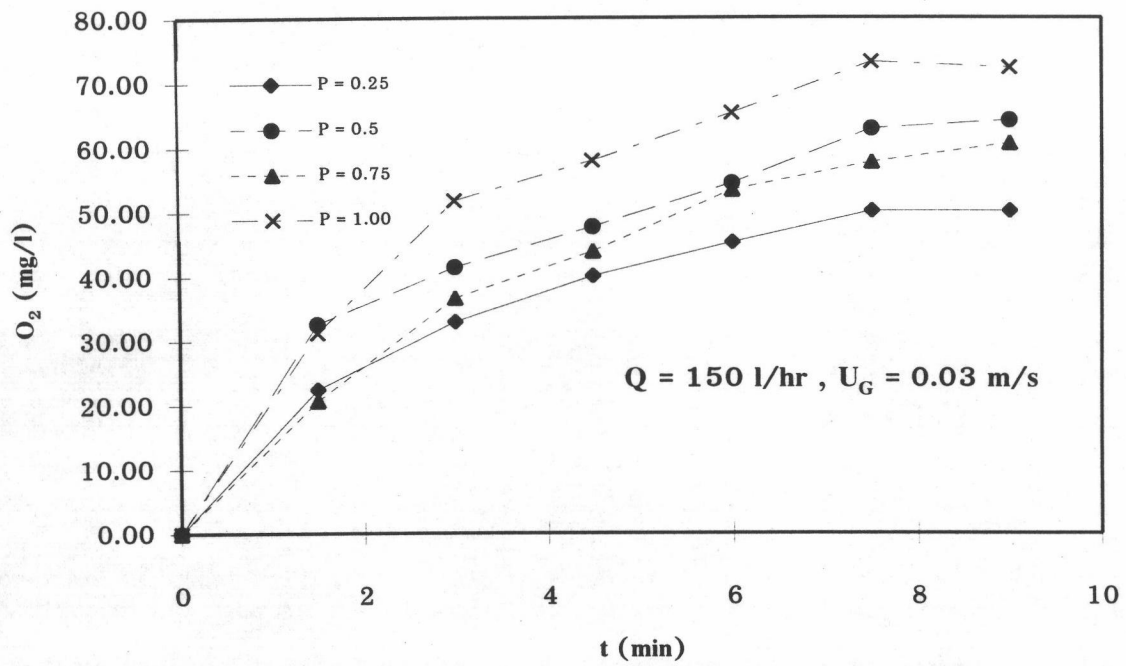
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความดันในถังปฏิกรณ์ที่ อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง



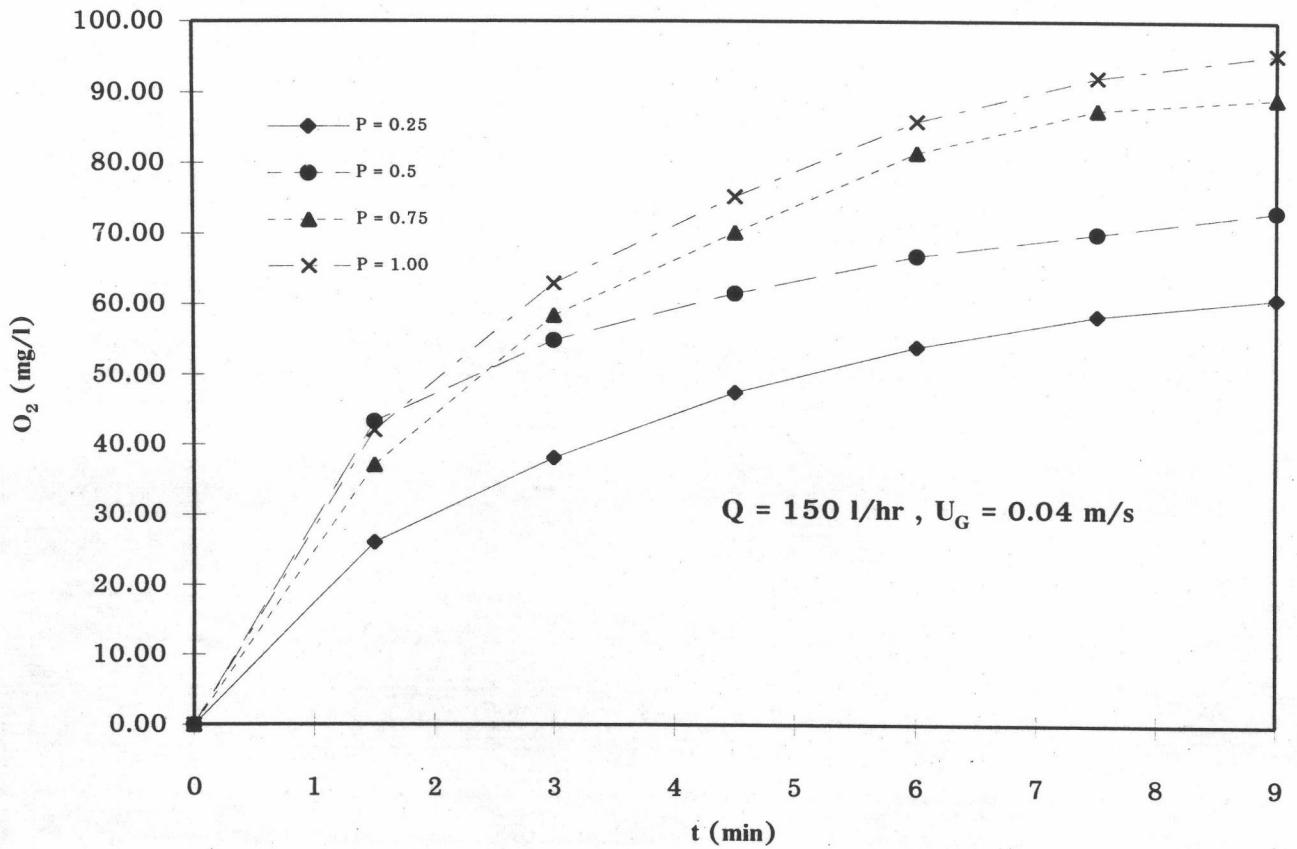
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.01 เมตรต่อวินาที



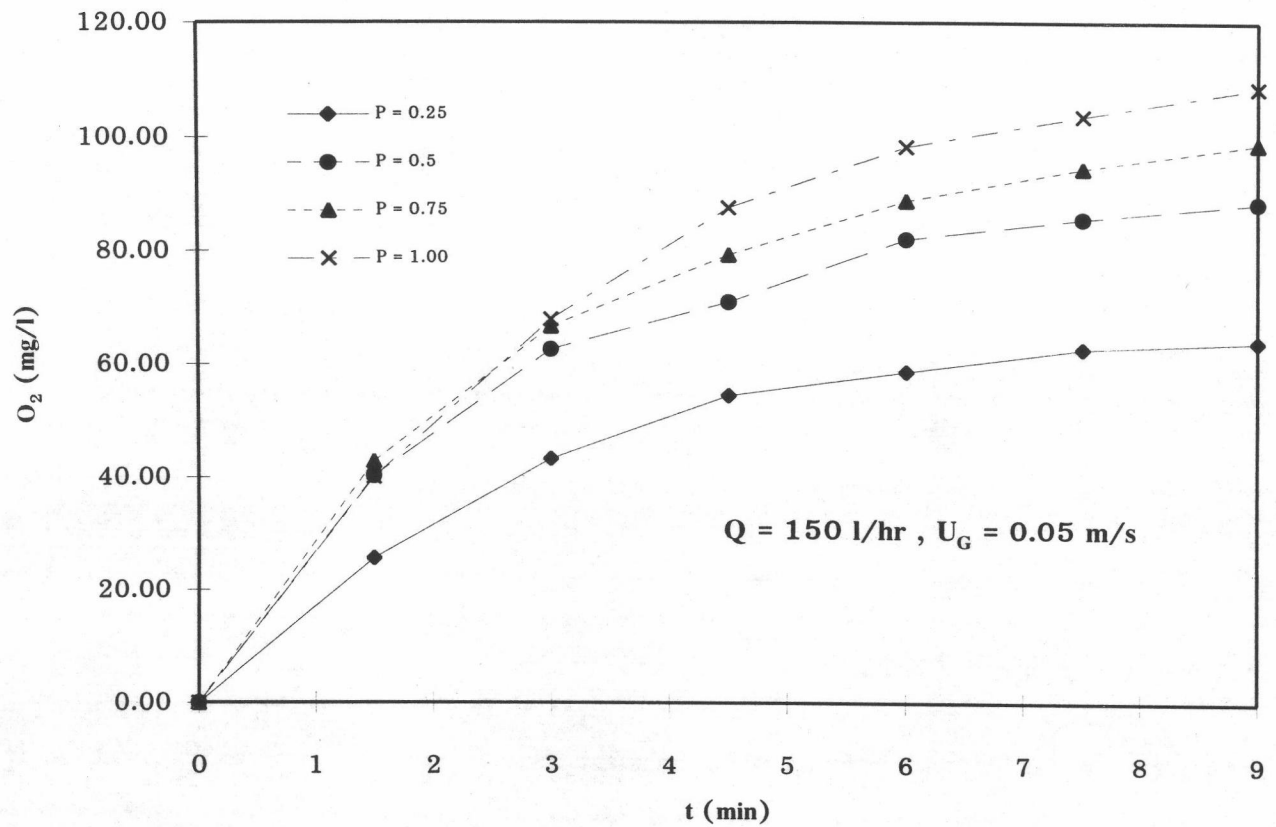
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที



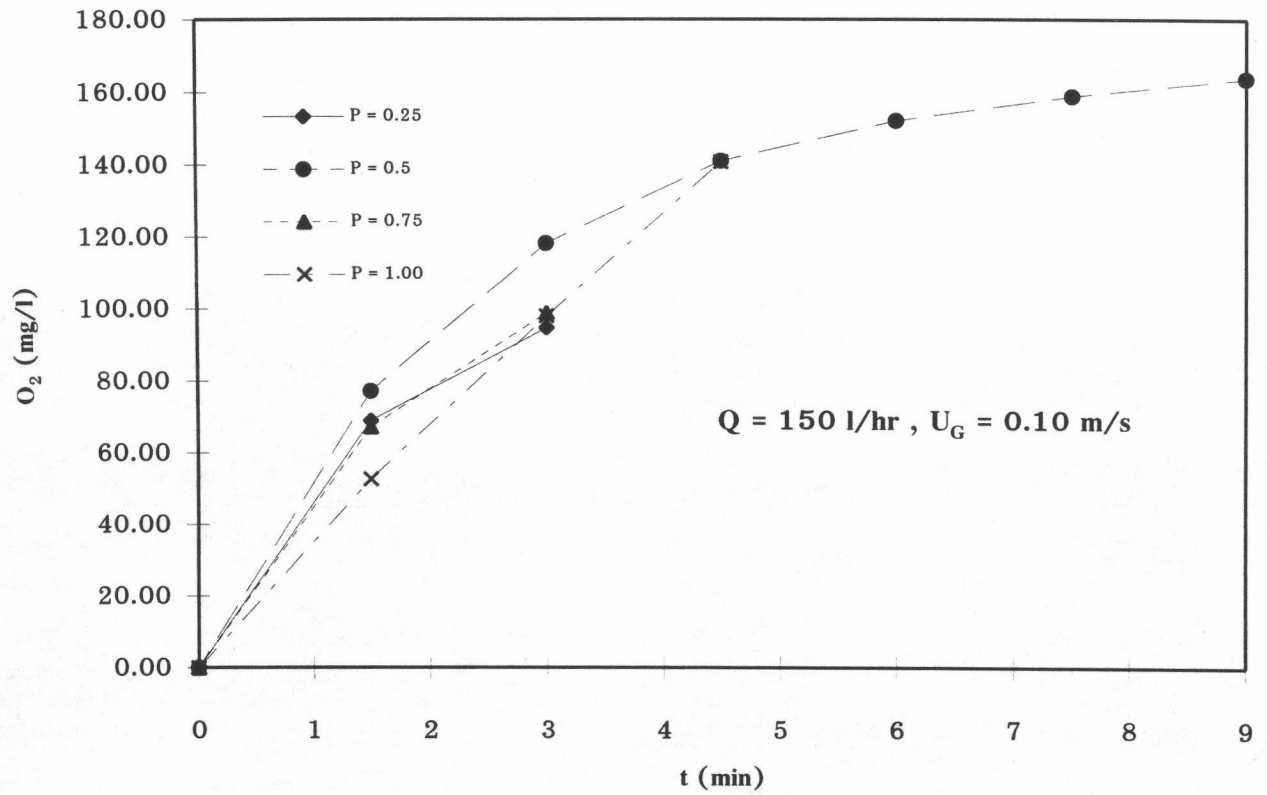
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.03 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.04 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทกับเวลาที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถัง ปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วก๊าซ 0.10 เมตรต่อวินาที

ในรูปที่ 4.10 ถึง 4.15 เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการถ่ายเทมวลออกซิเจนกับเวลาที่ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 บาร์ จะเห็นได้ว่า อัตราการถ่ายเทมวลออกซิเจนต่อหน่วยเวลาจะมีค่ามากที่ความดันในถังปฏิกรณ์สูงสุดคล้องกับสมการหาอัตราการถ่ายเทมวลซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมและแรงขับเคลื่อน (McCabe, Smith and Harriot, 1993)

$$dc_A/dt = K_L a (c_A^* - c_A)$$

การที่อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่า $K_L a$ และ/หรือ การเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Chisti, 1989) ในกรณีการเพิ่มความดันในถังปฏิกรณ์จะเป็นการเพิ่มค่าแรงขับเคลื่อนซึ่งจะเป็นไปตาม สมการความสัมพันธ์ระหว่างกฎของเฮนรีและกฎของดาลตัน

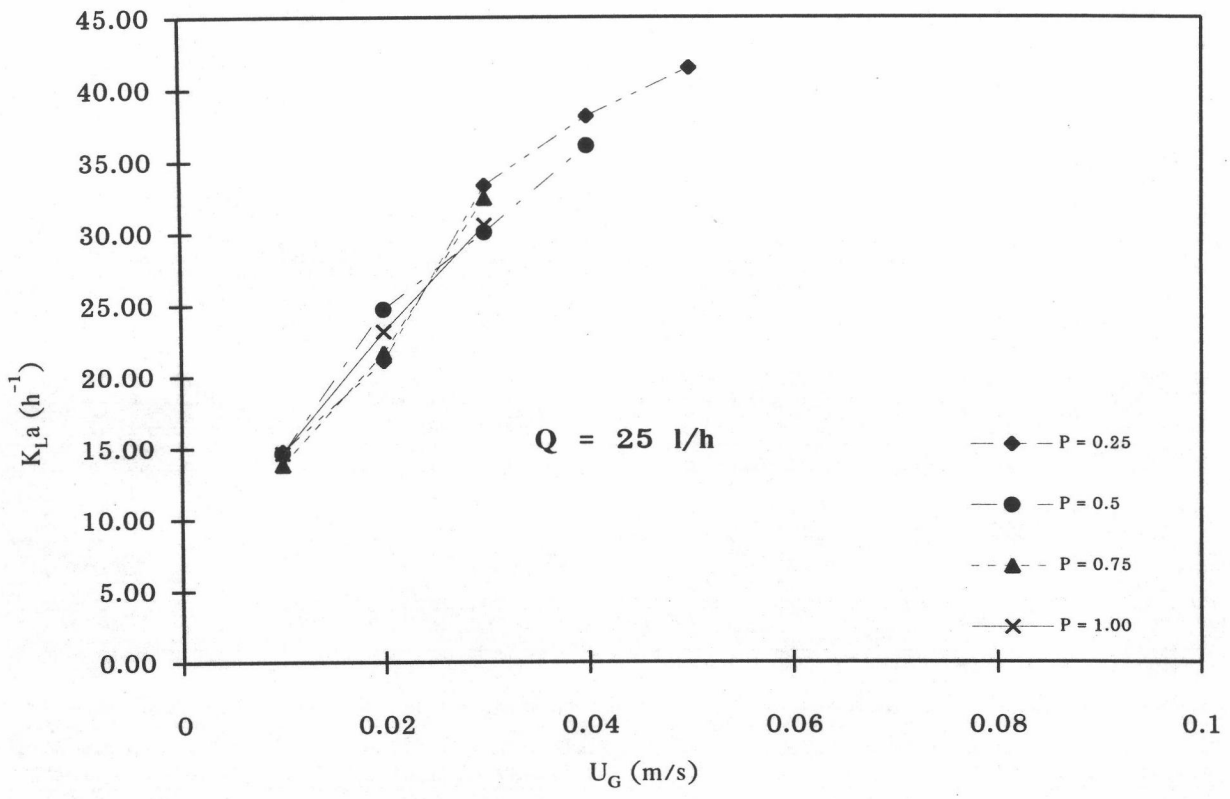
$$c_A^* = y_A P/H$$

เมื่อความดันในถังปฏิกรณ์สูงขึ้นค่าของ c_A^* ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำที่ภาวะ สมดุลย์ จะมีค่าสูงขึ้นด้วยตามความสัมพันธ์ และการเพิ่มค่า c_A^* ก็เป็นการเพิ่มค่าแรงขับเคลื่อน ($c_A^* - c_A$) นั้นเอง

