

**การศึกษาองค์ประกอบทางด้านไฮดรอดนามิก
ของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วน
Study on the Hydrodynamic Components
in the Split-typed Deep Shaft Reactor**

มณฑล ใจกุล และ อุณหิต พิณโสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-9987 โทรสาร 0-2326-9053 อีเมล kcmntho@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง (Deep Shaft Reactor) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียชนิดหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพที่นิยมใช้กันมาก ทั้งนี้เพราะระบบบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ใช้พื้นที่ตามแนวราบในการบำบัดน้ำเสีย น้อยที่สุด งานวิจัยที่นำเสนอได้ศึกษาถึงตัวแปรทางไฮดรอดนามิกที่มีผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วน (Split Type) โดยได้จำลองถึงของระบบบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ให้มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.5 เมตร และ 0.5 เมตรตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser โดยมีอัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศต่อความลึกของน้ำเท่ากับ 0.454, 0.606 และ 0.909 ตามลำดับ และทำการเปลี่ยนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer ที่มีอัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศต่อความลึกของน้ำเท่ากับ 0.303, 0.454, 0.606, 0.757 และ 0.909 ตามลำดับ พร้อมกับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดเท่ากับ 0.204, 0.346 และ 0.5 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราการพ่นอากาศในด้าน Riser ตำแหน่งการติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Riser ที่มีความลึกมากขึ้นและ พื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer ที่น้อยลงจะทำให้ฟองอากาศที่ถูกพ่นออกจากตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer มีการเคลื่อนที่ลงมาจากด้าน Downcomer มีค่ามากขึ้น ขณะที่อัตราการพ่นอากาศในด้าน Riser ที่มีค่าเหมาะสมและตำแหน่งการติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Riser ที่มีความลึกมากขึ้นจะทำให้ความเร็วของเหลวภายในถังมีค่าสูงขึ้นแต่ตำแหน่งของการติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer นั้นจะไม่มีผลกระทบต่อความเร็วของเหลวภายในถังเลยถ้าอัตราการพ่นอากาศในด้าน Downcomer มีค่าต่ำ สุดท้ายเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฮดรอดนามิกจากการทดลองและจากสมการสมดุลพลังงานพบว่า มีความสอดคล้องกัน

คำหลัก: กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ ระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วน และ ไฮดรอดนามิก

Abstract

Deep shaft reactor is one of the biological waste water treatments and very popular among users due to its requirement of minimal horizontal area for the installation. The study was done at variables of hydrodynamic which were influential in the split-typed deep shaft reactor. In the model tank of which the height and diameter are 3.5 meters and 0.5 meter respectively, the ratios of the depth of diffuser installed at the riser side to the water level were changed to be 0.454, 0.606 and 0.909; on the other hand, those ratios at the downcomer side were changed to be 0.303, 0.454, 0.606, 0.757 and 0.909. Furthermore, the ratios of the cross sectional area of the downcomer side to that of the tank were adjusted to be 0.204, 0.346 and 0.5 respectively. From the experiment, it was found that the increase of air diffused at the riser side, the deeper position of the diffuser installed at the riser side and the decrease of cross sectional area of the downcomer side all made more air bubbles from the diffuser at the downcomer side move downward. Meanwhile, the optimum air flow rate at the riser side and the deeper position of the diffuser installed at the riser side caused liquid velocity inside the tank to rise, but the position of the diffuser at the downcomer side had little effect to liquid velocity in case the air flow rate at the downcomer side was low. In comparison, the hydrodynamic variables from the experiment and mathematic model are harmonious.

Keywords: Biological waste water treatments, Split-typed Deep Shaft Reactor and hydrodynamics.

1. บทนำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานบำบัดน้ำเสีย เพราะเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ ระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วน (Split Type) ถือเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้พื้นที่ตามแนวราบน้อย โดยจะใช้ถังเติมอากาศที่มีความลึกประมาณ 60 ถึง 150 เมตร และภายในถังเติมอากาศนี้จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่น้ำไหลขึ้น (Upflow Section) และ ส่วนที่น้ำไหลลง (Downflow Section) จึงทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำภายในถังอันเกิดมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลด้าน Upflow และ Downflow Section ซึ่งจากข้อความข้างต้นทำให้ระยะเวลาที่ฟองอากาศสัมผัสกับน้ำเสียภายในถังของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งมีระยะเวลานานขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ตามแนวราบมากและเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่ถูกติดตั้งในพื้นที่ที่มีราคาแพง[1] ในอดีตมีงานวิจัยเรื่องระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง อาทิ เช่น มณฑล ใจ กุศล[2] ได้ศึกษา การถ่ายเทออกซิเจนในเครื่องบำบัดน้ำ

เสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบ Concentric draught-tube ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองถึงบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบ Concentric draught-tube ผลการวิจัย พบว่าค่าเศษส่วนช่องว่างจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการถ่ายเทมวลของก๊าซออกซิเจนกับของเหลว แต่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของของเหลวจริง โดยเฉพาะที่กำลังงานที่สูง Weiland, P. และ Onken, U.[3] ได้ศึกษาผลกระทบของความหนืดของของเหลวที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบ Rectangular internal-loop ผลการวิจัย พบว่า ความหนืดของของเหลวมีผลกระทบต่อค่าเศษส่วนช่องว่างและความเร็วของของเหลว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการที่ใช้กับงานวิจัยนี้มี 2 ส่วน คือ ส่วนแรกสมการพื้นฐานทางด้านไฮโดรไดนามิกของก๊าซกับของเหลว และ ส่วนที่สองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 สมการพื้นฐานทางด้านไฮโดรไดนามิกของก๊าซกับของเหลว

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าไฮโดรไดนามิคในระบบ บำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งมีหลายตัว[2] เช่น เศษส่วนช่องว่างอากาศทั้งหมด (ε) ความลึกของของเหลว (h_L) และความเร็วของของไหล (V) โดยค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศทั้งหมดก็คือ อัตราส่วนของปริมาตรอากาศต่อ ปริมาตรของไหลทั้งหมดซึ่งแทนด้วยสมการ

$$\varepsilon = \frac{V_G}{(V_G + V_L)} \quad (1)$$

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง เศษส่วนช่องว่างอากาศจะมี 2 ด้านคือ เศษส่วนช่องว่างอากาศทางด้าน Riser (ε_r) และเศษส่วนช่องว่างอากาศทางด้าน Downcomer (ε_d) ซึ่งสมการเศษส่วนช่องว่างอากาศทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับเศษส่วนช่องว่างอากาศทางด้าน Riser และด้าน Downcomer มีดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r A_r + \varepsilon_d A_d}{(A_r + A_d)} \quad (2)$$

นอกจากนั้นปริมาตรของก๊าซในของเหลว หรือ เศษส่วนช่องว่างอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง จะมีค่ามากหรือค่าน้อยจะขึ้นอยู่กับความลึกที่ก๊าซเคลื่อนที่ ด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์ของปริมาตรของอากาศกับความลึกดังนี้

$$\frac{\varepsilon(h)}{\varepsilon(h=0)} = \frac{P_{atm}}{(P_{atm} + \rho_L gh)} \quad (3)$$

สุดท้ายการหมุนเวียนของของเหลวทางด้าน Riser และด้าน Downcomer ของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งจะมีสมการความสัมพันธ์ทั้งสองด้านเป็น

$$U_{Lr} A_r = U_{Ld} A_d \quad (4)$$

ซึ่งในสภาวะจริงการไหลของของเหลวทั้งสองด้านจะเกิด ฟองอากาศขึ้นภายใน ดังนั้นความเร็วของเหลวจริง (True Linear Liquid Velocity) แต่ละด้านจึงมีสมการเป็น

$$V_{Lr} = \frac{U_{Lr}}{(1 - \varepsilon_r)} \quad \text{สำหรับด้านRiser} \quad (5)$$

และ

$$V_{Ld} = \frac{U_{Ld}}{(1 - \varepsilon_d)} \quad \text{สำหรับด้านDowncomer} \quad (6)$$

2.2 สมการคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้ง

สมมติฐานที่ใช้กับสมการคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งมีรายละเอียดดังนี้[4]

1. ของไหลมีการไหลเป็นแบบสภาวะคงที่
2. อุณหภูมิของของไหลคงที่
3. การไหลสม่ำเสมอในพื้นที่หน้าตัดแต่ละด้าน
4. ความหนาแน่นคงที่
5. ของเหลวมีพฤติกรรมแบบ Newtonian

