# การผสมสารภายในถังแบบติดตั้งหัวฉีดด้านบน

# The Mixing Operation of Upper-Jet Mixing Tank

มณฑล ใจกุศล และ จำลอง ปราบแก้ว
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-9987 โทรสาร 0-2326-9053 อีเมล์ kpchamlo@kmitl.ac.th

Monton Jaikuson and Chamlong Prabkeao
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel: 0-2326-9987, Fax: 0-2326-9053, E-mail: kpchamlo@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

ถังผสมแบบหัวฉีด (Jet Mixing Tank) เป็นถังผสมของเหลวสองชนิดเข้าด้วยกัน โดยมีการฉีดของเหลวชนิดหนึ่งลงไปในถังผสมที่มีของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งถังผสมแบบหัวฉีดนิยมใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของมุมของหัวฉีด อัตราการไหลของของเหลวที่ถูกฉีด และความหนืดของของเหลวที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีดที่มีผลต่อเวลาของการผสมของของเหลวทั้งสองชนิด โดยทำการสร้างชุดจำลองของถังผสมแบบหัวฉีดและใช้ของเหลวที่ถูกฉีดที่มีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic ซึ่งมีความหนืดของของเหลวแตกต่างกัน(0.92 Pa.s,0.53 Pa.s และ 0.12 Pa.s) จากผลการวิจัยพบว่า มุมของหัวฉีดยิ่งมีค่ามาก ทำให้เวลาของการผสมที่สมบูรณ์มีระยะเวลาสั้นลง ในกรณีที่อัตราการไหลของของเหลวที่ถูกฉีดมีค่าคงที่และได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของของเหลวที่ถูกฉีด พบว่า ความหนืดของเหลวที่ถูกฉีดนั้นถ้ายิ่งมีค่าน้อยลง ยิ่งทำให้ระยะเวลาการผสมที่สมบูรณ์สั้นลง และยังพบว่า กรณีดังกล่าวทำให้อิทธิพลของมุมของหัวฉีดที่เปลี่ยนไปนั้นมีผลกระทบต่อเวลาของการผสมที่สมบูรณ์ได้น้อยลง สุดท้ายในกรณีที่ใช้หัวฉีด 1 หัว และ 2 หัว ที่ความหนืดของของเหลวคงที่ จำนวนหัวฉีดมีผลกระทบต่อเวลาที่ผสมที่สมบูรณ์ถ้าใช้อัตราการฉีดมีค่าไม่มาก

**Abstract**

Jet Mixing Tank is the tank filled with the combination of two kinds of liquid in the operating way of injection one liquid into the tank in which the other liquid is available. The Jet Mixing Tank is well known as the common mixing tank for general industry. The objective of this research is to study the effect of the injectors in the different angles, the flow rate and the viscosity of the injected liquid on the mixing time. The study was done through the mixing tank model, and the liquid as Pseudoplastic, of which viscosity values are such different as 0.92 Pa.s,0.53 Pa.s and 0.12 Pa.s respectively, was used to be injected into the mentioned tank. First, it's found that, at the high viscosity value of the liquid, the angles of the injectors have effect on the period of mixing time in case that the flow rate of the liquid is proper. For that case, the wider of the angle of inclination is, the shorter period of mixing time it takes. Second, in case a constant flow rate, at the low viscosity value of the liquid, it's found that the lower viscosity value of the injected liquid is, the shorter period of mixing time it takes. In addition, the previous case obviously shows that the different angles of inclination, the injector have a smaller influence on the period of mixing time. Finally, in the condition that two injectors are taken into the experiment and the flow rate is not so high, it's illustrated that the number of the injectors also has effect on the period of complete mixing time in case of the constant viscosity when compared with the experiment using only one injector.