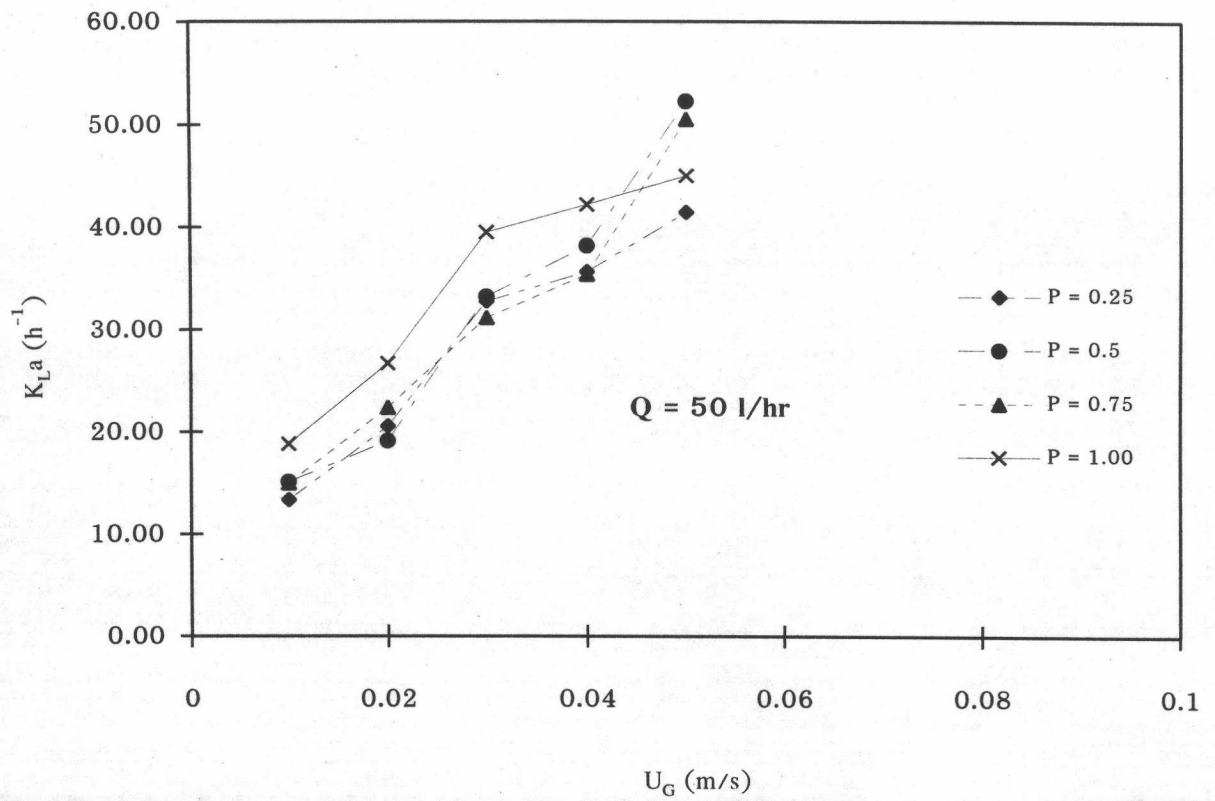
จากผลการทดลองอิทธิพลของความดันในถังปฏิกรณ์ที่มีต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน สามารถสรุปได้ว่า ค่า $K_L a$ ไม่ขึ้นกับความดันในถังปฏิกรณ์ แต่ความดันจะมีผลต่อแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวล การเพิ่มความดันในถังปฏิกรณ์ จะทำให้แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้น

4.2.3 อิทธิพลของความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่มีผลต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

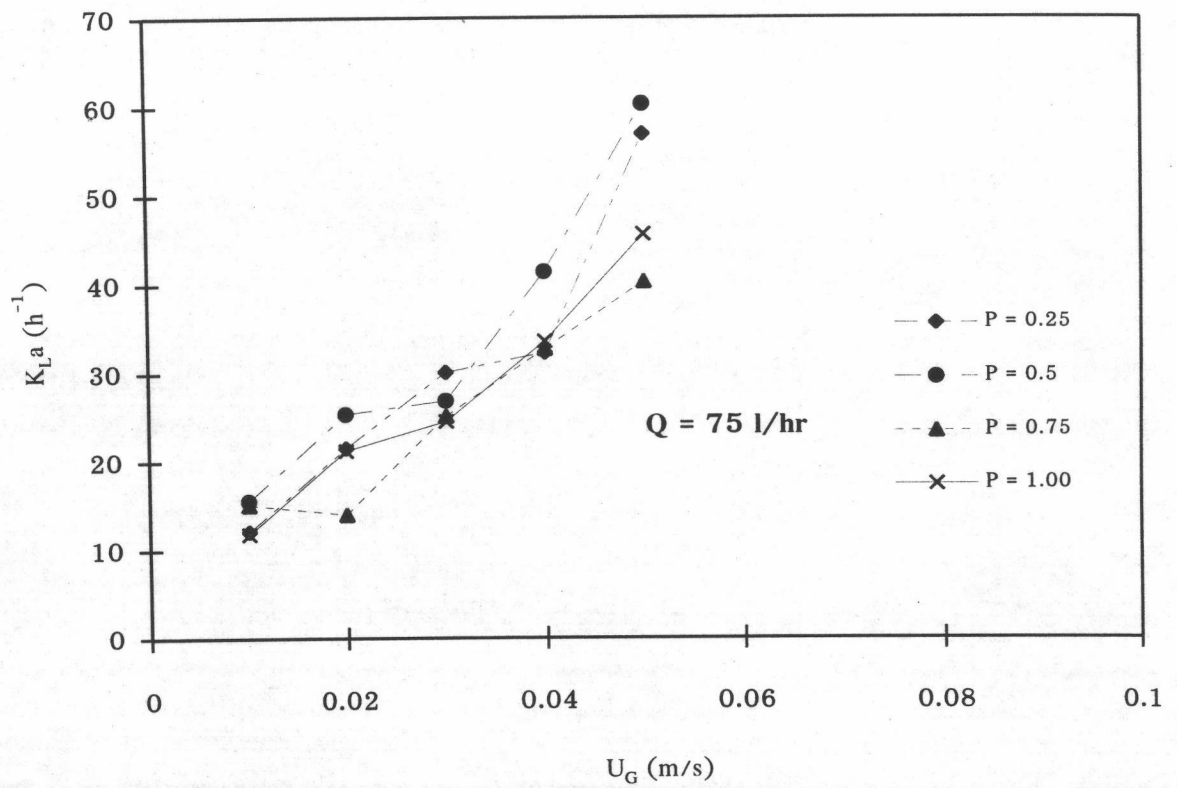
ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำสะอาดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์กับค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยใช้ค่าความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10 เมตรต่อวินาที ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25, 50, 75,



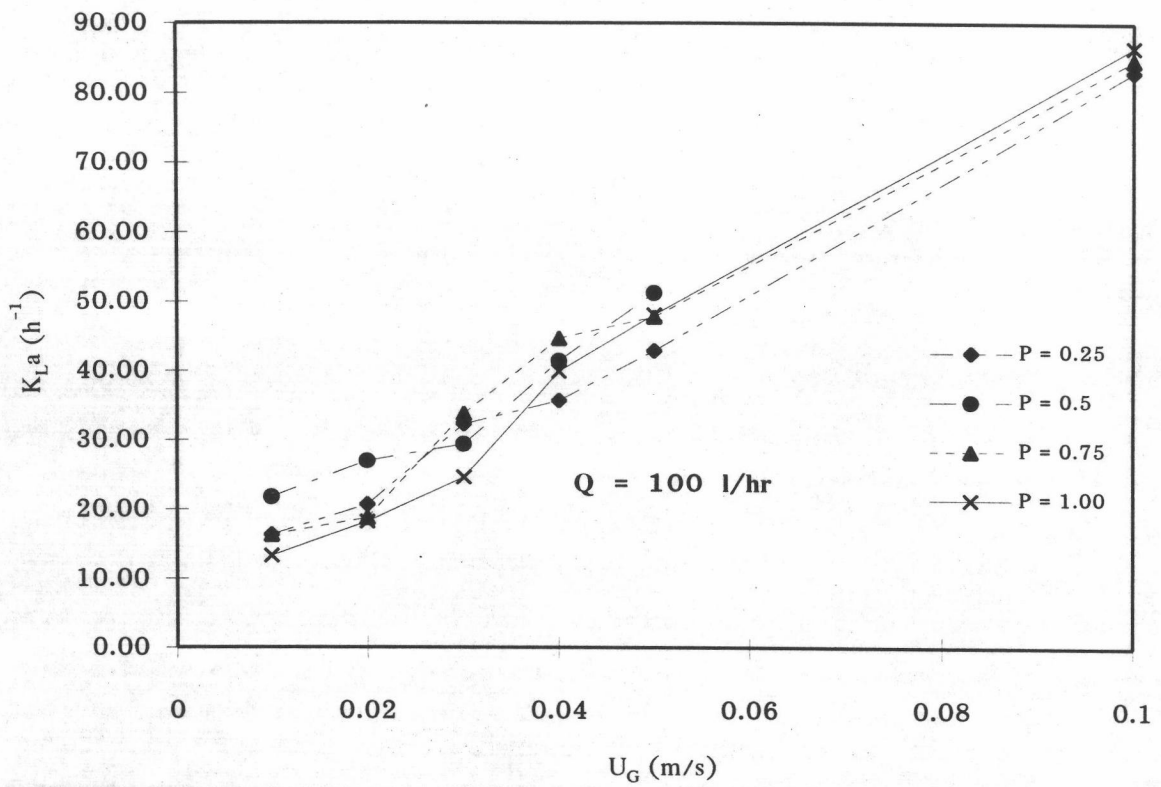
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 25 ลิตรต่อชั่วโมง



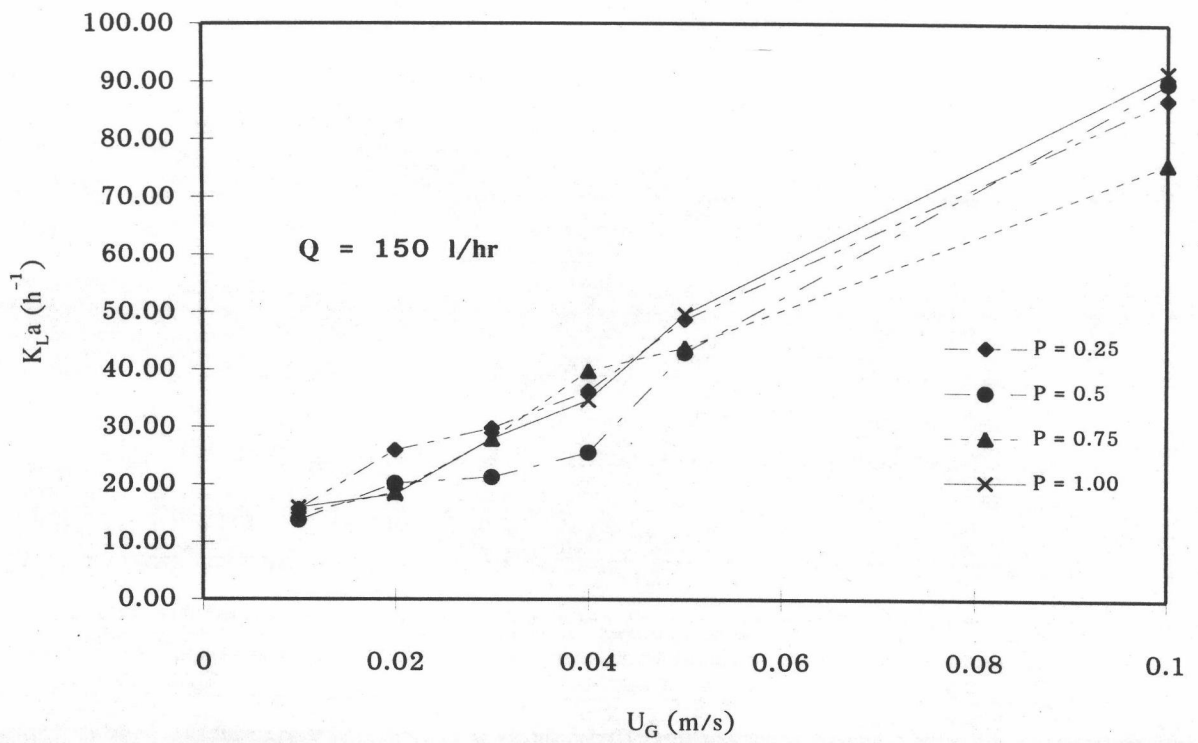
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 50 ลิตรต่อชั่วโมง



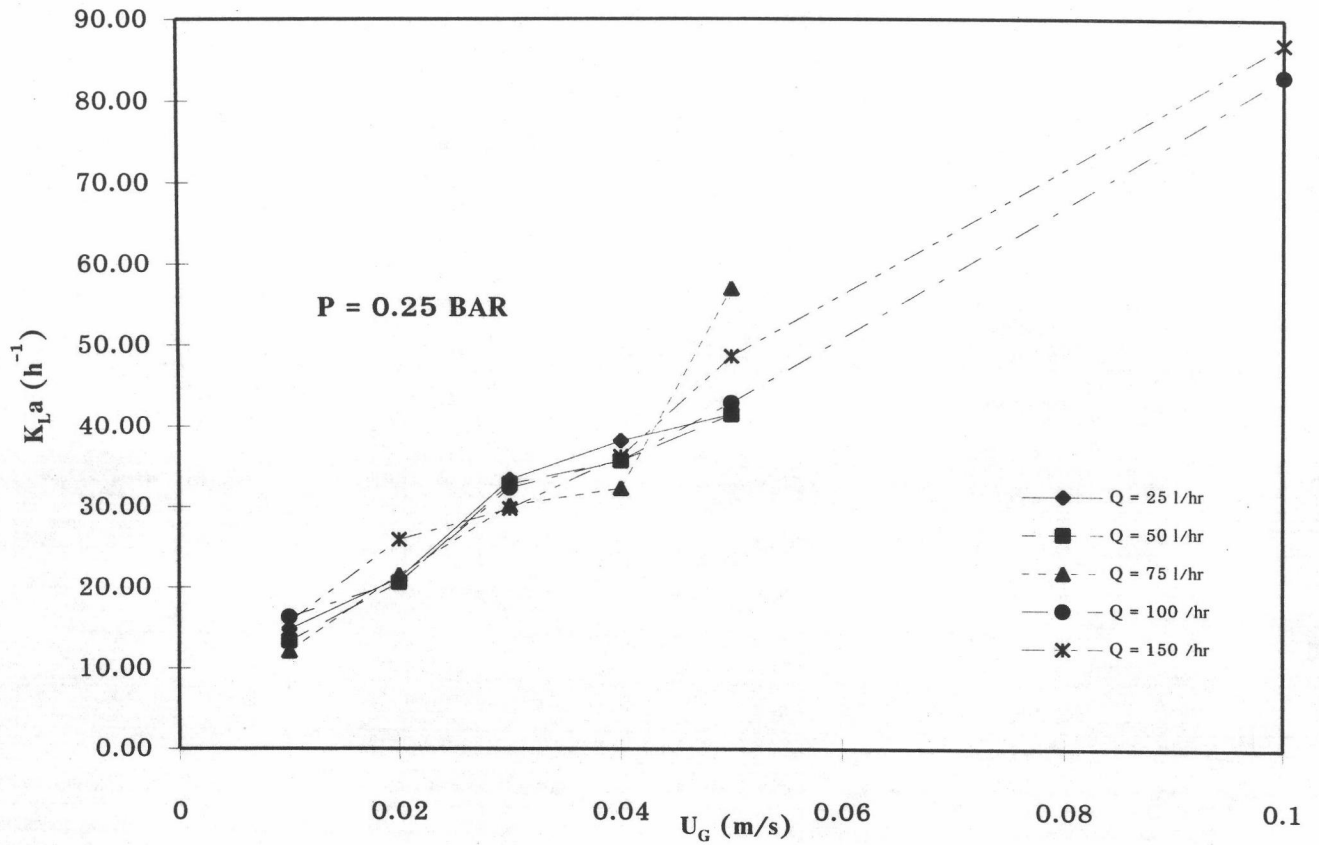
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{L,a}$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 75 ลิตรต่อชั่วโมง