ของไหลเกิดการไหลวนอยู่ภายในด้าน Riser และ Downcomer ของระบบบำบัดน้ำเสียนี้ได้ก็เนื่องมาจากกำลังงานที่ได้จากการขยายตัวของก๊าซและกำลังงานจากพลังงานจลน์ที่ตัวพ่นอากาศซึ่งแสดงดังสมการ (7) โดยปกติแล้วพลังงานจลน์ที่ตัวพ่นอากาศมีค่าไม่เกิน 5% ของกำลังงานที่ใส่ทั้งหมด

$$\text{กำลังงานที่ใส่} = E_i = Q_m RT \ln \left(1 + \frac{\rho_L gh_L}{P_{atm}} \right) \quad (7)$$

จากสมการสมดุลพลังงาน

กำลังงานที่ใส่ = กำลังงานที่สูญเสียรวม

$$E_i = E_R + E_D + E_B + E_T + E_F + E_S \quad (8)$$

เมื่อ

E_R = พลังงานสูญเสียเนื่องจากการกระจายคลื่นของฟองอากาศในของเหลวทางด้าน Riser

$$= E_i + \Sigma(1 - \varepsilon_r) \rho_L g \Delta h_L U_{Lr} A_r + \rho_L gh_L U_{Lr} A_r \quad (9)$$

E_D = พลังงานสูญเสียเนื่องจากการกระจายคลื่นของฟองอากาศในของเหลวทางด้าน Downcomer

$$= -\Sigma(1 - \varepsilon_d) \rho_L g \Delta h_L U_{Ld} A_d + \rho_L gh_L U_{Ld} A_d \quad (10)$$

$E_B + E_T$ = พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของของไหลตรงบริเวณช่วงล่างและช่วงบน

$$= \frac{K_B \rho_L U_{Lr}^3 A_r^3}{2(1 - \varepsilon_d)^2 A_d^2}, \quad K_B = 11.4 \left(\frac{A_d}{A_b} \right)^{0.79} \quad (11)$$

$$E_F = \text{พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานเมื่อของไหลไหลผ่านพื้นผิวทางด้าน Riser และด้าน Downcomer}$$

$$= A_r U_r \Delta P_{Fr} + A_d U_d \Delta P_{Fd} \quad (12)$$

และ

$$E_S = \text{พลังงานสูญเสียเนื่องจากของไหลไหลผ่านตัวพ่นแต่ละด้าน}$$

$$= \frac{1}{2} C_S \rho_L V_L^3 A(1-\varepsilon), C_S = 11.4 \left(\frac{A_B}{A_F} \right)^{0.79} \quad (13)$$

3. การทดลอง

3.1 ชุดอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ตัวถังจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วนที่ใช้ทดสอบนั้นจะมีความสูง 3.5 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร ซึ่งขนาดตัวถังจำลองที่ใช้ทดสอบต้องไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรไฮโดรไดนามิก[5] ภายในถังจำลองจะติดตั้งแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความสูง 3.1 เมตรไว้เพื่อแบ่งเป็นสองส่วน คือ ด้าน Riser และด้าน Downcomer โดยมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer กับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เท่ากับ 0.204, 0.346 และ 0.5 ตามลำดับ ขณะที่ตัวพ่นอากาศตรงด้าน Riser และด้าน Downcomer ภายในถังจำลองมีลักษณะเป็นซี่ก้างปลาและเจาะรูเล็กขนาด 1.5 มิลลิเมตรอยู่บนซี่ก้างปลา โดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Riser ที่ความลึก 1.5, 2 และ 3 เมตร ตามลำดับ และติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer ที่ความลึก 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เมตร ตามลำดับ

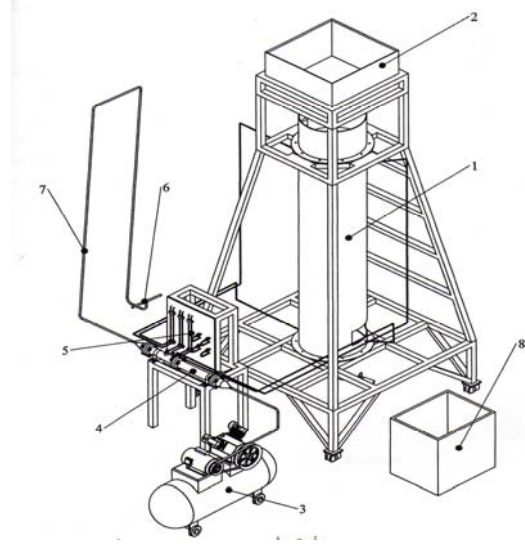
สำหรับรูปที่ 2 เป็นการแสดงรายละเอียดของความลึกในการติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Riser, h_r และด้าน Downcomer, h_d ของถังทดลองพร้อมทั้งรายละเอียดของพื้นที่หน้าตัดด้าน Riser, A_r และด้าน Downcomer, A_d