## 1. บทนำ

การผสมสารในวงการอุตสาหกรรมถือว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งการผสมสารที่นิยมใช้โดยทั่วไปมีสองวิธี คือ (1) การผสมโดยใบพัด

กวน และ (2) การผสมแบบหัวฉีด ในบางอุตสาหกรรม การผสมสารโดยใช้ใบพัดกวนยังมีข้อจำกัดอยู่กล่าว คือ ไม่สามารถผสมสารสองชนิดทั้งหมดพร้อมกันได้ โดยเฉพาะสารที่มีสภาพเป็นกรด หรือ ไม่สามารถผสมสารที่มีระดับขึ้นลงได้ [1] ดังนั้นการผสมแบบหัวฉีดจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดข้อจำกัดข้างต้นได้ ในอดีตมีงานวิจัยเรื่องการผสมสารแบบหัวฉีด อาทิ เช่น N.Harnby และคณะ [2] ได้ศึกษาการผสมแบบหัวฉีดโดยใช้การวัดค่าการนำไฟฟ้า และการถ่ายภาพ ผลการวิจัยพบว่า สารที่มีความหนาแน่นสูงที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีด ไปสู่สารที่มีความหนาแน่นต่ำ มีประสิทธิภาพการผสมดีกว่าสารที่มีความหนาแน่นต่ำที่ถูกพ่นจากหัวฉีดไปสู่สารที่มีความหนาแน่นสูง Gosman และ Simitovic [3] ได้ศึกษาการผสมสารแบบ Jet to Crossflow ในถังสี่เหลี่ยม พบว่า ยิ่งมุมของหัวฉีดมากขึ้นจะทำให้การผสมสารทั้งสองดีขึ้น และยิ่งอัตราส่วนของความเร็วของสารที่หัวฉีดต่อความเร็วของสารภายในถังผสมยิ่งมาก การผสมของสารทั้งสองจะดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองถังผสมแบบหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดถูกติดตั้งไว้ด้านบนของผนังถังผสม โดยของเหลวที่มีความหนืดภายในถังสารจะถูกฉีดจากหัวฉีดลงไปในถังผสม ขณะเดียวกันสารภายในถังผสมนี้จะไหลลงสู่ถังสาร และสารภายในถังผสมนั้นจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดอีกครั้ง

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและใช้ในการออกแบบ

เวลาของการผสมที่สมบูรณ์ของของเหลวทั้งสองในถังผสมแบบหัวฉีดเป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่ง เพราะเป็นตัวแปรที่บ่งบอกผลการปฏิบัติงานของถังผสมแบบหัวฉีดชนิดนั้น ทั้งนี้เพราะ ถ้าถังใดใช้เวลาของการผสมที่สมบูรณ์สั้น แสดงว่าถังผสมแบบหัวฉีดชนิดนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

Corrsin[5] ได้หาสมการของเวลาที่ทำการผสมในถังผสมแบบหัวฉีด ดังนี้

$$\theta = K_z\left(\frac{\varepsilon_z}{Z^2}\right)^x \quad (1)$$

เมื่อ $x = -\frac{1}{3}$

โดยมีสมการ $\varepsilon_z$ = Turbulent kinetic energy dissipation rate

$$= A_z\frac{U_z^{\,3}}{D_z} \quad (2)$$

และ $$U_z = 6\frac{UD}{Z} \quad (3)$$

จากสมการกฎทรงมวล เมื่อของเหลวถูกฉีดจากหัวฉีดและของเหลวพุ่งไปที่จุดสุดท้าย และสมมุติให้ความหนาแน่นของของเหลวมีค่าใกล้เคียงกันและเป็นการไหลแบบ Steady

$$UD = U_z D_z \quad (4)$$

แทนสมการ (3) และสมการ (4) ลงในสมการ (2) ได้

$$\varepsilon_z \;\alpha\; \frac{(UD)^3}{Z^4} \quad (5)$$

แทนสมการ (5) ลงในสมการ (1) ได้

$$\theta \;\alpha\; \left[\frac{(UD)^3}{Z^6}\right]^x \quad (6)$$

แทน $x$ ลงในสมการ (6) ได้

$$\theta = K_z\frac{Z^2}{UD} \quad (7)$$

เนื่องจากปั๊มต้องมีพลังงานเพียงพอต่อการสูบของเหลวของถังสารผ่านหัวฉีด ดังนั้นสามารถคำนวณหากำลังงานของปั๊มได้จากสมการเบอร์นูลลี่ [4]

$$h_p = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e + h_{fd} - \frac{P_i}{\rho g} - \frac{V_i^2}{2g} - Z_i - h_{fs} \quad (8)$$