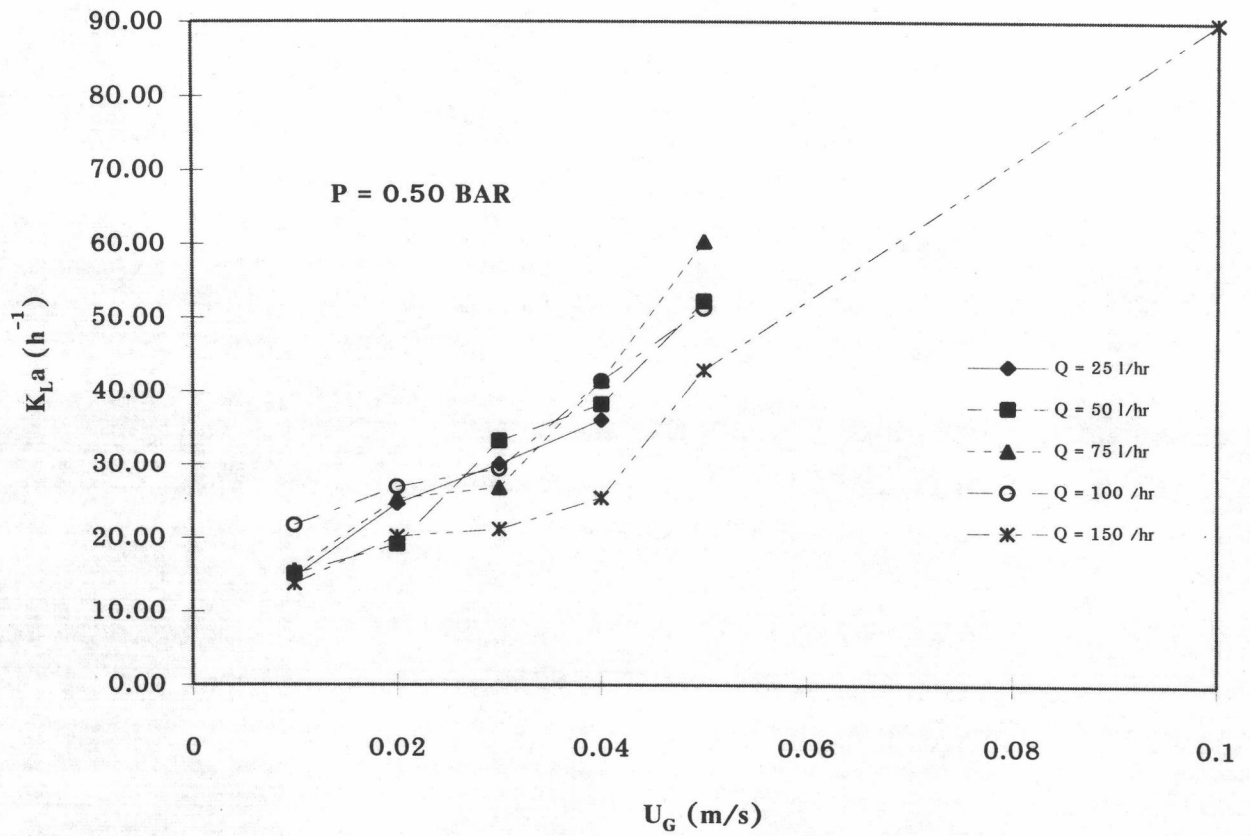
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{L,a}$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง



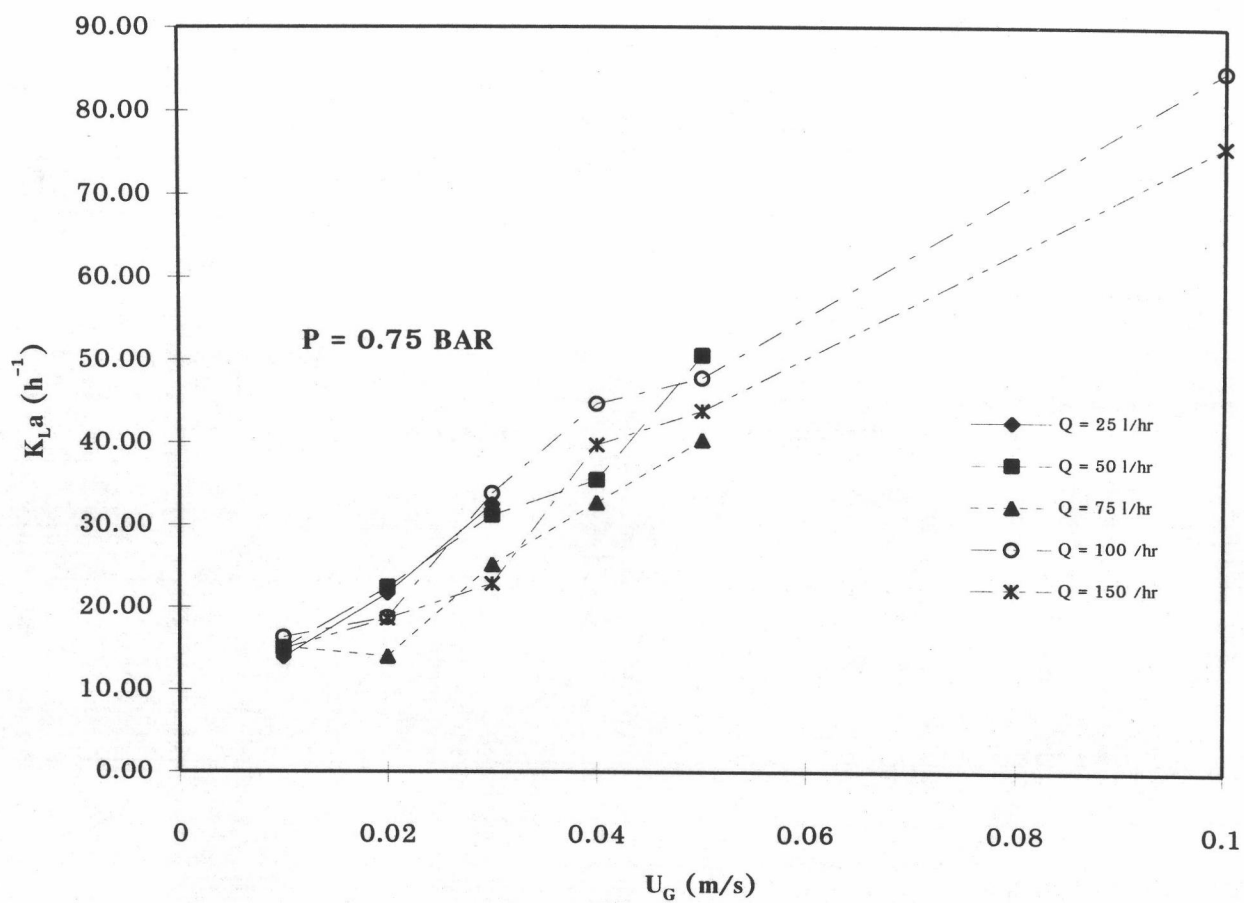
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 150 ลิตรต่อชั่วโมง



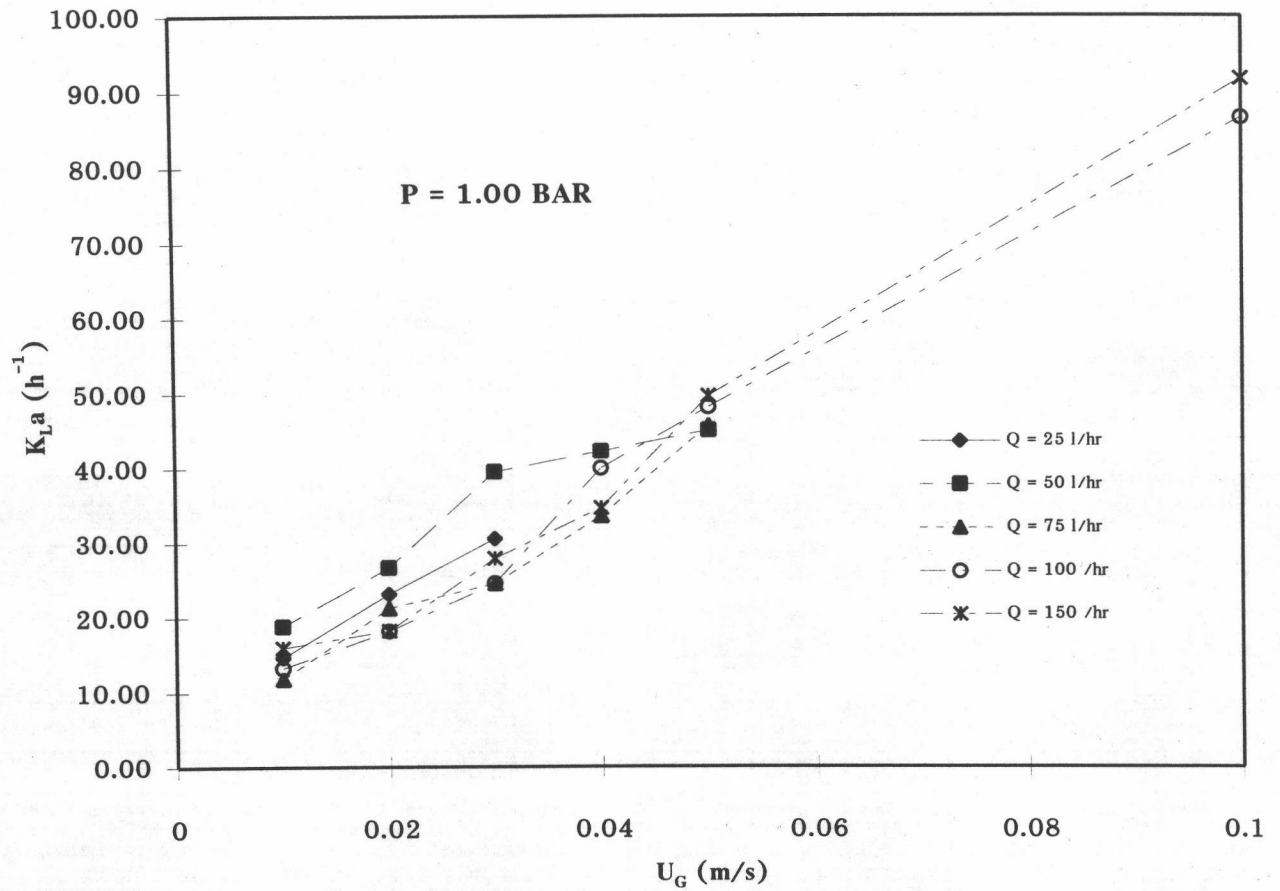
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{L,a}$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่ความดัน 0.25 บาร์



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่ความดัน 0.50 บาร์



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{L,a}$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่ความดัน 0.75 บาร์



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วก๊าซที่ความดัน 1.00 บาร์

100, 150 ลิตรต่อชั่วโมง และความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 บาร์ ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ. ได้แก่ ตารางที่ จ.16 ถึง จ.24

รูปที่ 4.16 ถึง 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนกับความเร็วของก๊าซในถังปฏิกรณ์ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10 เมตรต่อวินาที ที่ทุกๆ อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และความดันในถังปฏิกรณ์ จะเห็นได้ว่า ค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นในแต่ละอัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และความดันในถังปฏิกรณ์

การทดลอง อิทธิพลของความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่มีค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ใน รูปที่ 4.16 ถึง 4.24 สอดคล้องกับทฤษฎี การถ่ายเทมวลระหว่างสถานะ กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของเหลวขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวและความหนาของฟิล์มของเหลว (Azbel, 1981) ดังสมการ

$$k_L = D_L / \Delta x_L$$

โดยที่

$$\begin{aligned} k_L &= \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของฟิล์มของเหลว} \\ D_L &= \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว} \\ \Delta x_L &= \text{ความหนาของฟิล์มของเหลว} \end{aligned}$$

นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล จะมีค่าแปรเปลี่ยนตามสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวและขนาดความหนาของฟิล์มของเหลว (Chisti, 1989)

จากผลการทดลอง อิทธิพลของความเร็วก๊าซที่มีต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน พบว่า $K_L a$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ความปั่นป่วนในถังปฏิกรณ์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จากสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของเหลว $k_L = D_L / \Delta x_L$ ความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดความหนาของฟิล์มลดลง เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความปั่นป่วนยังทำให้การ

ถ่ายเทมวลที่เกิดจากการพามวลจากผิวสัมผัสของสองสถานะไปยังมวลของเหลวเป็นไปอย่างรวดเร็ว (McCabe, Smith and Harriot, 1993)

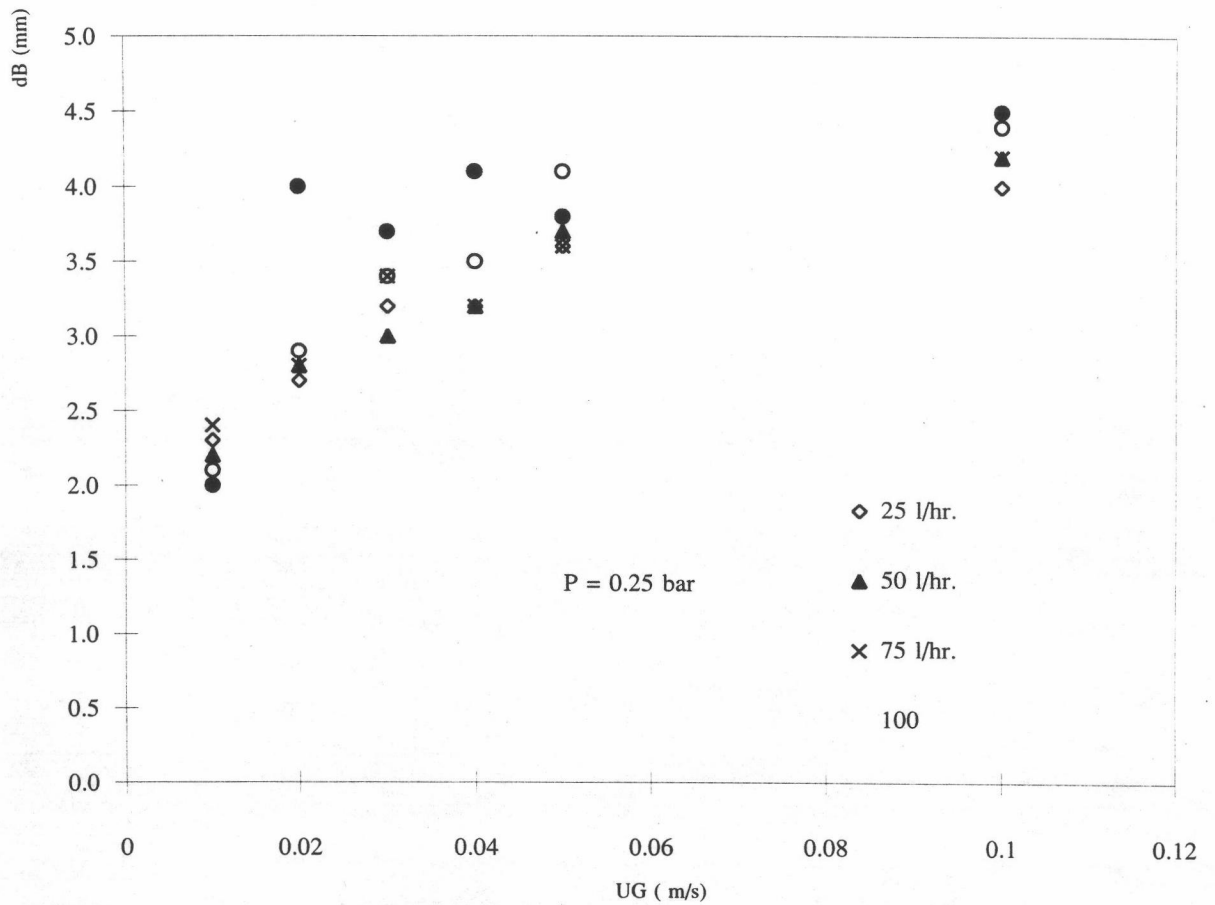
4.2.4 อิทธิพลของความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่มีผลต่อขนาดฟองก๊าซ

ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำสะอาดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์และขนาดฟองก๊าซที่ความเร็วก๊าซ 0.01 , 0.02 , 0.03 , 0.04 , 0.05 , 0.10 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ 4.25 ถึง 4.28

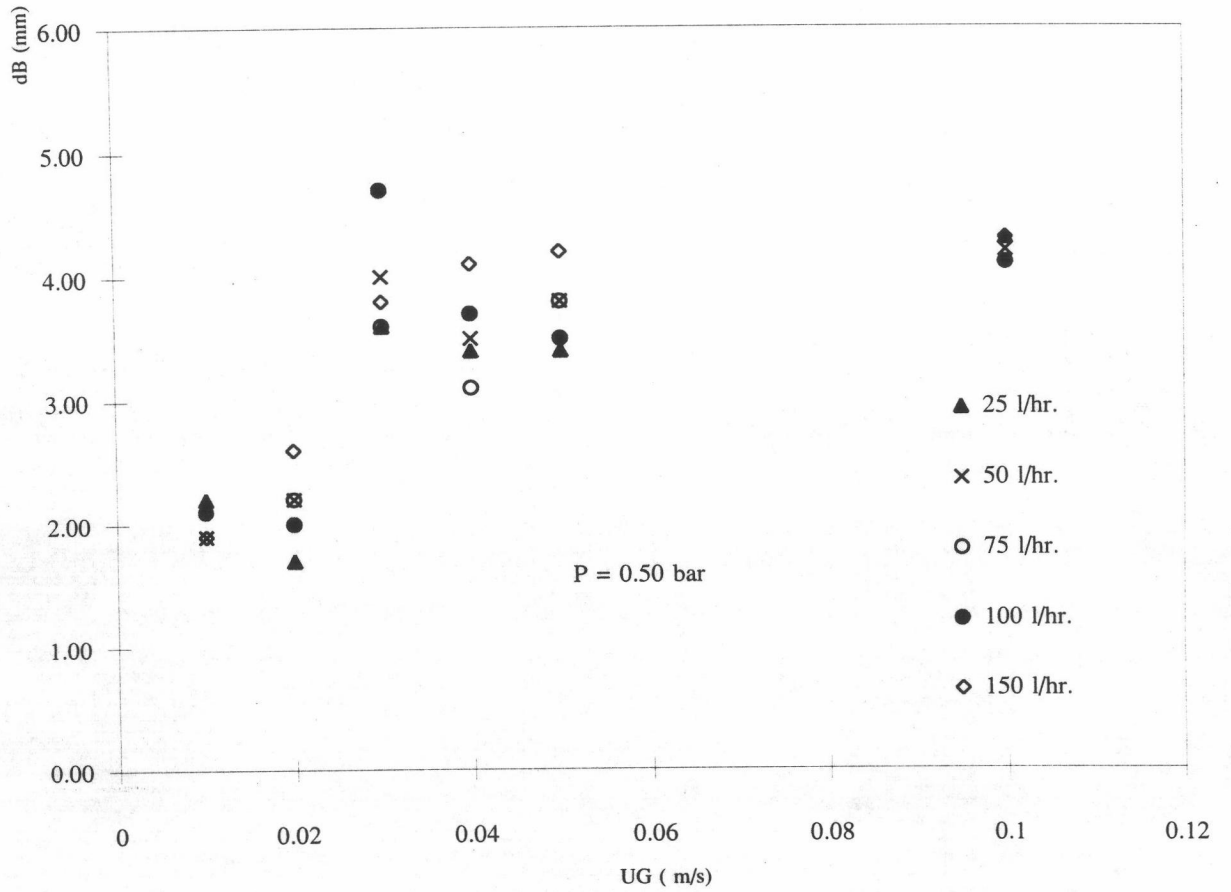
รูปที่ จ.25 ถึง จ.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์และขนาดฟองก๊าซ จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นขนาดของฟองก๊าซก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าต่ำ การชนกันของฟองก๊าซจะมีน้อย แต่เมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นฟองก๊าซจะเกิดการชนกันมากขึ้น และเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจนทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างมากกว่า 0.3 ก็จะมีการไหลแบบสลักขึ้น (Azbel, 1981)

จากการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน สามารถสรุปผลได้ คือ อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และความดันในถังปฏิกรณ์ไม่มีผลต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ส่วนความเร็วก๊าซจะมีผลต่อค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นค่า $K_L a$ ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วก๊าซ ซึ่งก็เป็นผลเนื่องมาจากค่าความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลจากฟิล์มของเหลวโดยการพา ไปยังมวลของเหลวเพิ่มขึ้น และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (Chisti, 1989)

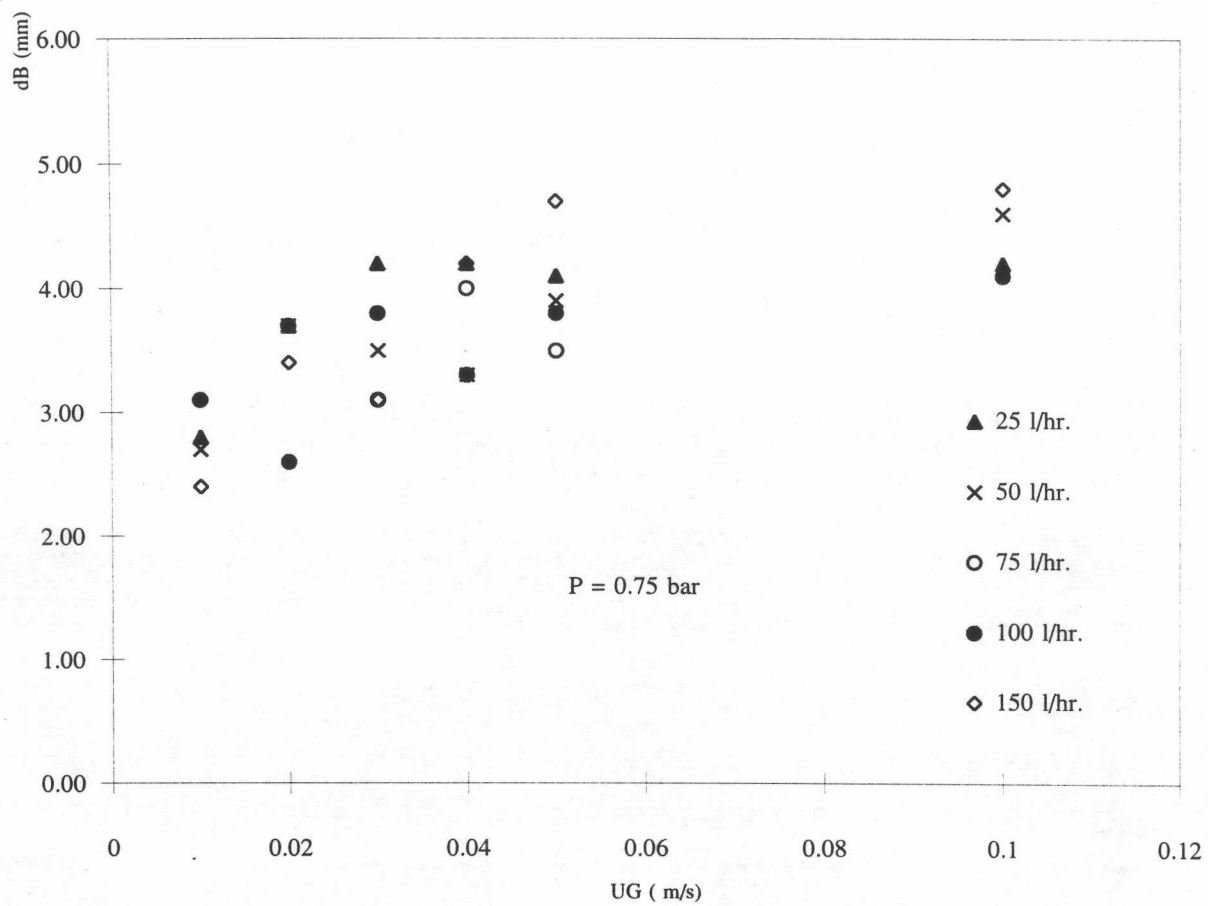
จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Oxygen Transfer Efficiency (OTE) กับความเร็วก๊าซ (U_G) ที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อความดันในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นค่า OTE ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างมวลของออกซิเจนที่ถ่ายเทจากสถานะก๊าซไปสถานะเหลวต่อมวลเทออกซิเจนในสถานะก๊าซที่เข้าในถังปฏิกรณ์ (%) จะเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มอย่างคงที่ตามความดันถังปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการการถ่ายเทมวล คือ



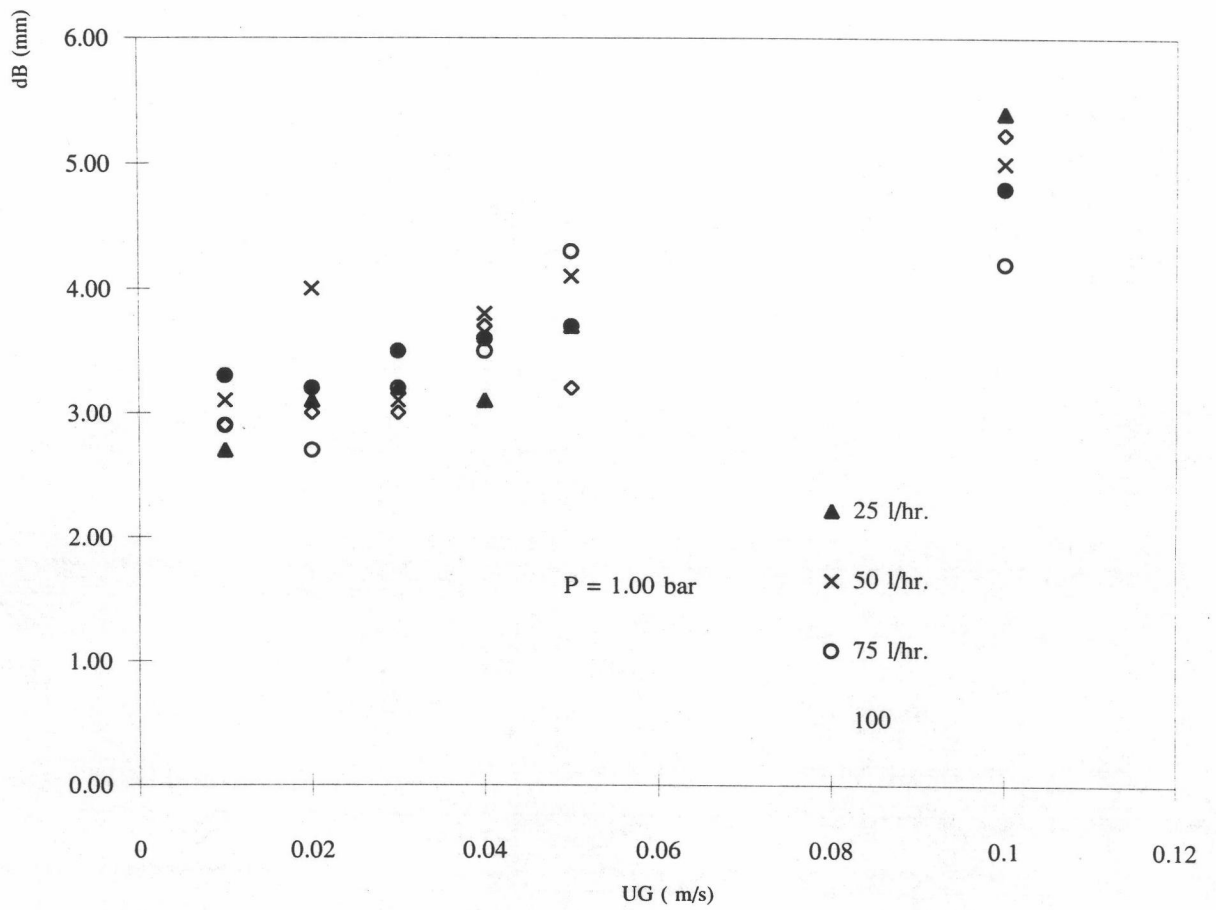
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์กับขนาดฟองก๊าซที่ความดัน 0.25 บาร์



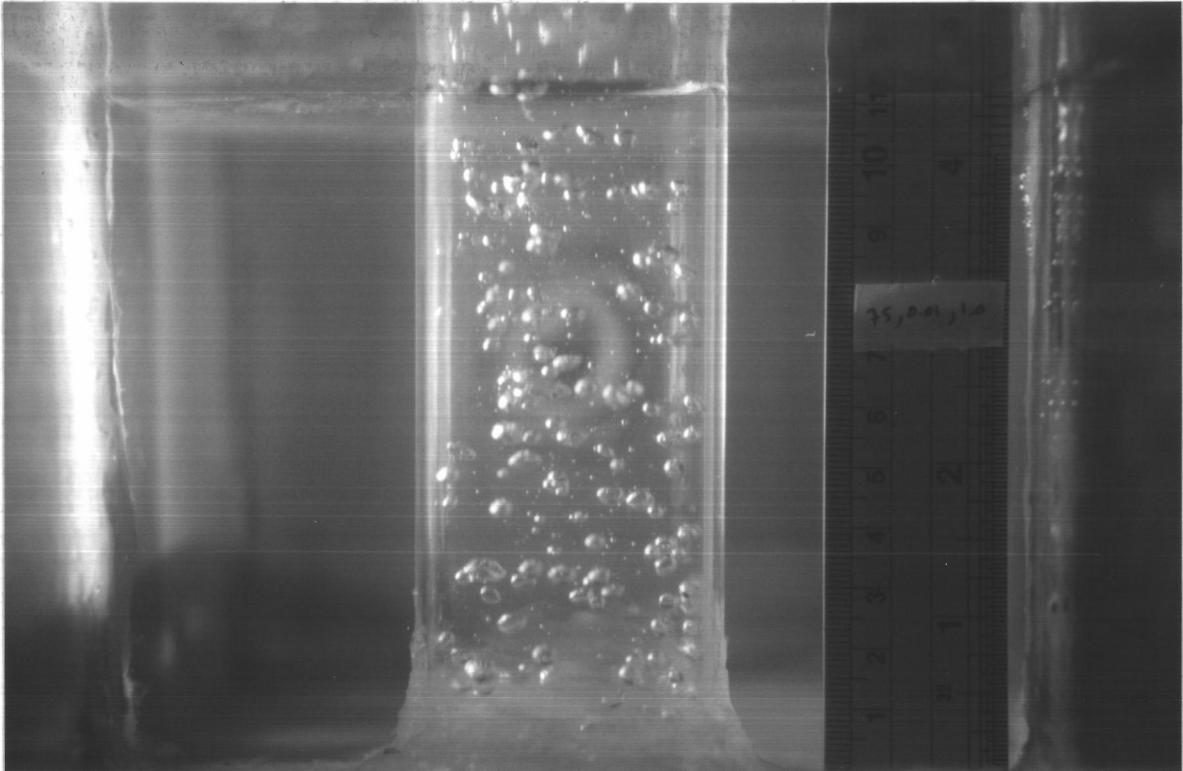
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์กับขนาดฟองก๊าซที่ความดัน 0.50 บาร์



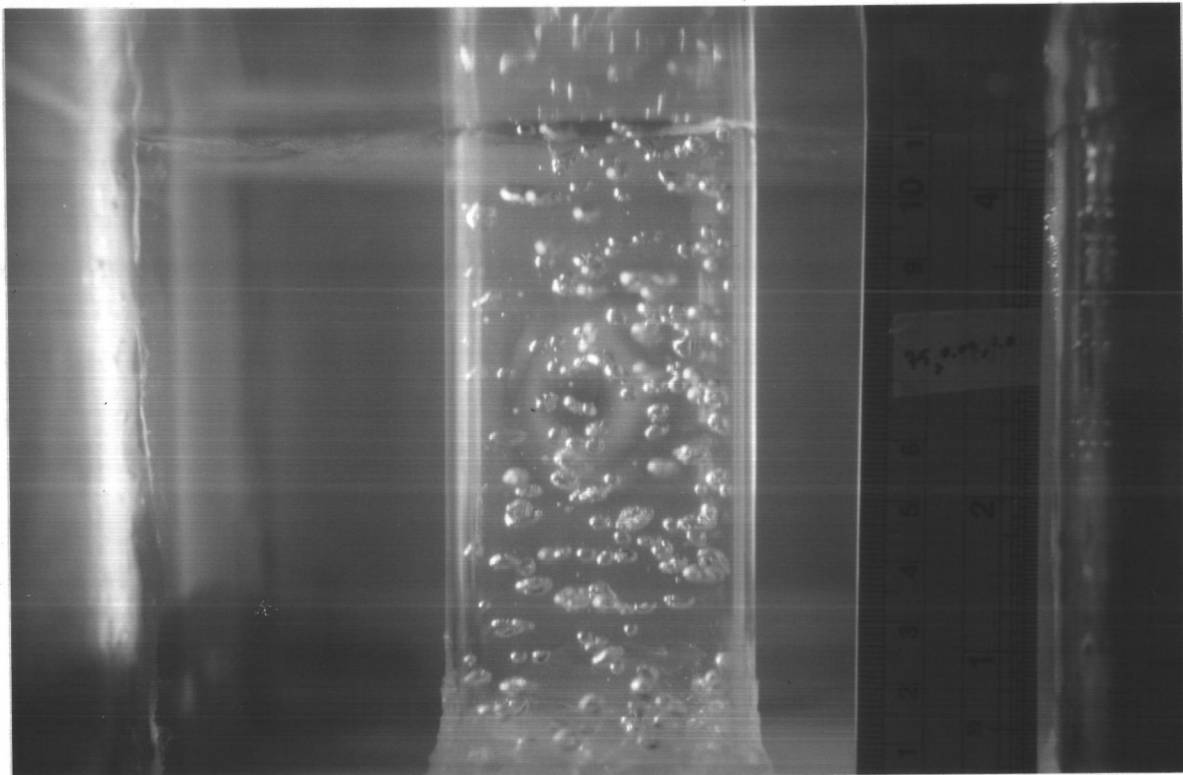
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์กับขนาดฟองก๊าซที่ความดัน 0.75 บาร์