3.2 การวัดข้อมูล

3.2.1 การวัดค่าความเร็วของเหลวจริง (True Linear Liquid Velocity) จะใช้วิธีวัดแบบ Tracer Method[4] ซึ่งเป็นวิธีที่วัดค่าความเร็วค่อนข้างแม่นยำสูง

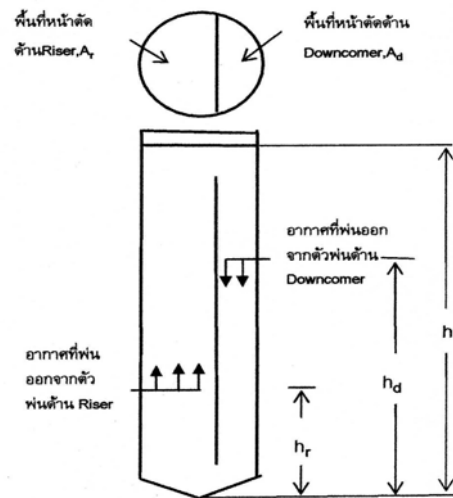
3.2.2 การวัดค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศ(ε) จะใช้เทคนิคการวัดแบบ U – Tube Manometer[2] โดยมีสมการสำหรับการหาค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศดังนี้

$$\varepsilon = \left(\frac{\rho_M - \rho_L}{\rho_L - \rho_G} \right) \frac{dh_M}{dz} \quad (14)$$



1. ถังจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียเติมอากาศตามแนวตั้งแบบแยกส่วน
2. ถังพักน้ำ 3. เครื่องอัดอากาศ 4. Venturi Meter 5. มานอมิเตอร์
6. ตัวพ่นอากาศ 7. สายส่งอากาศ 8. ถังรับน้ำ

รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

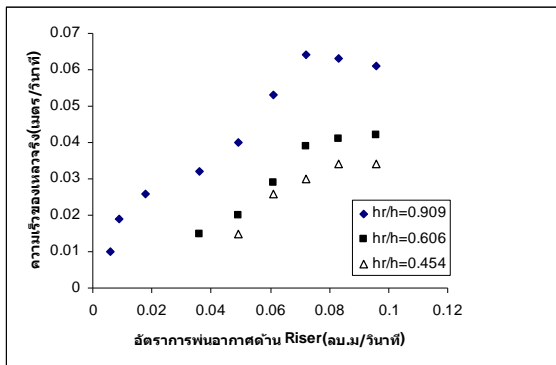


รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของถังทดลอง

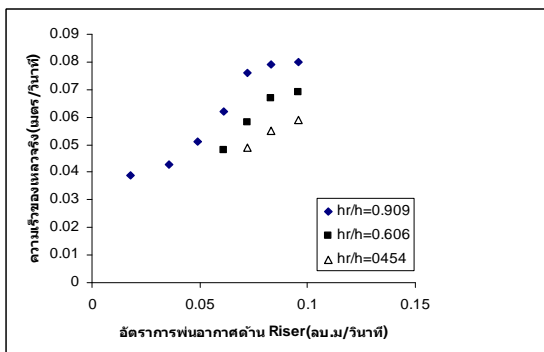
สำหรับขั้นตอนในการทดลองของงานวิจัยนี้มีดังนี้ ช่วงเริ่มต้นจะทำการเปิดอากาศตรงตัวพ่นอากาศด้าน Riser ก่อนเพื่อให้ น้ำในถังเกิดการไหลวนของของไหลระหว่างด้าน Riser กับด้าน Downcomer จนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ จึงค่อยเปิดอากาศตรงตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer หลังจากนั้นถึงทำการจดบันทึกการไหลวนของของไหลและค่าไฮโดรไดนามิกต่างๆ