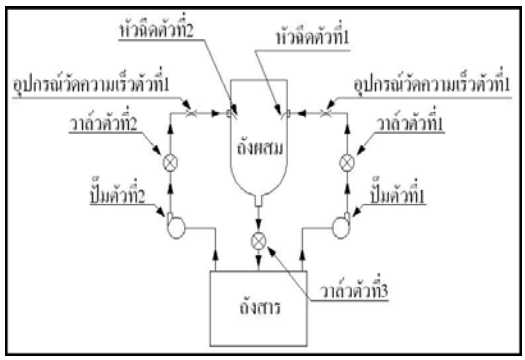
## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ชุดจำลองของถังผสมแบบหัวฉีดมีส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) ถังผสม (2) ถังสาร (3) ปั๊ม และ (4) หัวฉีด ดังแสดงการต่อของชุดทดลองของถังผสมแบบหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 1

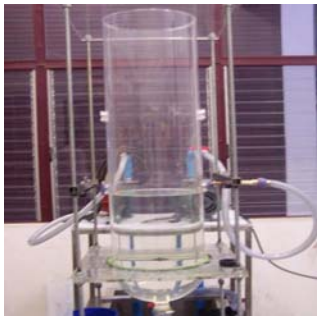
ถังผสมมีขนาดความสูง 0.7 เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เมตร ซึ่งถังผสมทำมากจากวัสดุอะคริลิคใส (Acrylic) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดสนิมและสามารถศึกษาลักษณะการผสมของของเหลวภายในถังผสมได้

ขณะที่ถังสารทำมากจาก Stainless มีขนาดความยาว ความกว้างและความสูง เท่ากับ 0.4 เมตร, 0.4 เมตร และ 0.6 เมตร ตามลำดับ ส่วนหัวฉีดมีรูเจาะตรงกลางเพื่อให้ของเหลวไหลผ่านมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

ในการทดลองเริ่มจากใส่น้ำปริมาณ 0.035 $m^3$ ลงไปในถังผสมและใส่ของเหลวที่มีความหนืดลงไปในถังสารปริมาณ 0.035 $m^3$ จากนั้นปรับวาล์วเพื่อให้ระดับของของเหลวในถังผสมมีระดับคงที่ ทำการเปิดปั๊มเพื่อดูดของเหลวในถังสารไปสู่หัวฉีดที่ถูกติดตั้งด้านบนของผนังถังผสมดังแสดงในรูปที่ 2




รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ต่างๆบนชุดทดลอง



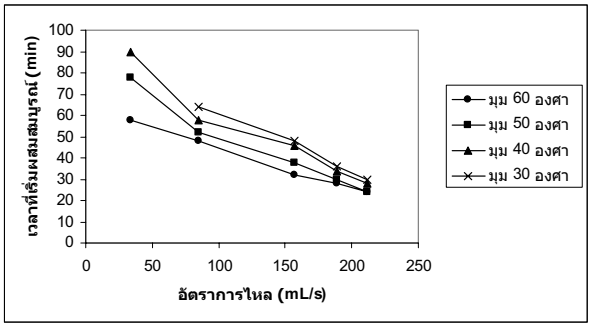
รูปที่ 2 แสดงลักษณะการติดตั้งหัวฉีดบนถังผสม

วิธีการหาระยะเวลาของการผสมที่สมบูรณ์ทำได้โดยวัดค่าความหนาแน่นของของเหลวในถังผสมโดยใช้หลอดดูดซึ่งมีตำแหน่งการดูดของเหลวในถังผสมทั้งหมด 6 ตำแหน่งที่มีระดับความสูงของการดูดแตกต่างกัน การดูดหาค่าความหนาแน่นของของเหลวในถังผสมจะทำการวัดค่าทุก 2 นาที ในการตรวจสอบระยะเวลาการผสมที่สมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้โดยหาค่าความหนาแน่นของของเหลวที่ได้จากหลอดดูด กล่าวคือ ถ้าความหนาแน่นของของเหลวทั้ง 6 ตำแหน่งที่ได้จากการดูดเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ แสดงว่าเวลานั้นเริ่มการผสมที่สมบูรณ์