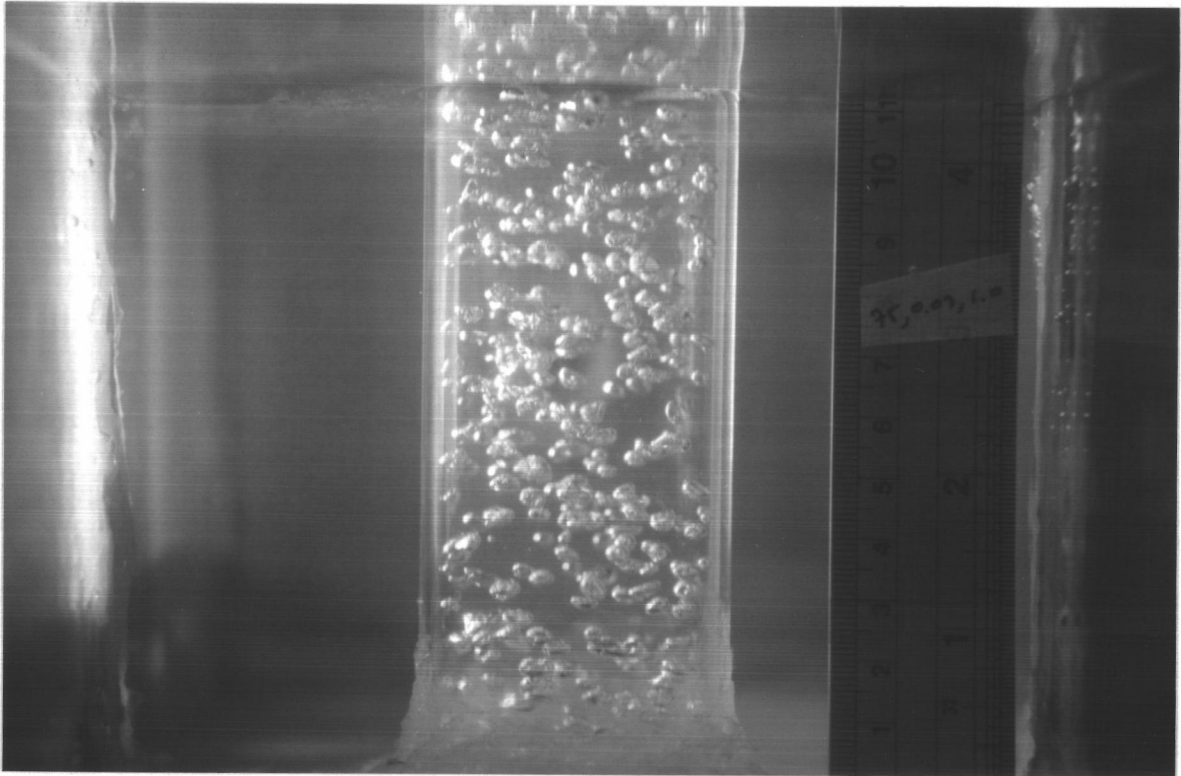
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์กับขนาดฟองก๊าซที่ความดัน 1.00 บาร์



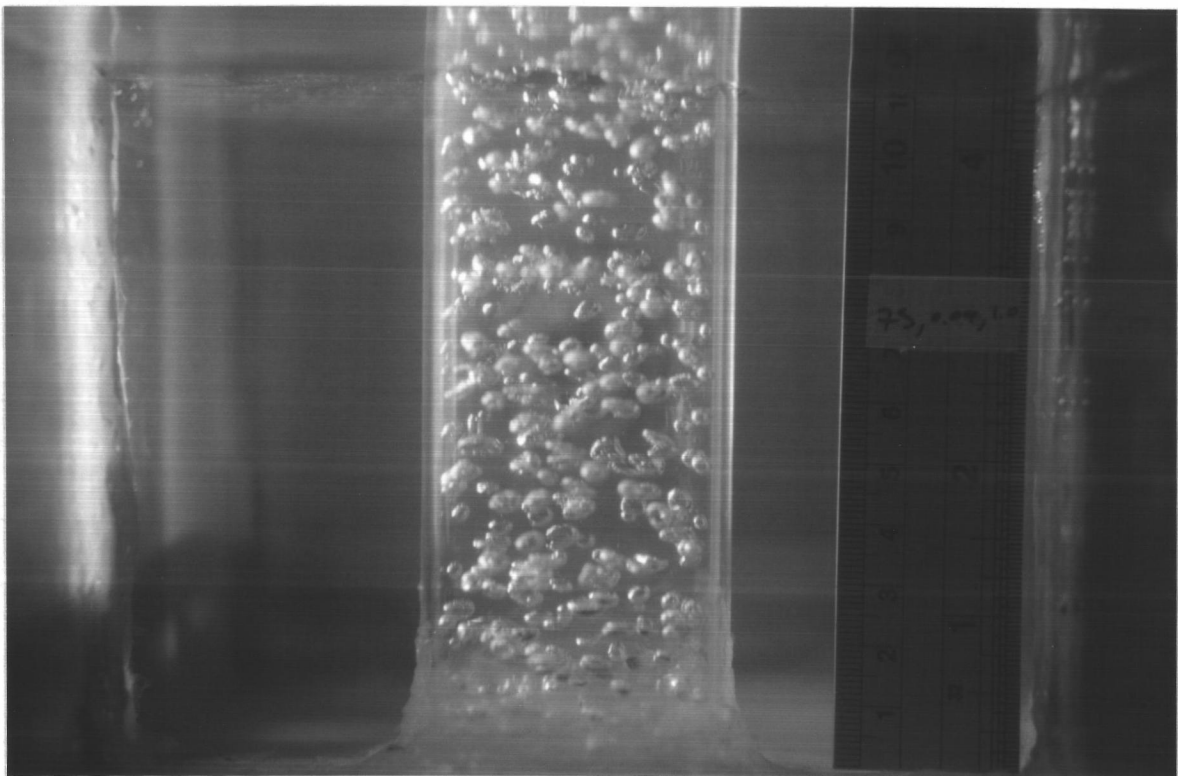
รูปที่ 4.29 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.01 เมตรต่อวินาที



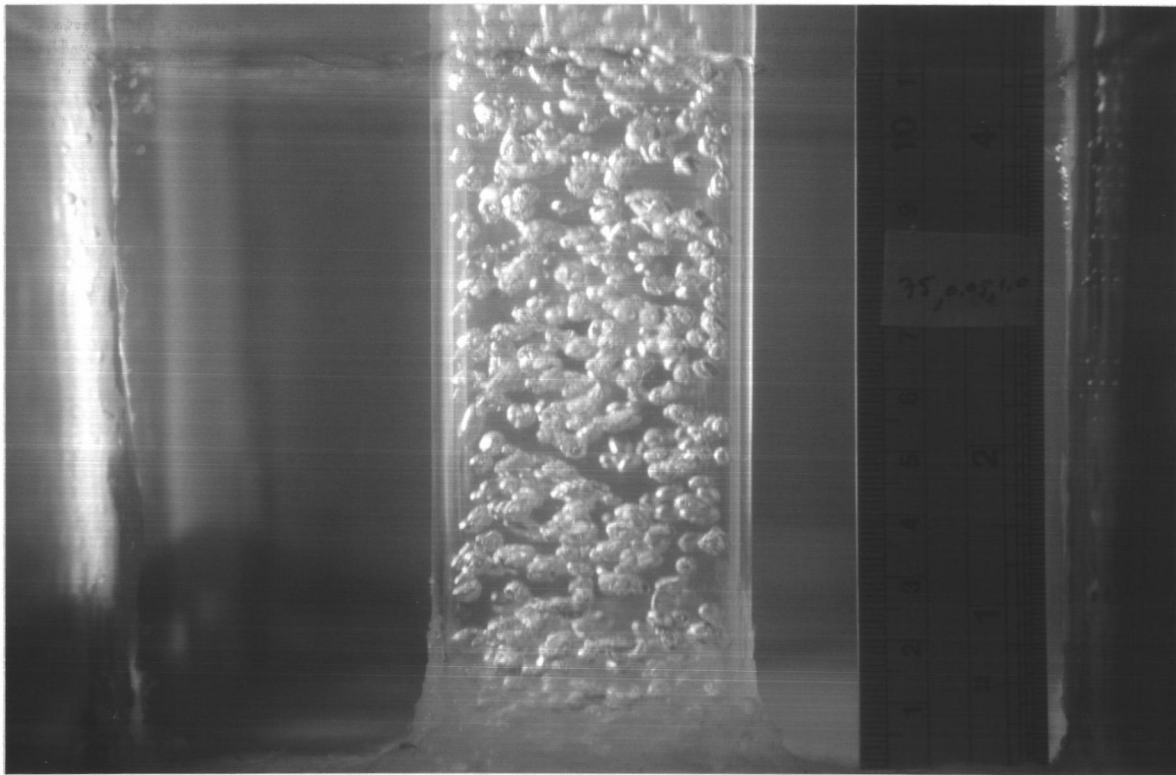
รูปที่ 4.30 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที



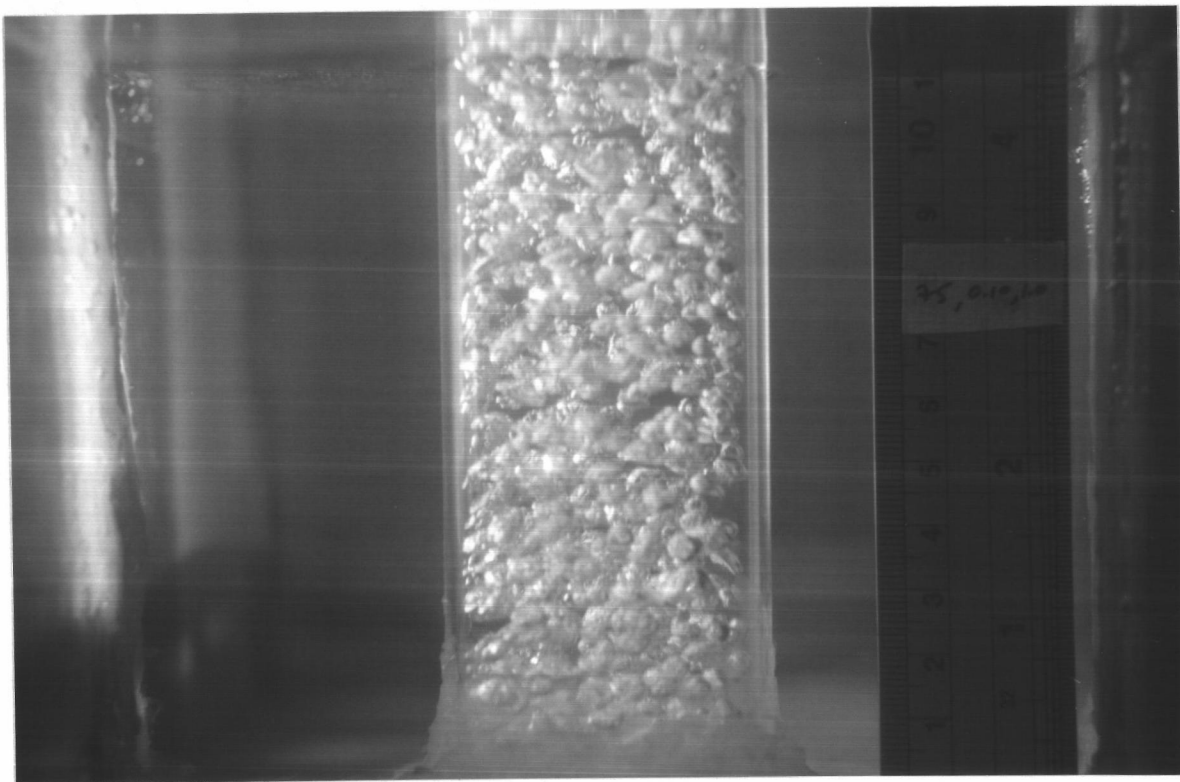
รูปที่ 4.31 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.03 เมตรต่อวินาที



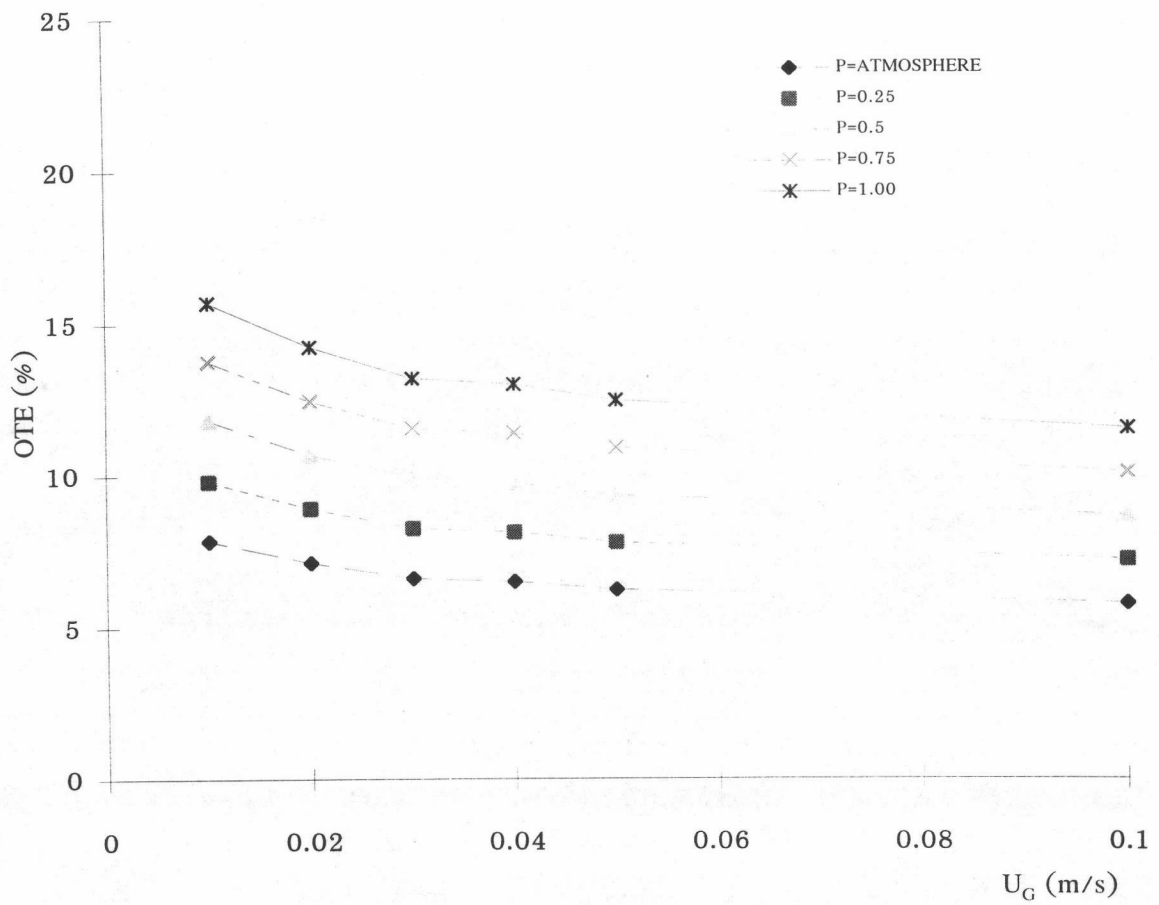
รูปที่ 4.32 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.04 เมตรต่อวินาที



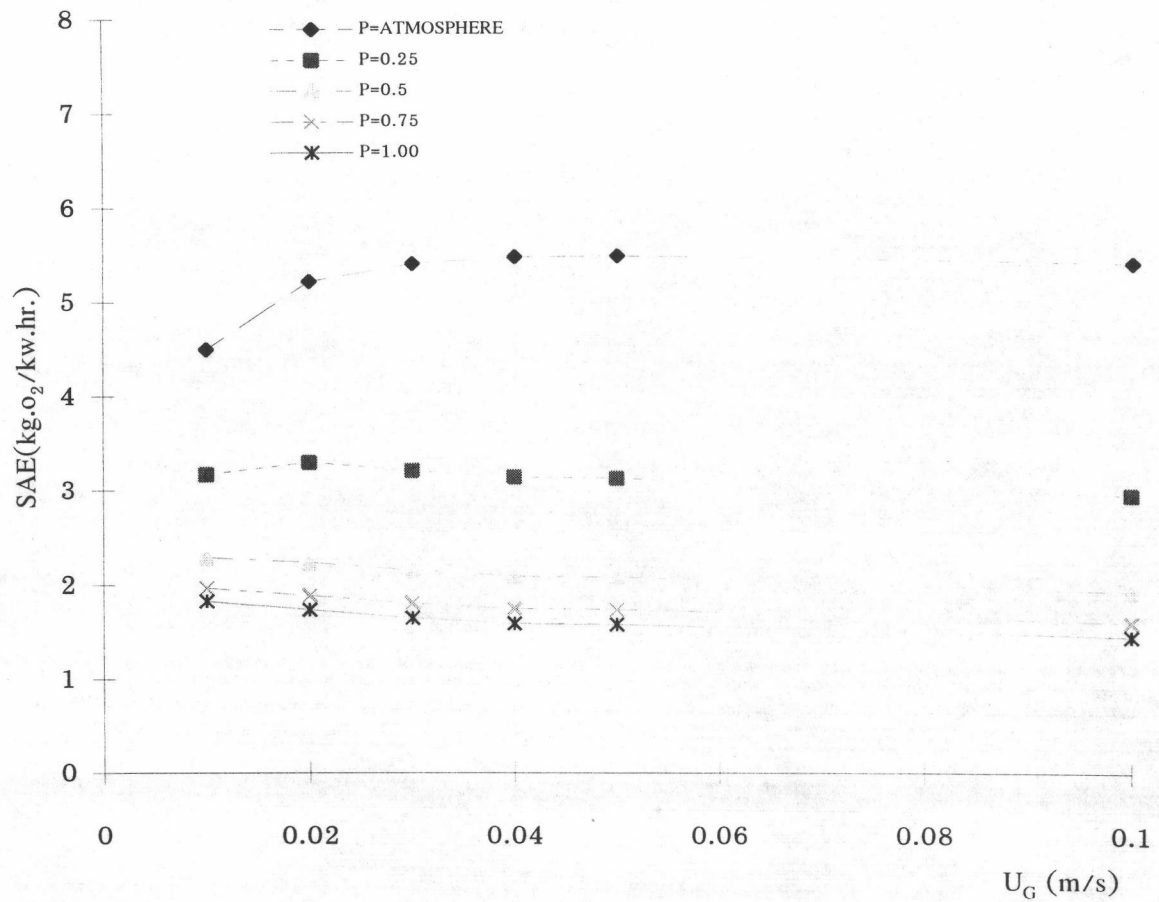
รูปที่ 4.33 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที



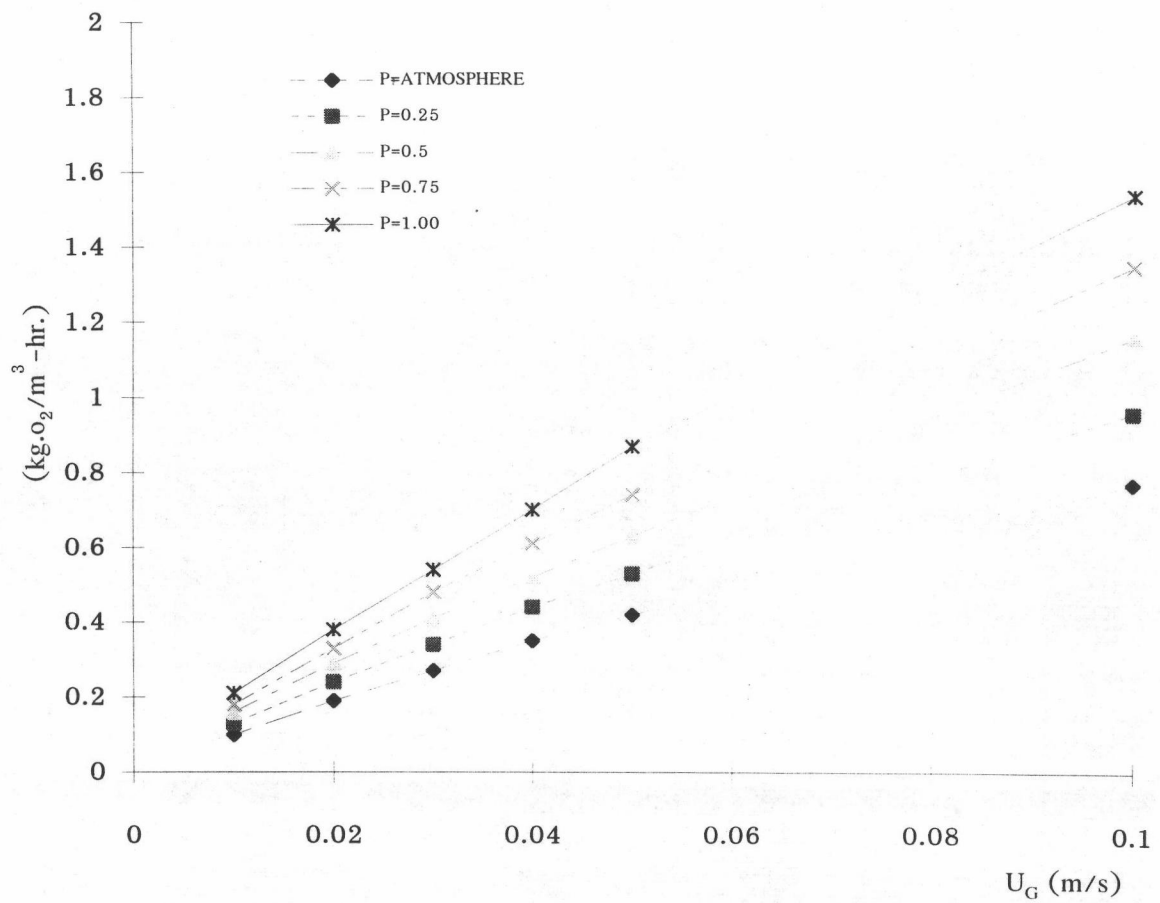
รูปที่ 4.34 ลักษณะของฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วก๊าซ 0.10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า OXYGEN TRANSFER EFFICIENTCY (OTE) V (%)
ค่าความเร็วก๊าซ (U_G) ที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AERATION EFFICIENCY (SAE) (kg O₂/kw.hr) กับ ความเร็วก๊าซ (U_G) ที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า OXYGEN TRANSFER RATE ต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ ที่ความดันต่างๆ (kg O₂/m³.hr)

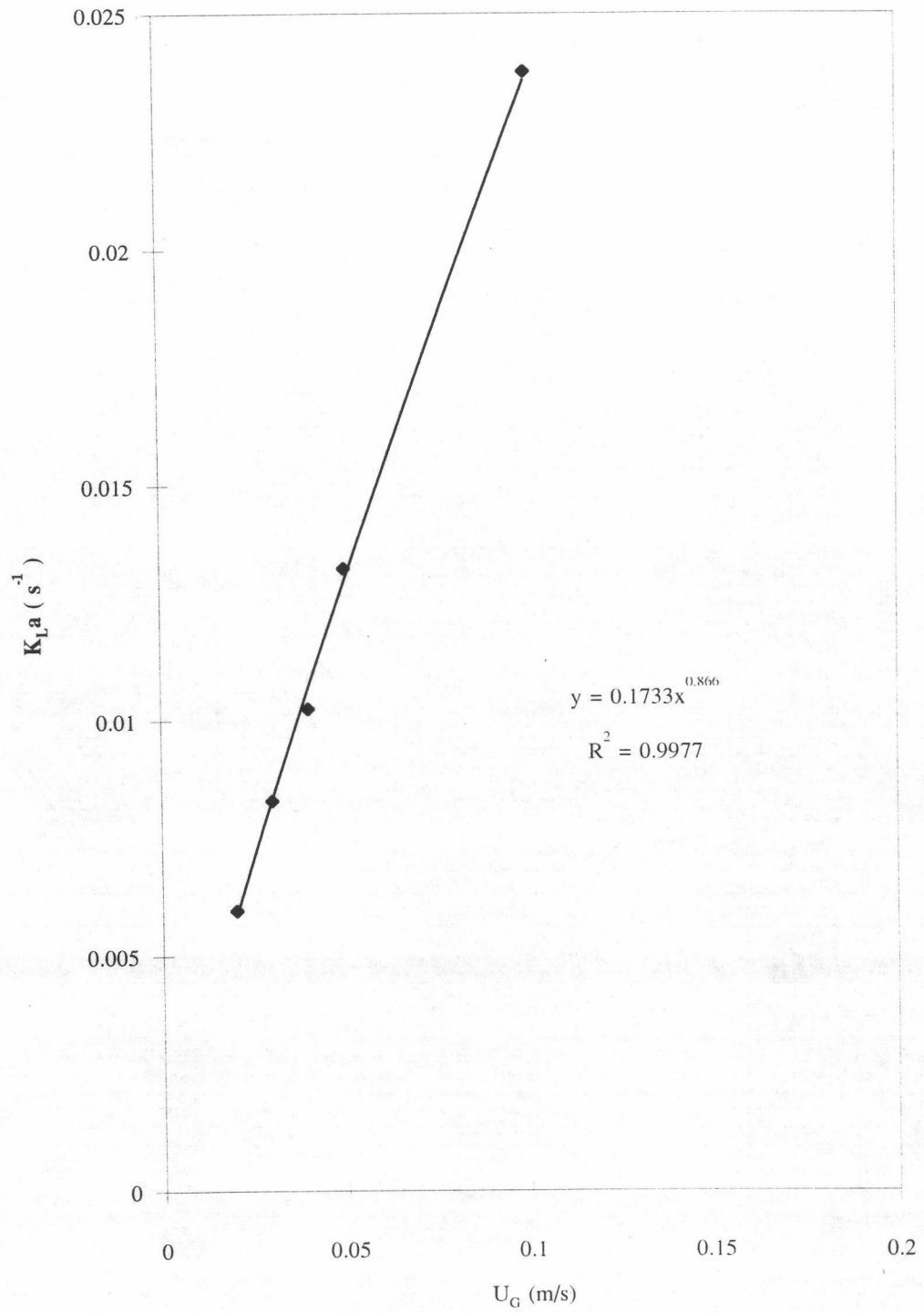
$$\frac{dc}{dt} \times V = \frac{dN}{dt} = K_L a (c_A^* - c_A) V$$

เมื่อความดันในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างกฎของเฮนรีและดัลตัน ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่จุดสมดุล (c_A^*) จะเพิ่มขึ้นตามสมการ 2.5 เป็นผลให้มวลออกซิเจนที่ถ่ายเทจากสถานะก๊าซไปสถานะของเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า OTE จึงเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น

ค่า OTE จะมีค่าลดลงน้อยเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วก๊าซสูง จำนวนฟองก๊าซมีจำนวนมากเกิดการชนและรวมตัวกันขึ้น (Azbel, 1981) จนเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ เป็นผลให้ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะ (Specific Interfacial Area) ลดลง (ค่า $K_L a$ ลดลง) มวลออกซิเจนที่ถ่ายเทต่อเวลาจึงมีค่าลดลง ดังนั้นค่า OTE จึงมีค่าลดลงเมื่อความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์ (U_G) เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AERATION EFFICIENTCY (AE) กับความเร็วก๊าซ (U_G) ที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความดันในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้น ค่า AE ซึ่งก็คือค่ามวลออกซิเจนที่ถ่ายเทจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลวต่อพลังงานต่อเวลา ($\text{kg O}_2/\text{kw.hr}$) จะมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากเมื่อถังปฏิกรณ์มีค่าความดันสูงขึ้น พลังงานที่ต้องใช้ในการอัดอากาศเข้าถังปฏิกรณ์ จะมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับมวลออกซิเจนที่ถ่ายเทเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของความดันในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้ค่ามวลออกซิเจนที่ถ่ายเทระหว่างสถานะต่อพลังงานต่อเวลา (AE) ($\text{kg O}_2/\text{kw.hr}$) มีค่าลดต่ำลงเมื่อความดันในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลออกซิเจนที่ถ่ายเทต่อปริมาณของถังปฏิกรณ์ต่อเวลากับความเร็วก๊าซ (U_G) ที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่ามวลออกซิเจนที่ถ่ายเทต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ต่อเวลา จะมีค่าเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์และที่ความเร็วก๊าซใด ๆ จะมีค่ามากที่ความดันในถังปฏิกรณ์สูง



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ K_{La} กับความเร็วก๊าซในถังปฏิกรณ์

การวิเคราะห์ผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2 นี้ จากข้อสรุปที่ว่าค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วก๊าช จากรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La เฉลี่ยในแต่ละช่วงความเร็วก๊าชกับความเร็วก๊าชในถังปฏิกรณ์ ค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนจะมีค่าความสัมพันธ์กับความเร็วก๊าชในถังปฏิกรณ์ดังสมการ

$$K_La = mU_G^b$$

จากรูปที่ 4.35 สามารถหาค่า m , b โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square)

$$m = 0.1733, \quad b = 0.866 \quad r^2 = 0.9977$$

ดังนั้นสมการทั่วไปในการหาค่า K_La (20°C) ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนก็คือ

$$K_La = 0.1733 U_G^{0.866}$$

4.3 ผลการทดลองที่ใช้กับน้ำเสียจริงจากแหล่งต่างๆ

ในการทดลองกับน้ำเสียจริงจากคลองแสนแสบ และคลองข้างคณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.39 ถึง 4.50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนในแต่ละอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์แต่ละความเร็วก๊าช และความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งคงที่ที่ค่าหนึ่งไม่ว่าเวลาจะเพิ่มขึ้นเท่าไรค่าออกซิเจนละลายน้ำก็ไม่เปลี่ยนแปลง อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเจนละลายน้ำขึ้นอยู่กับค่า K_La ของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ซึ่งก็คือความสามารถในการถ่ายเทมวลออกซิเจนต่อเวลานั่นเอง ซึ่งค่า K_La ก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าชในถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2 ส่วนค่าออกซิเจนละลายน้ำของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์และความดันภายในถังปฏิกรณ์

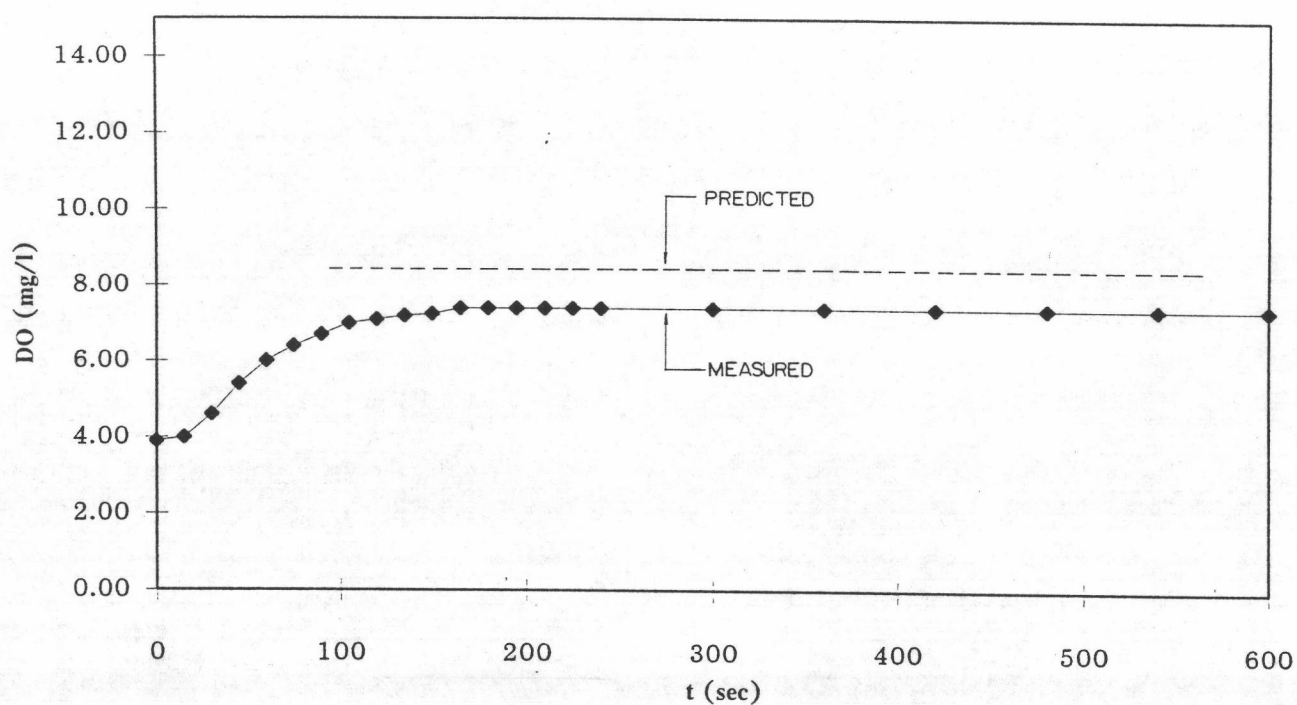
แหล่งน้ำ : คลองแสนแสบ

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

 $U_G = 0.02$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองแสนแสบเมื่อผ่านถึงปฏิกรณ์ที่ อัตราจ่ายน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

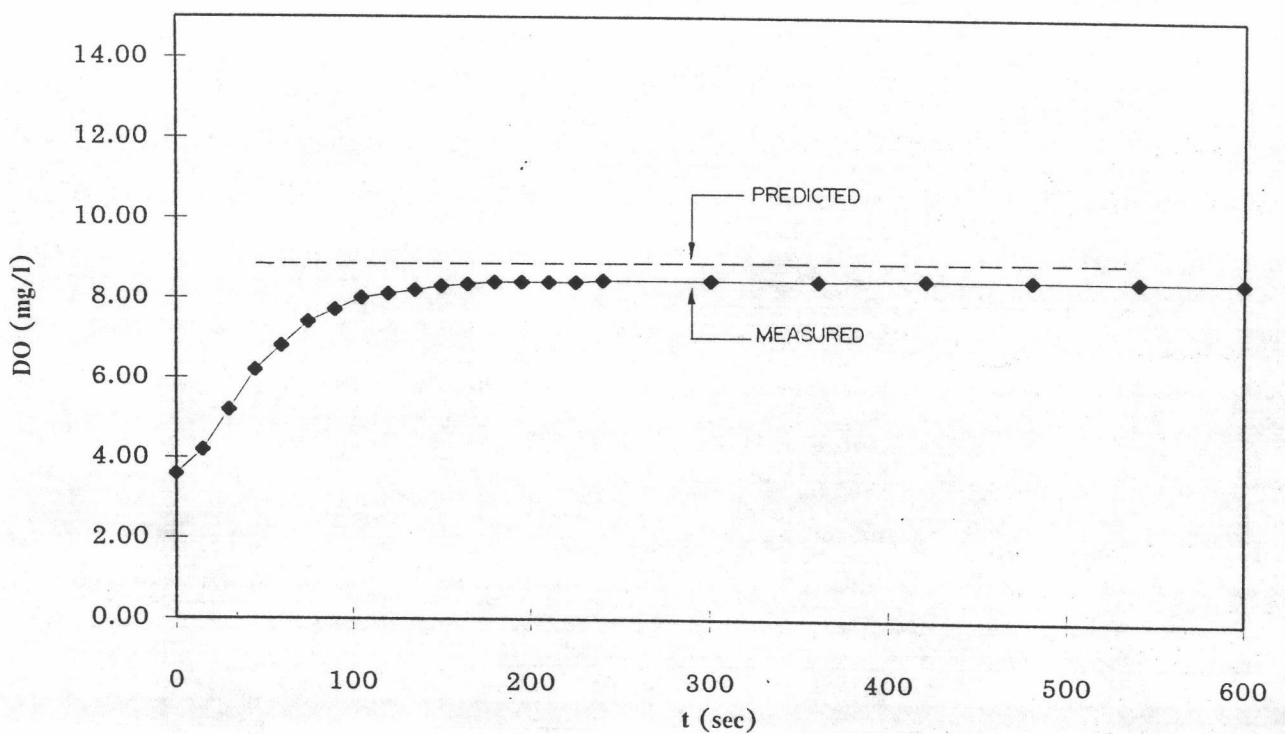
แหล่งน้ำ : คลองแสนแสบ

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

UG = 0.03 m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองแสนแสบเมื่อผ่านถึงปฏิกรณ์ที่ อัตราจ่ายน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.03 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

