

การศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่คอคอดและตำแหน่งรูอากาศ
ต่ออัตราการดูดอากาศของหัวฉีดเติมอากาศแบบเหนี่ยวนำ
The Effects of Throat area ratio and Air Hole Position on
The Induced Nozzle Air Suction Rate

ลลอง ฝโลตม¹ และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์^{2*}

¹ สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร
จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร
จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10900

*ติดต่อ: taweedej.s@ku.ac.th, โทร 02-942-8555 ต่อ 1832

บทคัดย่อ

หัวฉีดเติมอากาศแบบเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมน้ำและอากาศเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยอาศัยหลักการเวนจูรี ขนาดและสัดส่วนของหัวฉีดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวฉีด งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนของขนาดพื้นที่หน้าตัดคอคอดต่อขนาดความยาวคอคอด (r_{th}) และตำแหน่งของรูอากาศต่ออัตราการดูดอากาศ โดยการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม (Computational Fluid Dynamics, CFD) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดที่ทำการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ 0.25, 0.30 และ 0.35 และกำหนดตำแหน่งรูอากาศ ณ บริเวณต้น กลาง ปลายคอคอด และต้น diffuser โดยที่คอคอดมีความยาว 10 มิลลิเมตรเท่ากันหมด พบว่า ตำแหน่งของรูอากาศที่ให้อัตราการดูดของอากาศสูงสุดคือบริเวณต้น diffuser อัตราการดูดอากาศสูงสุดเกิดขึ้นกับหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 0.25

คำหลัก: หัวฉีดเติมอากาศแบบเหนี่ยวนำ; การเติมอากาศ; CFD

Abstract

The induced nozzle is the equipment used in the aeration process for the waste-water treatment system. It employs the venturi principle to mix air and water together. Size and shape of the nozzle are the important factors that influence its efficiency. This research studies the effects of throat area ratio (r_{th}) and the air hole position on the nozzle air suction rate by utilizing the computational Fluid Dynamic software (CFD). The nozzles were modeled in three of the throat area ratios: 0.25, 0.30 and 0.35 and four air inlet positions: front, middle and rear position of the throat length and the beginning of the diffuser. The throat length is in equal size of 10 mm. It was found that the nozzles with the air inlet at the beginning of the diffuser gives better performance compare to the ones with the other position of air inlets. The maximum air suction rate occurs in the nozzle which the air inlet positions at the beginning of the diffuser and the throat area ratio is of 0.25.

CST-193

Keywords: Induced nozzle; Aeration; CFD; Microbubble

1. บทนำ

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) เป็นดัชนีอย่างหนึ่งที่สามารถใช้วัดคุณภาพน้ำ น้ำเสียนั้นมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ การเติมอากาศเป็นกระบวนการอย่างหนึ่งในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายให้กับน้ำได้โดยการสร้างฟองอากาศให้กระจายตัวในน้ำ การที่ออกซิเจนละลายในน้ำเป็นการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนในฟองอากาศไปสู่ในน้ำโดยแพร่ผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำ ดังนั้นหากพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นปริมาณการละลายของออกซิเจนในน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วย

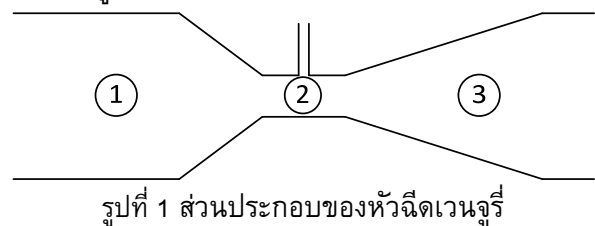
ไมโครบับเบิลเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าหลอดร้อยไมโครเมตร[1] และด้วยขนาดที่เล็กมากนี้ไมโครบับเบิลสามารถกระจายตัวในน้ำได้อย่างหนาแน่น มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำแลฟองอากาศสูง ทำให้อัตราการละลายของออกซิเจนในน้ำสูงกว่าฟองอากาศขนาดปกติ มีการพัฒนาอุปกรณ์ในการสร้างไมโครบับเบิลสำหรับระบบเติมอากาศมีหลายชนิด เช่น