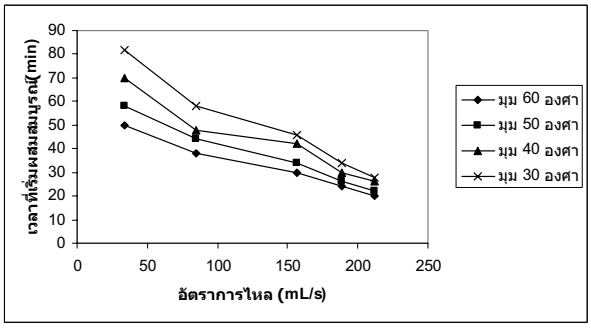
**4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง**

จากกราฟของรูปที่ 3a, 3b และ 3c พบว่ามุมของหัวฉีดมีผลกระทบต่อเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์ ยิ่งมุมฉีดมีค่ามากขึ้น ยิ่งทำให้เวลาที่เริ่มผสมสมบูรณ์สั้นลงเมื่ออัตราการฉีดของเหลวและความหนืดของของเหลวมีค่าคงที่ เหตุผลที่มุมการฉีดยิ่งมีค่ามากขึ้นทำให้เวลาที่เริ่มผสมสมบูรณ์มีระยะเวลาที่สั้นลงก็เพราะว่าที่มุมการฉีดมากทำให้ได้ระยะทางที่สารพุ่งไปผสมกันมีระยะทางที่ยาวขึ้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่าอัตราการฉีดของของเหลวในถังผสมมีผลกระทบต่อมุมของหัวฉีดซึ่งทำให้ระยะเวลาที่เริ่มผสมสมบูรณ์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือ ที่ช่วงอัตราการฉีดน้อย มุมของหัวฉีดจะมีผลกระทบต่อเวลาที่เริ่มผสมแตกต่างกันมากขึ้น และที่ช่วงอัตราการฉีดมาก มุมหัวฉีดจะมีผลกระทบต่อเวลาที่สมบูรณ์แตกต่างน้อยลง

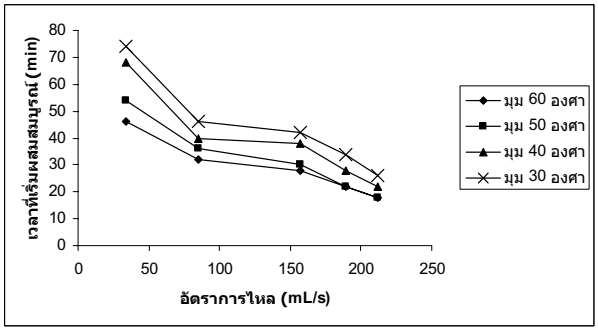
จากกราฟรูปที่ 3a สำหรับมุมของหัวฉีดเท่ากับ 30 องศา เมื่ออัตราการฉีดมีค่าน้อยหรือเท่ากับ 34 mL/s (ไม่ได้แสดงไว้บนกราฟ) พบว่า เวลาที่เริ่มผสมสมบูรณ์ภายในถังผสมมีค่านานกว่า 90 นาที ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการฉีดที่มีค่าน้อยทำให้ระยะทางการพ่นลงถังผสมมีระยะทางสั้นลง ประกอบกับทิศทางของการฉีดพ่นใกล้กับช่องทางออกของถังผสม จึงทำให้เกิด Poorly Mixing Zone บริเวณช่วงบนของถังผสมขึ้น ดังนั้นการผสมกันที่สมบูรณ์ภายในถังผสมจึงเกิดขึ้นได้ยาก