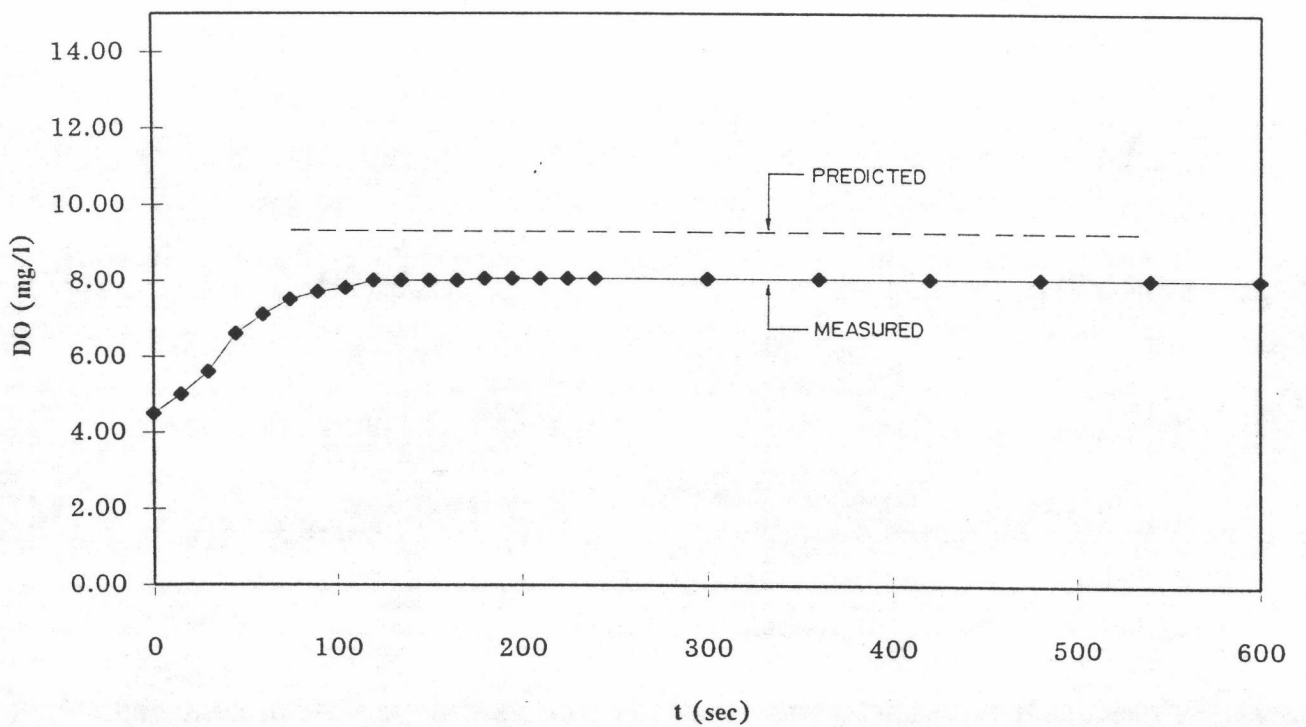
แหล่งน้ำ : คลองแสนแสบ

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

UG = 0.04 m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองแสนแสบเมื่อผ่านถึงปฏิกรณ์ที่ อัตราจ่ายน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.04 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

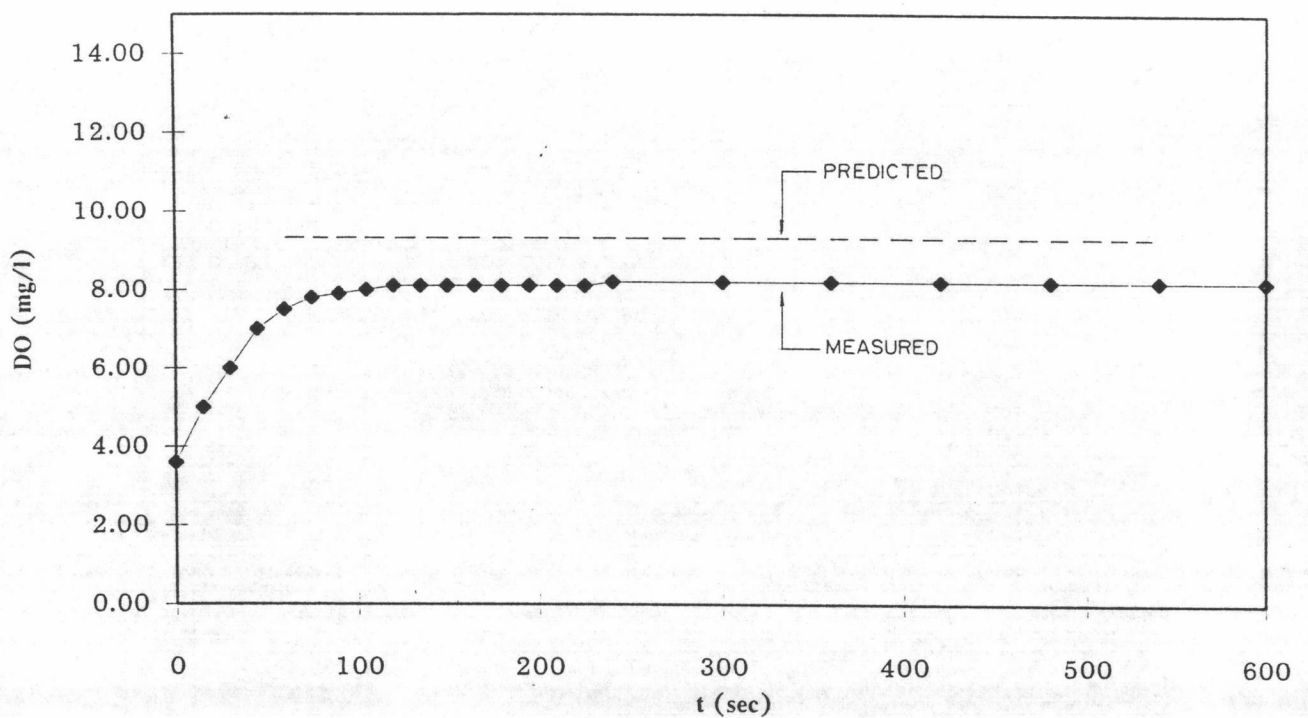
แหล่งน้ำ : คลองแสนแสบ

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

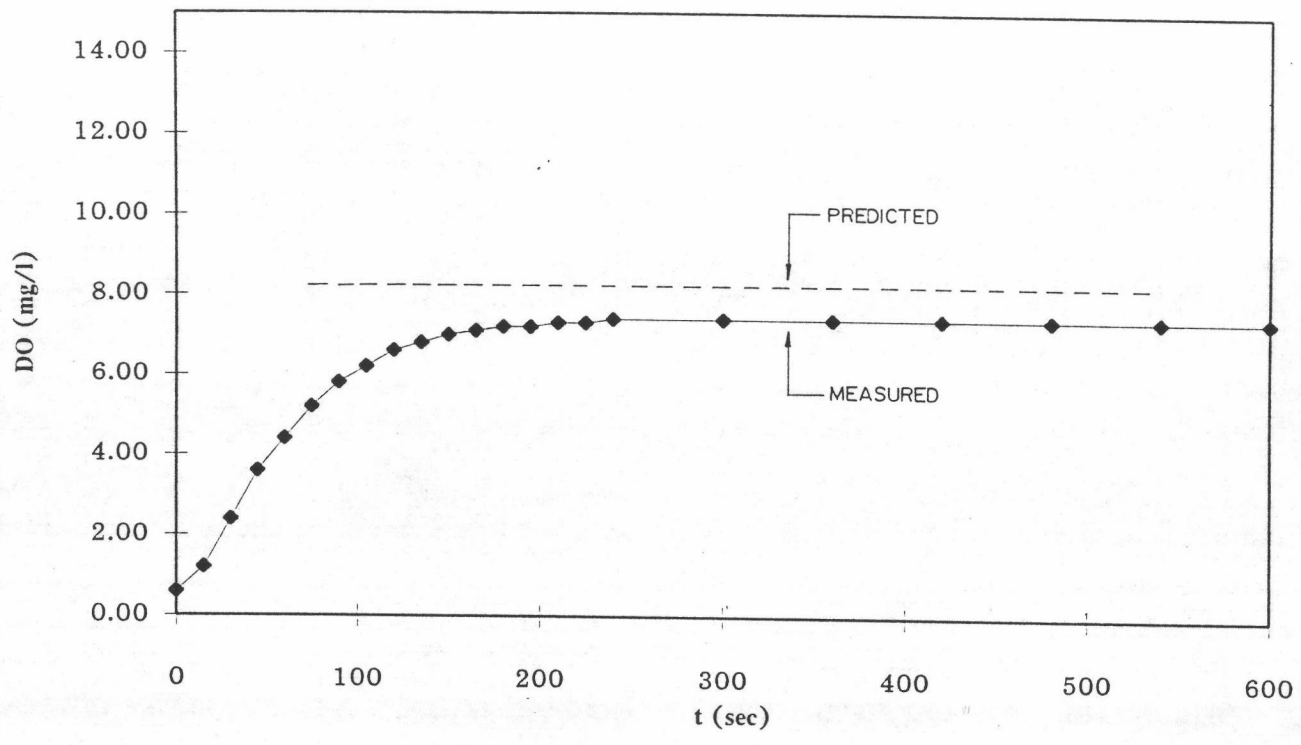
 $U_G = 0.05$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองแสนแสบเมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่ อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์ Temp = 31.5 °C
Q = 100 l/hr U_G = 0.02 m/s P = 0.25 BAR



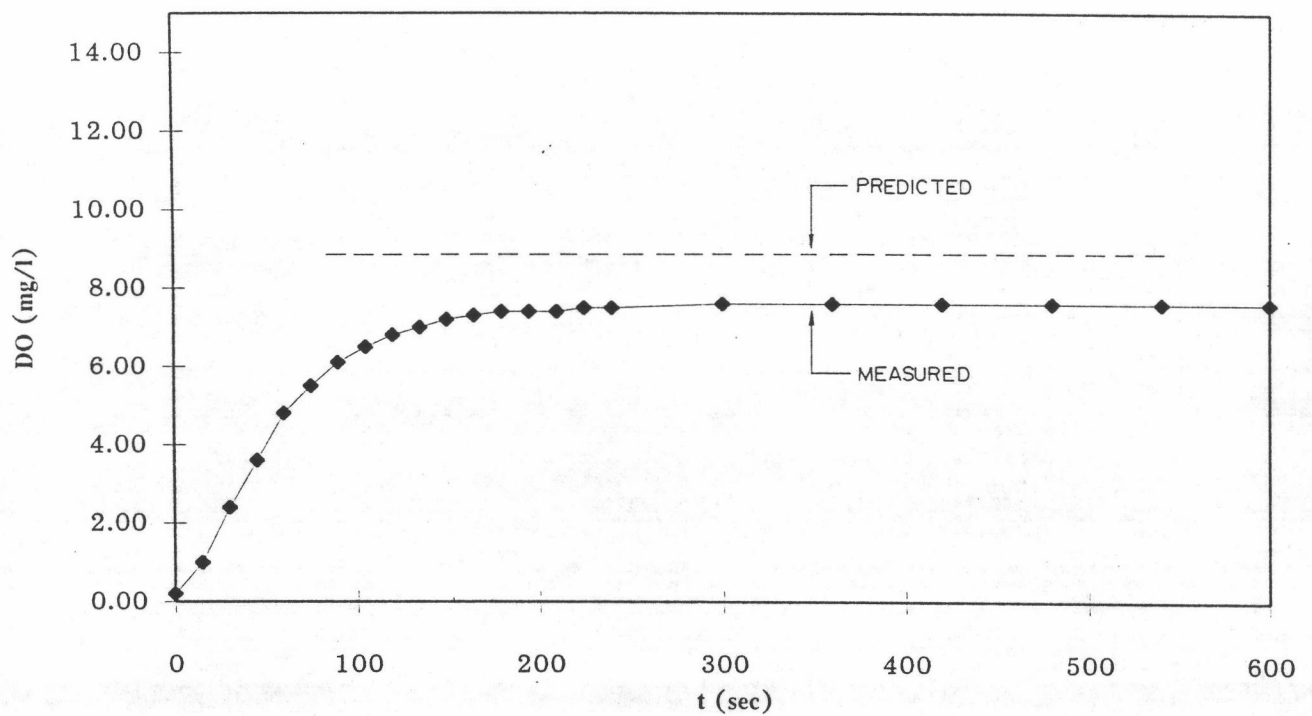
รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์ Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

UG = 0.03 m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถึงปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.03 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

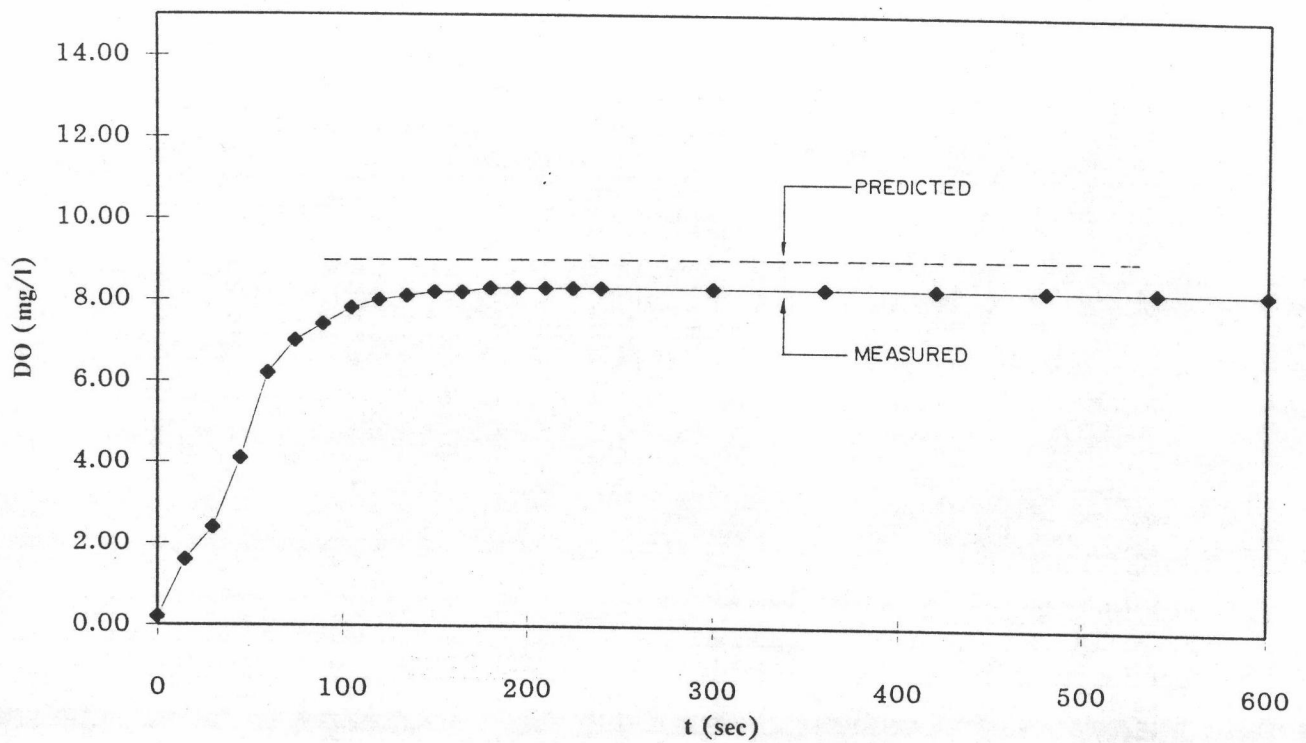
แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

$U_G = 0.04$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.04 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