1. Sadatomi [2] สร้างหัวฉีดที่มีทรงกลมบรรจุอยู่ภายใน เมื่อน้ำไหลผ่านทรงกลมความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้นและความดันลดลง อากาศจึงถูกเหวี่ยงเข้าสู่อัตราหัวฉีดโดยอัตโนมัติ
2. หัวฉีดแบบ Spiral liquid flow ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง[3] น้ำถูกปั๊มให้ไหลวน (Swirl) ในหัวฉีดทำให้เกิดความดันต่ำบริเวณกึ่งกลางของหัวฉีด อากาศถูกดูดเข้าสู่หัวฉีด ณ บริเวณนี้ ไมโครบับเบิลเกิดจากการเฉือนกันของชั้นน้ำ (Shearing effect) ทำให้ฟองอากาศถูกย่อยให้เล็กลง
3. หัวฉีดแบบอีเจกเตอร์อาศัยหลักการหัวฉีดวนจูลี ในการสร้างไมโครบับเบิลเช่นกัน Liu [4] สร้างชุดอุปกรณ์ Cyclone-static

microbubble flotation column โดยใช้หัวฉีดแบบอีเจกเตอร์

4. Sadatomi และ Kawahara [1] ปรับปรุงหัวฉีดจากเดิม [2] โดยให้น้ำไหลผ่าน Orifice เพื่อเพิ่มความเร็วและลดความดัน อากาศถูกดูดเข้าสู่หัวฉีดผ่านรูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดไมโครบับเบิล
5. หัวฉีดแบบเวนจูลี ทำงานโดยน้ำไหลผ่านคอขวดของหัวฉีด ความเร็วในการไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้นและความดันน้ำ ณ บริเวณนี้ลดลงจนเกิดแรงดูดเหวี่ยงน้ำอากาศเข้าผสมกับน้ำผ่านทางรูอากาศ เนื่องจากการลดลงของความดัน แควิเทชัน (Cavitation) ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดไมโครบับเบิล

การใช้หลักการไหลในท่อเวนจูลี มาประยุกต์ใช้กับหัวฉีดเติมอากาศนั้นเป็นวิธีซึ่งให้ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากอาศัยความแตกต่างระหว่างความดันที่ทางเข้าและทางออกแค่ 20% เท่านั้นก็ทำให้เกิดการเหวี่ยงน้ำขึ้นได้ [5] พลังงานที่ใช้จึงมีเพียงพลังงานในการปั๊มน้ำเท่านั้น หัวฉีดเวนจูลีประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ 1) Water inlet และ Converging section, 2) Throat section และ Air inlet และ 3) Diverging section และ Diffuser ส่วนประกอบของหัวฉีดเวนจูลีแสดงในรูปที่ 1



มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของหัวฉีดในด้านการดูดอากาศและการสร้างฟองอากาศด้วย CFD เนื่องจากความสามารถในการจำลองสถานการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Li et al. [6] ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดคอคอดต่อพื้นที่หน้าตัด nozzle ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนโดยปริมาตร

CST-193

ของอากาศที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดตั้งกล่าวสามารถดูดอากาศได้มากขึ้นไปจนถึงค่าหนึ่ง หลังจากนั้นการดูดอากาศจะลดลง Kim et al. [7] ทำการศึกษาผลของอัตราไหลของน้ำต่ออัตราการดูดอากาศ Yadav et al. [8] ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Suction chamber และ Converging angle ต่อการดูดอากาศ งานวิจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นเพียงการศึกษาหรือออกแบบหัวฉีดโดยทั่วไปไม่ใช่หัวฉีดเพื่อสร้างไมโครบับเบิล

การศึกษาวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์สร้างไมโครบับเบิลไม่มีการเผยแพร่ในวงกว้างนัก งานวิจัยที่มีการเผยแพร่อย่างกว้างขวางเป็นการทำการศึกษาวิจัยในด้านการใช้ประโยชน์จากไมโครบับเบิลเท่านั้น ส่วนการพัฒนาอุปกรณ์นั้นส่วนใหญ่เป็นการจดสิทธิบัตรซึ่งไม่เสนอผลรายงานทางการวิจัยเนื่องจากเหตุผลทางการค้า ดังนั้นการการศึกษาขั้นพื้นฐานเพื่อการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เพื่อสร้างไมโครบับเบิลจึงมีความจำเป็น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่คอคอดและตำแหน่งของ Air inlet ที่ส่งผลต่ออัตราการดูดอากาศของหัวฉีดแบบเวนจูร์ด้วยการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม (Computational fluid dynamics, CFD) โดยปกติแล้วอากาศถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่หัวฉีดบริเวณกึ่งกลาง Throat section ซึ่งน้ำมีความเร็วสูงสุดและมีความดันต่ำสุดแต่อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่ให้อัตราการดูดอากาศสูงสุด เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบหัวฉีดเติมอากาศสำหรับสร้างไมโครบับเบิลในระบบเติมอากาศขนาดเล็ก

2. การประยุกต์ใช้ CFD

2.1 Model

การจำลองการไหลของน้ำและอากาศที่เกิดขึ้นในหัวฉีดเหนี่ยวนำด้วย CFD นี้ เป็นการจำลองของของไหล 2 สถานะ (Two-phase flow) โดยใช้ $k-\epsilon$ turbulent model ในการวิเคราะห์การไหลของของไหลสองชนิดที่ผสมกันในจำลองครั้งนี้ กำหนดให้น้ำไหลผ่านเข้าทาง Water inlet และเป็น Primary phase

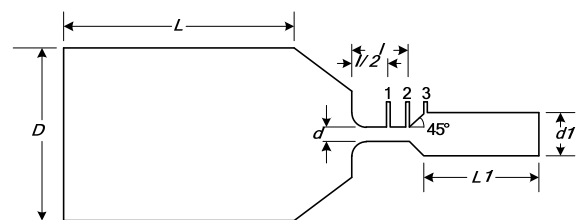
อากาศไหลเข้าทาง Air inlet เป็น Secondary phase ที่มีขนาดพองเริ่มต้น 1 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของพองอากาศเริ่มต้นนั้นไม่ส่งผลต่อการคำนวณหาอัตราการดูดอากาศ []

โมเดลที่ใช้จำลองเป็นแบบ 3D และใช้เอลิเมนต์แบบ Tetrahedral และทำการขนาดเอลิเมนต์ของโมเดลออกเป็น 3 ขนาด คือ หยาบ ปานกลาง และละเอียดเพื่อเปรียบเทียบผล โดยพบว่าขนาดของเอลิเมนต์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการคำนวณจึงเลือกเอลิเมนต์แบบละเอียดมาใช้ในการจำลองเพื่อความแม่นยำมากที่สุด ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด (r_{rh}) เป็น 3 ขนาดคือ 0.25, 0.30 และ 0.35 ค่า r_{rh} คำนวณได้จากสมการ

$$r_{rh} = \frac{d}{l} \quad (1)$$

โดยที่ d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด และ l คือความยาวคอคอด

กำหนดบริเวณทางเข้าของอากาศ 3 ตำแหน่งแตกต่างกันไปโดยวัดจาก Converging section คือ (1) ที่ระยะ $l/2$ (2) ที่ระยะ l และ (3) ที่จุดเริ่มต้นของ Diffuser รูปที่ 2 แสดงสัดส่วนภายในหัวฉีด เส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศมีขนาด 1 มิลลิเมตร และคอคอดมีความยาวเท่ากันทุกโมเดล