รูปที่ 3a ความหนืดของของเหลวเท่ากับ 0.92 Pa.s



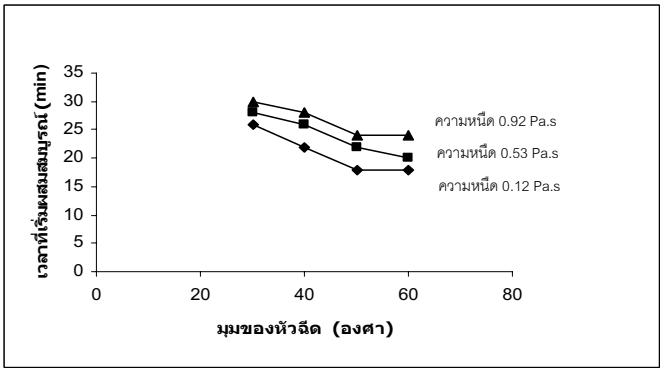

รูปที่ 3b ความหนืดของของเหลวเท่ากับ 0.53 Pa.s



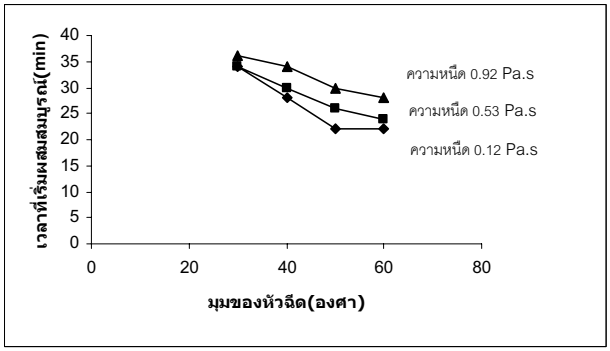

รูปที่ 3c ความหนืดของของเหลวเท่ากับ 0.12 Pa.s

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์กับอัตราการฉีดของของเหลว

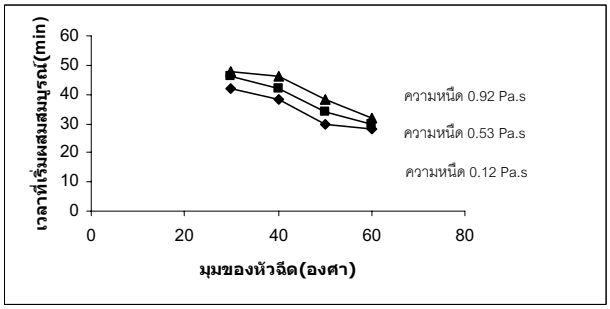
พิจารณารูปที่ 4a, 4b, 4c, 4d และ 4e พบว่าความหนืดของของเหลวที่ถูกฉีดมีผลกระทบต่อเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์ ที่ความหนืดของของเหลวมาก การผสมของของเหลวภายในถังผสมเกิดขึ้นได้ยาก ทั้งนี้เพราะของเหลวที่มีความหนืดมาก โมเลกุลของของเหลวมีการยึดติดกันมากกว่าของเหลวที่มีความหนืดน้อย ดังนั้นทำให้เกิดการผสมกันระหว่างของเหลวในถังผสมยากขึ้น