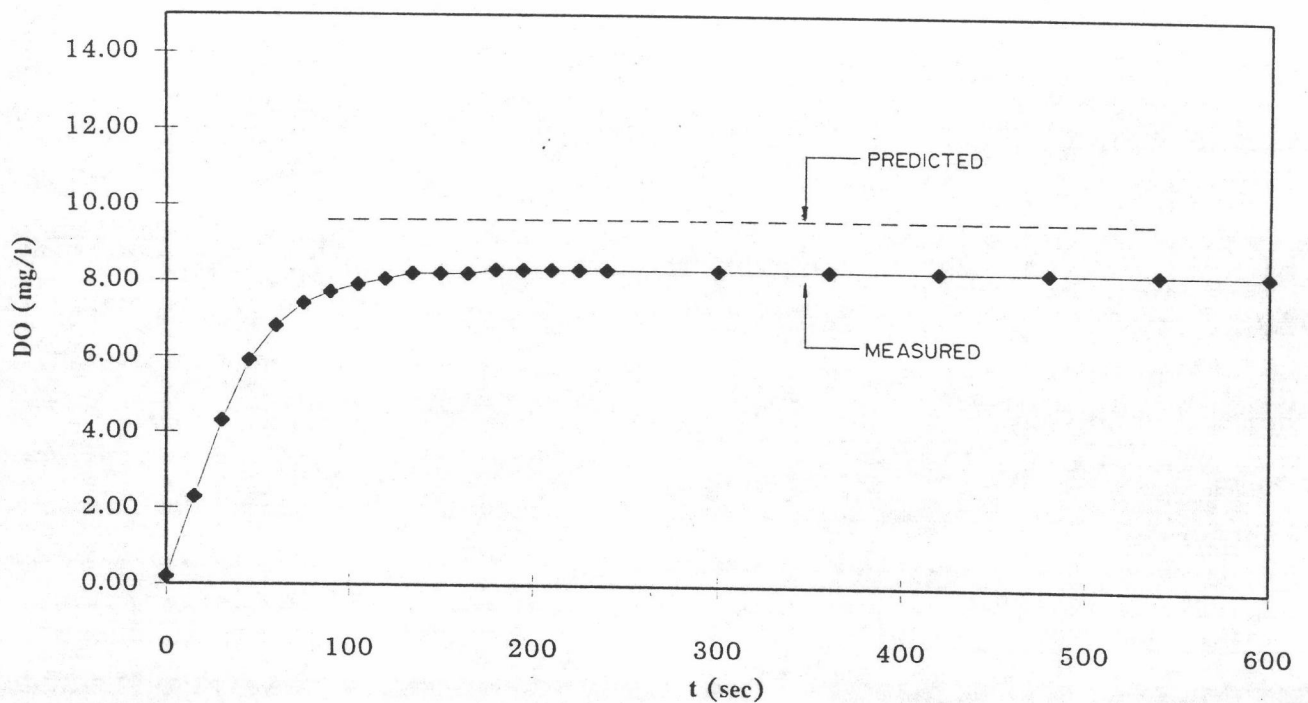
แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 100 l/hr

$U_G = 0.05$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์



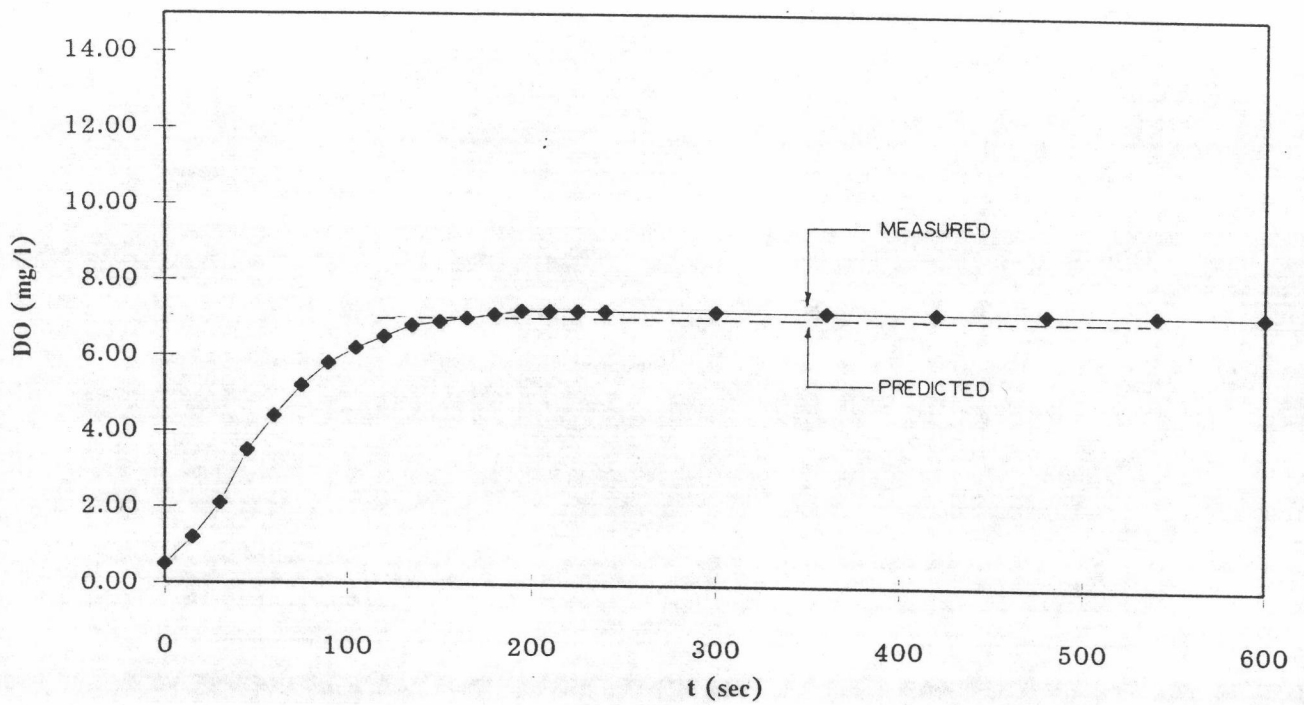
แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 175 l/hr

$U_G = 0.02$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.47 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 175 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

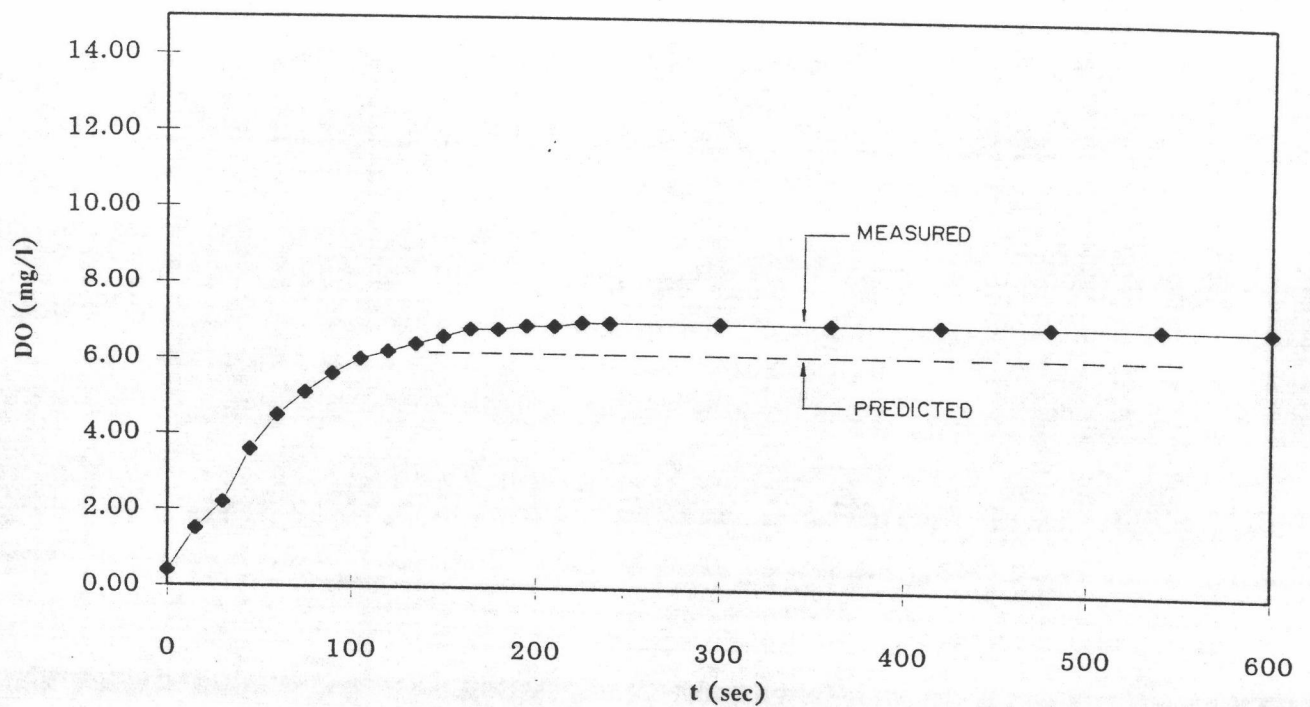
แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 250 l/hr

$U_G = 0.02$ m/s

P = 0.25 BAR



รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 250 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.02 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 0.25 บาร์

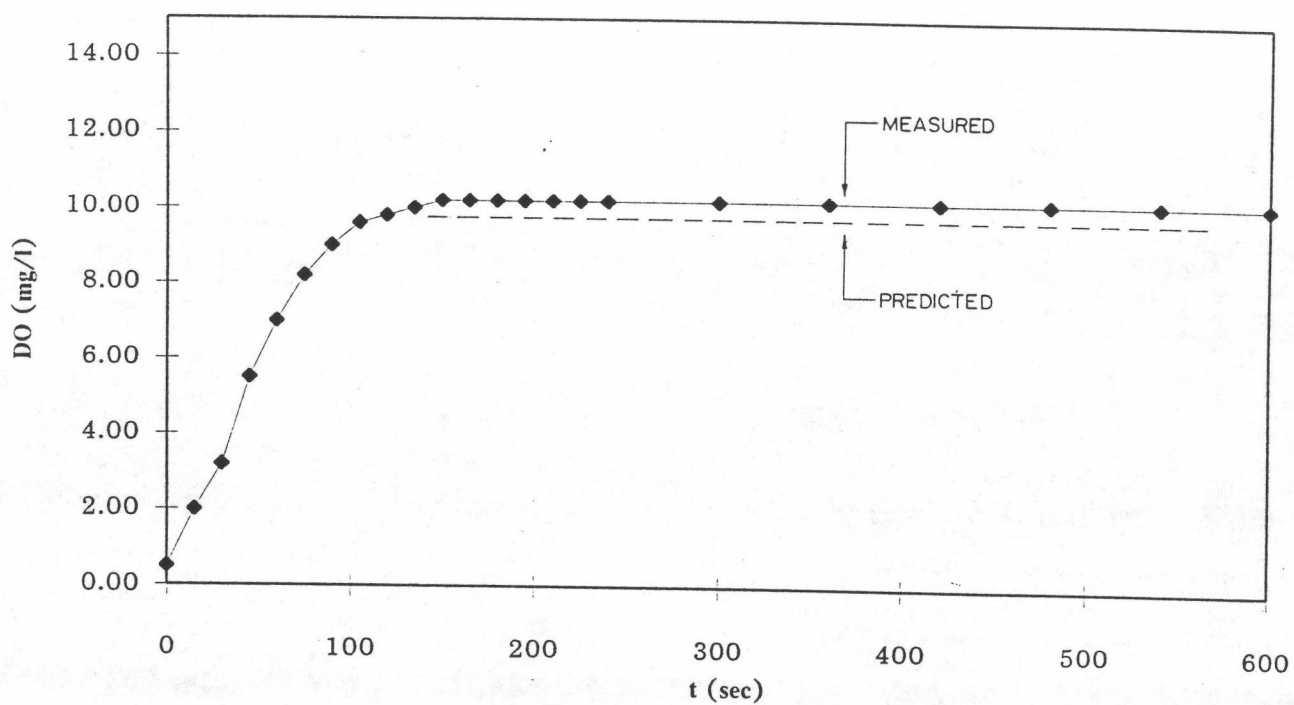
แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 250 l/hr

$U_G = 0.02$ m/s

P = 1.00 BAR

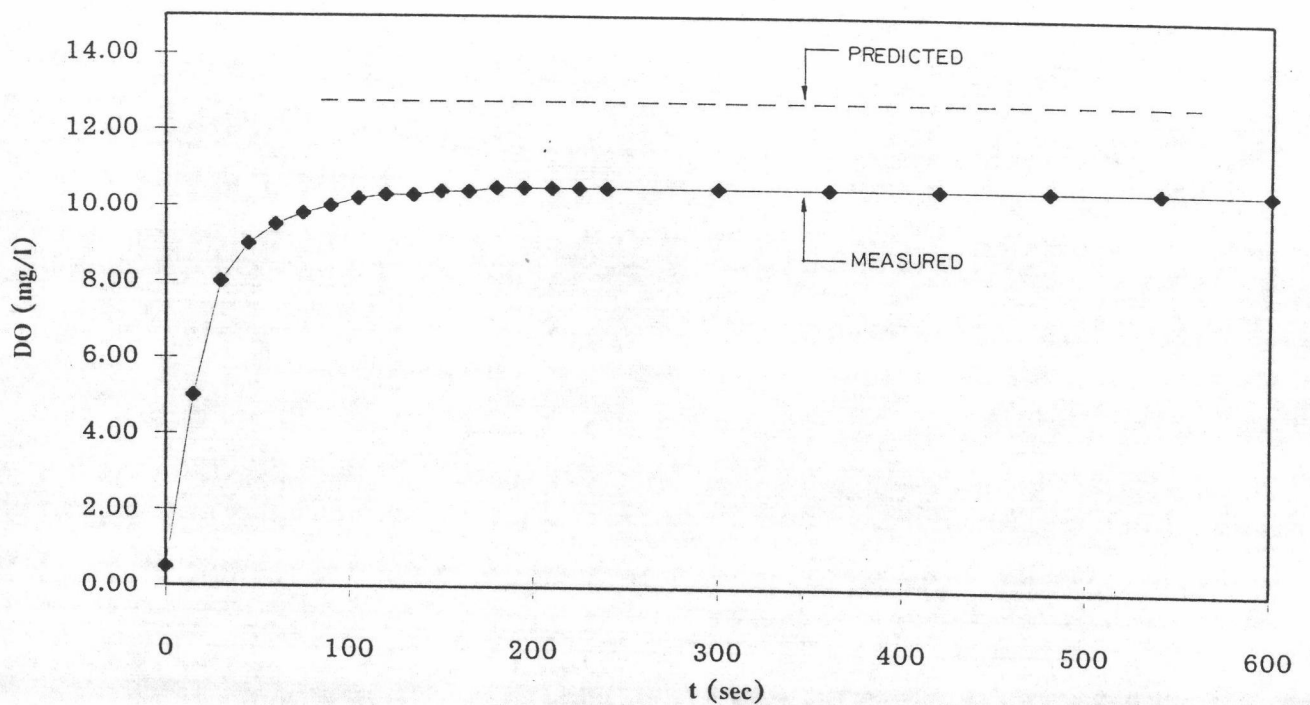


รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 250 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที ความดันในถัง 1.00 บาร์

แหล่งน้ำ : คลองข้างคณะรัฐศาสตร์

Temp = 31.5 °C

Q = 250 l/hr

 $U_G = 0.05$ m/s P = 1.00 BAR

รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำจากคลองข้างคณะรัฐศาสตร์เมื่อผ่านถังปฏิกรณ์ที่อัตราจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ 250 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วก๊าซ 0.05 เมตรต่อวินาที ความดันในถังปฏิกรณ์ 1.00 บาร์

จากกฎของเฮนรีและดาลตันและสมการการถ่ายเทมวล เราสามารถสร้างสมการทั่วไป เพื่อหาค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ได้ดังนี้

จากสมการ (2.5) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกฎของเฮนรีและดาลตัน

$$x_A^* = y_A P / H' = y_A / H' \cdot P$$

จากสมการ (2.17) แสดงการถ่ายเทมวล

$$dc/dt = K_L a (x_A^* - x_A)$$

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา dc/dt สามารถเขียนในรูป

$$\begin{aligned} dc/dt &= (x_A - x_0)/t \\ &= (x_A - x_0)/(V/Q) \\ &= Q/V (x_A - x_0) \\ Q/V (x_A - x_0) &= K_L a (y_A / H' \cdot P - x_A) \\ (Q/V + K_L a) x_A &= K_L a \cdot y_A / H' \cdot P + Q/V \cdot x_0 \\ x_A &= \frac{y_A / H' \cdot P}{(Q/V K_L a + 1)} + \frac{x_0}{(V \cdot K_L a + 1)} \end{aligned}$$

โดยที่

- x_A = ค่าสัดส่วนโมลออกซิเจนละลายน้ำของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์
- x_0 = ค่าออกซิเจนละลายน้ำของน้ำที่เข้าถังปฏิกรณ์
- y_A = สัดส่วนของโมลของออกซิเจนในอากาศ
- H' = ค่าคงที่ของเฮนรี
- $K_L a$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (20°C)
- Q = อัตราการสูบน้ำเข้าถังปฏิกรณ์
- P = ความดันภายในถังปฏิกรณ์ (absolute pressure)

จากค่าที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จริงจากการทดลอง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.39 ถึง 4.50 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

4.4 ประโยชน์ทางวิศวกรรม

ถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนสามารถประยุกต์นำไปใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมเพื่อการเติมออกซิเจนในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนสูง โครงสร้างและส่วนประกอบไม่ซับซ้อน ซ่อมแซมได้ง่าย สามารถติดตั้งบริเวณแหล่งน้ำธรรมชาติได้ โดยไม่มีส่วนที่กีดขวางลำน้ำหรือทางสัญจร ในระหว่างการทำงานไม่เกิดละอองไอหรือเสียงดังเหมือนกับเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ไม่มีชิ้นส่วนหรือท่อใต้น้ำที่ยากต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาเหมือนกับระบบเป่าอากาศใต้น้ำ มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง สามารถสร้างค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ต้องการให้ออกจากถังปฏิกรณ์ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพแหล่งน้ำต่าง ๆ