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟของรูปที่ 4a และ 4b ในกรณีที่อัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer, ($Q_{air,d}$) เท่ากับ $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$ และอัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer ต่อความลึกของของเหลว (h_d/h) เท่ากับ 0.606 พบว่า เมื่ออัตราการพ่นอากาศด้าน Riser, ($Q_{air,r}$) มีค่ามากขึ้น แนวโน้มของค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser, (V_{Lr}) มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะจำนวนฟองอากาศที่มากขึ้นจะไปดันของเหลวให้มีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการพ่นอากาศมากเกินไปจะทำให้ค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser เริ่มมีค่าคงที่และจะเริ่มลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะ จำนวนของปริมาตรฟองอากาศที่มากขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของของเหลวนั่นเอง และจากกราฟทั้งหมดดังกล่าว อัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser ต่อความลึกของของเหลวยังมีค่ามากยิ่งขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser สูงขึ้นด้วย

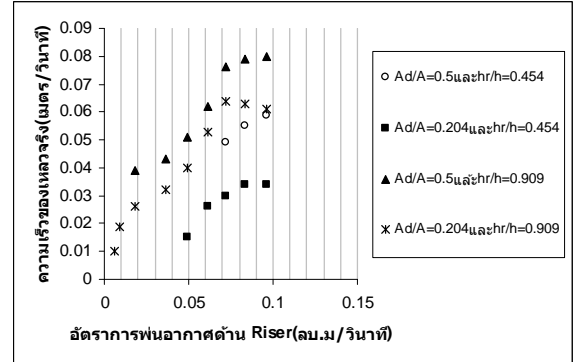


รูปที่ 4a กรณีที่อัตราส่วนพื้นที่ A_d/A เท่ากับ 0.204



รูปที่ 4b กรณีที่อัตราส่วนพื้นที่ A_d/A เท่ากับ 0.5

รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{Lr} กับ $Q_{air,r}$ เมื่อ h_d/h เท่ากับ 0.606 และ $Q_{air,d}$ เท่ากับ $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$

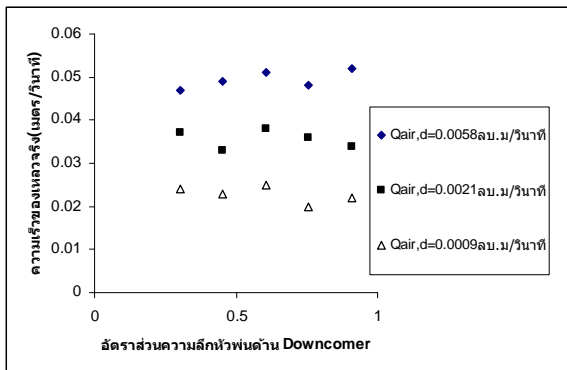


รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{Lr} กับ $Q_{air,r}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่ A_d/A และอัตราส่วน ระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser h_r/h

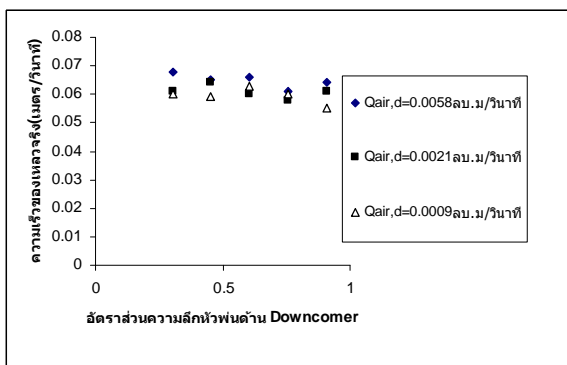
กราฟรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser, (V_{Lr}) กับ อัตราการพ่นอากาศด้าน Riser, ($Q_{air,r}$) เมื่ออัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer ต่อความลึกของของเหลว (h_d/h) เท่ากับ 0.606 และอัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer, ($Q_{air,d}$) เท่ากับ $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่า อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด, (A_d/A) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser มีค่าสูงขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดด้าน Riser ที่น้อยลงจะทำให้ความเร็วของเหลวด้าน Riser มีค่าสูงขึ้นแต่จะทำให้ฟองอากาศที่ถูกพ่นออกจากตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer มีการเคลื่อนที่ลงมา มีค่าน้อยลงด้วย

พิจารณารูปที่ 6a และ 6b ในกรณีที่อัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer, ($Q_{air,d}$) มีค่าคงที่และอัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer ต่อความลึกของของเหลว (h_d/h) มีค่าไม่น้อยไป พบว่า แนวโน้มของค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser, (V_{Lr}) ค่อนข้างมีแนวโน้มคงที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer ต่อความลึกของของเหลว

โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser ต่อความลึกของของเหลว (h_r/h) เท่ากับ 0.909 ดังรูปที่ 6b ซึ่งจากกราฟดังกล่าวเป็นการแสดงว่า การติดตั้งตัวพ่นอากาศด้าน Riser ที่ลึกขึ้นจะมีผลกระทบต่อค่าความเร็วของเหลวจริงด้าน Riser มากกว่าระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Downcomer และอัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer



รูปที่ 6a กรณีที่อัตราส่วนความลึกหัวพ่นด้าน Riser เท่ากับ 0.454



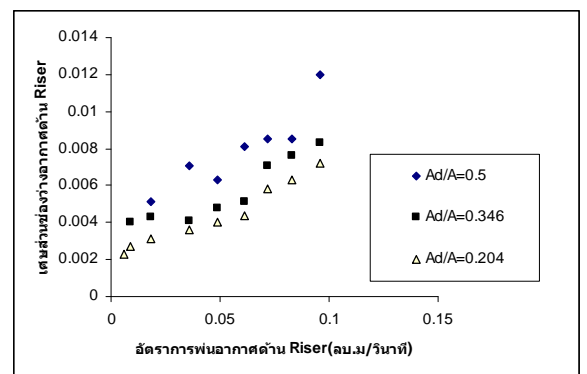
รูปที่ 6b กรณีที่อัตราส่วนความลึกหัวพ่นด้าน Riser เท่ากับ 0.909

รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{Lr} กับ h_d/h เมื่อ A_d/A เท่ากับ 0.204 และ $Q_{air,r}$ เท่ากับ $0.096 \text{ m}^3/\text{s}$

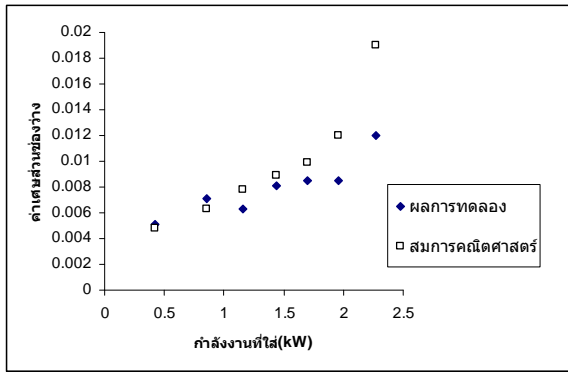
ต่อไปเป็นการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศทางด้าน Riser, (ϵ_r) กับอัตราการพ่นอากาศด้าน Riser, ($Q_{air,r}$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer, (A_d/A) สำหรับกรณีที่อัตราส่วนระยะความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser

และด้าน Downcomer ต่อความลึกของของเหลว, เท่ากับ 0.909 ทั้งสองด้าน โดยมี อัตราการพ่นอากาศด้าน Downcomer, ($Q_{air,d}$) เท่ากับ $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังรูปที่ 7 พบว่า ที่อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer มีค่าคงที่นั้น อัตราการพ่นอากาศทางด้าน Riser จะมีผลกระทบต่อค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศทางด้าน Riser ด้วย กล่าวคือ อัตราการพ่นอากาศยังมีค่ามากจะทำให้ค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศมีค่ามากตาม และเมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer มีค่ามาก ยิ่งทำให้ค่าเศษส่วนช่องว่างอากาศทางมีค่ามากขึ้นอีกตามสมการที่ (1)

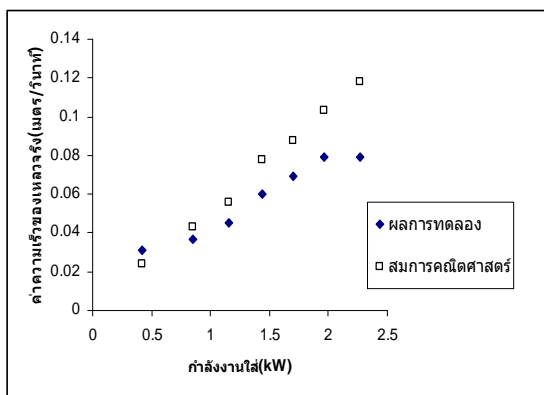
สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบค่าเศษส่วนช่องว่างทางด้าน Riser, (ϵ_r) และค่าความเร็วของเหลวจริงทางด้าน Riser, (V_{Lr}) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการคณิตศาสตร์ เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ด้าน Downcomer, (A_d/A) เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser, (h_r/h) เท่ากับ 0.909 พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณทั้งสองตัวแปรมีค่าใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันโดยเฉพาะกำลังงานที่ใส่มีค่าไม่สูงนักดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_r กับ $Q_{air,r}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่ A_d/A โดยมี $Q_{air,d}$ เท่ากับ $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$