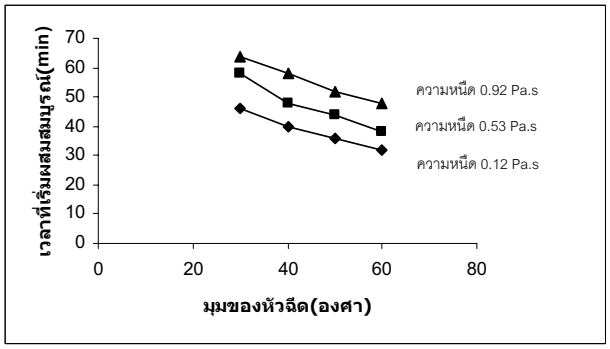

รูปที่ 4a เมื่ออัตราการฉีดเท่ากับ 212 mL/s



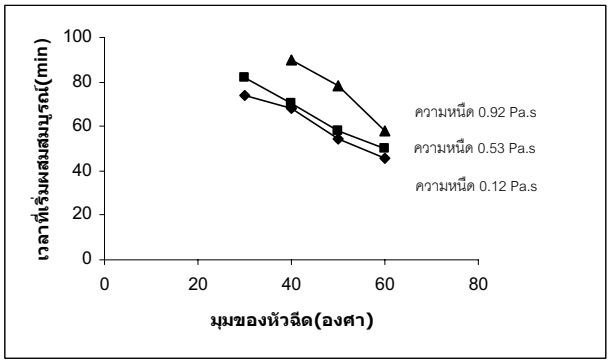

รูปที่ 4b เมื่ออัตราการฉีดเท่ากับ 189 mL/s




รูปที่ 4c เมื่ออัตราการฉีดเท่ากับ 157 mL/s



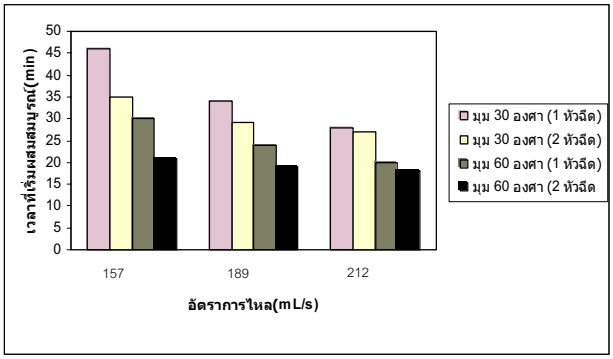

รูปที่ 4d เมื่ออัตราการฉีดเท่ากับ 85 mL/s




รูปที่ 4e เมื่ออัตราการฉีดเท่ากับ 34 mL/s

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์กับมุมของหัวฉีด

พิจารณารูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์กับอัตราการฉีดที่ใช้หัวฉีดหนึ่งหัวและหัวฉีดสองหัว จากกราฟแท่งทั้งสี่แท่ง พบว่าเมื่ออัตราการฉีดมาก จำนวนหัวฉีด(1 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด) ไม่มีผลกระทบต่อเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์มากนัก และเมื่ออัตราการฉีดน้อยลง จำนวนหัวฉีดมีผลกระทบต่อเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์มากขึ้น กล่าวคือ ที่อัตราการฉีดน้อย จำนวนหัวฉีด 2 หัว ทำให้เวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์มีระยะเวลาสั้นกว่าจำนวนหัวฉีด 1 หัว ทั้งนี้เพราะว่าระยะที่หัวฉีดจำนวน 2 หัวสามารถฉีดของเหลวลงไปในถังผสมได้ทั่วถึงกว่าหัวฉีด 1 หัว แม้ว่าอัตราการฉีดมีค่าเท่ากัน




รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เริ่มผสมที่สมบูรณ์กับอัตราการฉีดโดย เมื่อของเหลวมีความหนืด 0.53 Pa.s

**5. สรุปผลการทดลอง**

ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนมุมของหัวฉีด อัตราการฉีดของของเหลวในถังผสม และความหนืดของของเหลวที่ถูกฉีด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. มุมของหัวฉีดและอัตราการฉีดที่มากขึ้น ทำให้การผสมที่สมบูรณ์เกิดขึ้นได้เร็วขึ้น
2. อัตราการฉีดที่น้อยเกินไปและทิศทางของการฉีดมีทิศใกล้กับทางออกของสารทำให้การผสมที่สมบูรณ์ของของเหลวภายในถังผสมเกิดขึ้นได้ยาก
3. ความหนืดของของเหลวที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีดยิ่งมีค่าน้อยทำให้เวลาที่ผสมที่สมบูรณ์ของของเหลวภายในถังผสมใช้เวลาสั้นลง
4. ที่มุมฉีดเท่ากัน ถ้าอัตราการฉีดมากขึ้น จำนวนหัวฉีด(หัวฉีด 1 หัวและ 2 หัว) มีผลกระทบต่อระยะเวลาที่ผสมที่สมบูรณ์ใกล้เคียงกัน

**6. สัญลักษณ์**

| | |
|---|---|
| $A_z$ | dimensionless constant |
| $D$ | jet diameter at the injector (m) |
| $D_z$ | jet diameter at the end of the jet path (m) |
| $K_z$ | constant for jet mixing time correlation |
| $U$ | jet velocity at the injector (m/s) |
| $U_z$ | velocity at the end of the jet (m/s) |
| $Z$ | jet path length in a jet mixer (m) |
| $\theta$ | blend time (s) |
| $\varepsilon_Z$ | turbulent energy dissipation rate at the end of the jet ($m^2/s^3$) |

**7. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Edward, L.P. et al., 2004. Handbook of Industrial Mixing, John Wiley and Sons, New York, pp. 96-103, 202-203

[2] N.Harnby, M.F. Edwards, and A.W. Nienow., 1992. Mixing in the Process Industries. Oxford, Butterworth-Heinemann.

[3] Gosman and Simitovic., 1967. Model studies on mixers in the viscous flow region. Chem. Eng. Sci., Vol 22, pp. 1689-1699

[4] Bruce R. Munson, Donald F. Young., 2004. Fundamentals of Fluid Mechanics. 4th Edition, John Wiley & Sons(Asia) Pte, Ltd.

[5] Corrsin, S., 1964. The isotropic turbulent mixer. II. Arbitrary Schmidt number, AIChE J., pp 870-877