รูปที่ 2 สัดส่วนภายในหัวฉีด

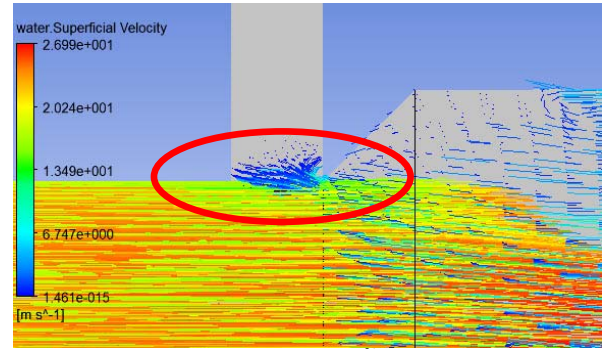
2.2 Boundary Conditions

Boundary condition ที่กำหนดให้แก่โมเดลมีรายละเอียดดังนี้

- Velocity inlet ที่ทางเข้าของน้ำ โดยกำหนดให้ความเร็วของน้ำที่ Water inlet เท่ากับ 0.165 เมตรต่อวินาที

CST-193

- Opening pressure ที่ทางเข้ารูอากาศ หมายถึงอากาศมีทิศทางการไหลเข้าหรือออก ก็ได้ โดยมีความดัน 0 Pa
- Pressure outlet ที่ทางออกของหัวฉีด ซึ่งค่าความดันที่ใช้เท่ากับค่าความดันของน้ำที่ระดับลึก 65 เซนติเมตร
- No slip wall ใช้กับผนังด้านอื่น ๆ ของโมเดล



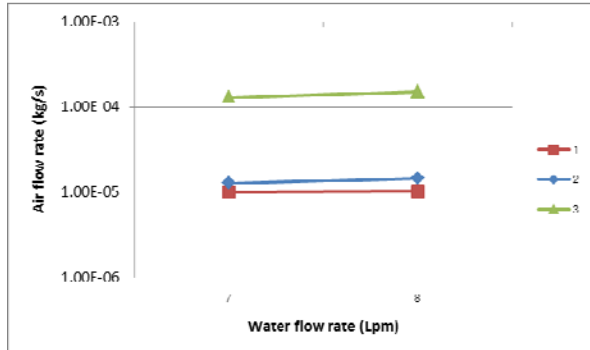
รูปที่ 4 เส้นทางการไหลของน้ำบริเวณ Air inlet

3. ผล

จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม CFD สามารถประเมินอัตราไหลของอากาศเข้าสู่หัวฉีดเติมอากาศได้

3.1 ผลของตำแหน่งรูอากาศ

ใช้โมเดลของอัตราส่วนคอคอด $r_{th} = 0.25$ ในการศึกษาผลของตำแหน่ง Air inlet ต่อการดูดอากาศ รูปที่ 3 แสดงอัตราการดูดอากาศของหัวฉีดที่มี Air inlet ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยอัตราไหลของน้ำเท่ากับ 7 และ 8 ลิตรต่อนาที

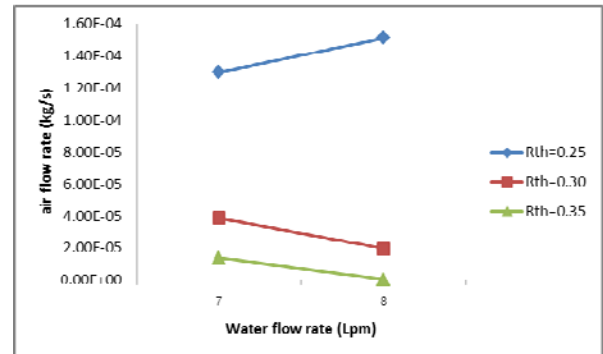


รูปที่ 3 อัตราการดูดอากาศของหัวฉีดที่ Air inlet ตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $r_{th}=0.25$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ Air inlet อยู่ ณ ตำแหน่งที่ 3 คือ บริเวณต้น Diffuser ให้อัตราการดูดอากาศสูงกว่า ตำแหน่งอื่น ๆ รูปที่ 4 แสดงเส้นทางการไหลของน้ำภายในหัวฉีดที่ Air inlet อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เกิดการกระเจิงของน้ำภายใน Air inlet ทำให้อากาศแทรกเข้ามาได้น้อย