รูปที่ 8a ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษส่วนช่องว่าง กับกำลังงานที่ใช้ของสมการคณิตศาสตร์และการทดลอง



รูปที่ 8b ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของเหลวจริง กับกำลังงานที่ใช้ของสมการคณิตศาสตร์และการทดลอง

5. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่ด้าน Downcomer อัตราส่วนความลึกของตัวพ่นอากาศด้าน Riser และด้าน Downcomer และอัตราการพ่นอากาศของตัวพ่นด้าน Riser และด้าน Downcomer สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการพ่นอากาศของตัวพ่นด้าน Riser และอัตราส่วนพื้นที่ด้าน Downcomer มีผลกระทบต่อความเร็วของเหลว
2. อัตราการพ่นอากาศของตัวพ่นด้าน Riser ที่มากเกินไปจะทำให้ความเร็วของเหลวที่ไหลวนมีค่าน้อยลง
3. ในกรณีที่อัตราการพ่นอากาศของตัวพ่นด้าน Downcomer มีค่าน้อย ความลึกของตัวพ่นอากาศ

ด้าน Downcomer มีผลกระทบต่อความเร็วของเหลวน้อยมาก

4. อัตราส่วนพื้นที่ด้าน Downcomer ที่มีค่าน้อยลงจะทำให้ฟองอากาศที่ถูกพ่นทางด้าน Downcomer มีโอกาสเคลื่อนที่ลงมาได้มากขึ้น

6. สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของถัง
A_B	พื้นที่หน้าตัดของตัวพ่น
A_d	พื้นที่หน้าตัดด้าน Downcomer
A_F	พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างที่ของเหลวไหลผ่านตัวพ่น
A_r	พื้นที่หน้าตัดด้าน Riser
A_b	พื้นที่หน้าตัดทางเข้าด้าน Riser
g	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
h	ความลึกของของไหล
h_d	ความลึกที่ติดตั้งตัวพ่นที่ด้าน Downcomer
h_L	ความลึกของของเหลว
h_r	ความลึกที่ติดตั้งตัวพ่นที่ด้าน Riser
Δh_L	ช่วงช่องว่างระยะทางของของเหลว
ΔP_{Fd}	Pressure Drop ด้าน Downcomer
ΔP_{Fr}	Pressure Drop ด้าน Riser
Q_m	อัตราการพ่นอากาศของหัวพ่น
T	อุณหภูมิของอากาศ
U_{Ld}	Superficial Liquid Velocity ด้าน Downcomer
U_{Lr}	Superficial Liquid Velocity ด้าน Riser
V_L	ปริมาตรของของเหลว
V_G	ปริมาตรของอากาศ
V_{Ld}	True Linear Liquid Velocity ด้าน Downcomer
V_{Lr}	True Linear Liquid Velocity ด้าน Riser
ρ_G	ความหนาแน่นของอากาศ
ρ_L	ความหนาแน่นของของเหลว

ρ_M	ความหนาแน่นของสารในท่อ Manometer
ε_d	เศษส่วนช่องว่างของอากาศด้าน Downcomer
ε_r	เศษส่วนช่องว่างของอากาศด้าน Riser

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 2, มิตรนราการพิมพ์, 2542.
- [2] มณฑล ใจกุล, การศึกษาการถ่ายเทออกซิเจนในเครื่องบำบัดน้ำเสียแบบ Deep Shaft, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ปราจีนบุรี, หน้า 272 – 277.
- [3] Weiland, P. และ Onken, U., "Differences in the Behavior of Bubble Columns and Rectangular internal-loop Reactor", Ger. Chem. Eng, Vol 4, 1981.
- [4] Chisti, M.T., Airlift Bioreactor, Elsevier Science Publishers LTD, 1989.
- [5] Hirose, T., and Moo-Young, M., "Bubble drag and mass transfer in non-Newtonian fluids: Creeping flow with power law fluids", Can. J. Chem. Eng., 47, pp 265 – 267.