3.2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดคอคอด

รูปที่ 5 แสดงผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดคอคอด ต่ออัตราการดูดอากาศเมื่อตำแหน่ง Air inlet อยู่บริเวณต้น Diffuser (ตำแหน่งที่ 3)



รูปที่ 5 อัตราการดูดอากาศเมื่อ Air inlet อยู่บริเวณต้น Diffuser

ตารางที่ 1 อัตราการดูดอากาศของหัวฉีดขนาดต่าง ๆ

Q_w	ตำแหน่งรูอากาศ		
	1	2	3
$r_{th} = 0.25$			
7 lpm	1.000×10^{-5}	1.267×10^{-5}	1.299×10^{-4}
8 lpm	1.025×10^{-5}	1.438×10^{-5}	1.514×10^{-4}
$r_{th} = 0.30$			
7 lpm	8.399×10^{-6}	8.004×10^{-6}	3.894×10^{-5}
8 lpm	1.056×10^{-5}	1.145×10^{-5}	1.949×10^{-5}
$r_{th} = 0.35$			
7 lpm	6.073×10^{-6}	2.625×10^{-6}	1.398×10^{-5}
8 lpm	7.839×10^{-6}	5.773×10^{-6}	3.178×10^{-7}

CST-193

จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อ Air inlet อยู่ ณ ตำแหน่งที่ 3 ของหัวฉีดทุกค่าของอัตราส่วนหน้าตัด คอคอดให้อัตราการดูดอากาศสูงกว่าเมื่อ Air inlet อยู่ บริเวณอื่น ๆ

4. สรุป

จากผลการจำลองการไหลและผสมกันของน้ำและอากาศที่เกิดขึ้นในหัวฉีดเติมอากาศแบบเหนียวนำ ด้วยซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรมของเพื่อศึกษาถึงผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดคอคอดและตำแหน่งของรูอากาศต่ออัตราการดูดอากาศ พบว่าตำแหน่งรูอากาศที่อยู่บริเวณต้น Diffuser ให้อัตราการดูดอากาศดีกว่า บริเวณอื่น และขนาดอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดเท่ากับ 0.25 ให้อัตราการดูดอากาศดีที่สุดในการศึกษานี้ และเมื่อเพิ่มอัตราไหลของน้ำไม่จำเป็นที่จะทำให้อัตราการดูดอากาศเพิ่มขึ้นด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M. and Noguchi M. (2009). Prediction of micro-bubble dissolution characteristic in water and seawater, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 33, pp. 883-894.
- [2] Sadatomi, M. (2003). Microbubble producing apparatus, *Japanese Patent*, JP.30549. A. 28.
- [3] Ohnari, H. (2007). Swirling type microbubble generating system, USA patent:7261283, 200708-28.
- [4] Liu, J.T. (2000). Cyclonic-static micro bubble flotation apparatus & method. USA patent:6073775, 2000.03.13.

[5] Ozkan, F., Ozturk, M. and Baylar, A. (2006). Experimental investigations of air and liquid injection by venture tubes, *Water and Environment Journal*, vol. 20, pp. 114-122.

[6] Li, L., Liu, J.T., Wang, L. and Yu, H. (2010). Numerical simulation of a self-absorbing microbubble generator for a cyclone-static microbubble flotation column, *Mining Science and Technology*, vol. 20, pp. 88-92.

[7] Kim, M.I., Kim, O.S., Lee, D.H. and Kim, S.D. (2007). Numerical and experimental investigations of gas-liquid dispersion in an ejector, *Chemical Engineering Science*, vol. 62, pp. 7133-7193.

[8] Yadav, R.L. and Patwardhan, A.W. (2008). Design aspects of ejectors: effects of suction chamber geometry, *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 3886-3897.