

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีผู้ทำการทดลอง เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และความเร็วของของไหลที่ไหลในท่อ และสามารถแบ่งเนื้อหาบทนี้ออกเป็นสามส่วน โดยที่ ส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้อธิบายลักษณะทั่วไปของปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่ และส่วนที่สองเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ซึ่งยังแบ่งได้ออกเป็นสองส่วนย่อยด้วย คือ การทดลองศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่ในสภาวะขอบเขตที่ไม่จำกัด เช่น การปล่อยก๊าซเสียออกจากปล่องควันในโรงงานอุตสาหกรรมสู่บรรยากาศภายนอก และการทดลองศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่ในสภาวะขอบเขตที่จำกัด เช่น การลดอุณหภูมิของก๊าซร้อนบริเวณทางเชื่อม และส่วนที่สามเป็นวิธีการที่ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการผสมกันเป็นรูปตัวที่ในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอก เช่น การออกซิเดชันของก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีอธิบายลักษณะทั่วไปของปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่

เพื่ออธิบายลักษณะทั่วไปของปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวที่ [Rajaratnam [1976]] ได้สังเกตของไหลที่เป็นเจ็ตตั้งแต่นี้ออกจากทางออกของเจ็ต เข้าไปผสมกับของไหลในสายของไหลหลัก จนกระทั่งสิ้นสุดการผสม พบว่ามีความแตกต่างกันทั้งลักษณะของพื้นที่หน้าตัดและความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตที่เปลี่ยนไปตามระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ต ซึ่งการผสมกันสามารถจำแนกออกเป็น 3 บริเวณ ดังรูปที่ (2.1)

1. บริเวณแรก การทะลุทะลวง (penetration) ของของไหลที่เป็นเจ็ต เป็นเส้นตรงผ่านเข้าไปในของไหลในสายของไหลหลัก โดยมีลักษณะของพื้นที่หน้าตัดและความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณ potential core (ξ_c)

2. บริเวณที่สอง วิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต ค่อยๆเอนไปตามทิศทางของของไหลในสายของไหลหลัก เนื่องจากเกิดการเอ็นทริน (entrain) เข้ามาของของไหลรอบๆของไหลที่เป็นเจ็ต ทำให้เกิดการเร่งของไหลที่เป็นเจ็ตในช่วงแรกและให้เกิดการหน่วงของไหลที่เป็นเจ็ตในช่วงหลัง พร้อมๆกับเกิดการไหลหมุนวนขึ้นภายในของไหลที่เป็นเจ็ต ทำให้เกิดการเปลี่ยน

แปลงลักษณะพื้นที่หน้าตัดของของไหลที่เป็นเจ็ต จากรูปวงกลมเป็นรูปเกือบม้า และเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณ maximum deflection

3. บริเวณสุดท้าย วิธีการเคลื่อนของของไหลที่เป็นเจ็ตเคลื่อนที่อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในสายของไหลหลัก และการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นในของไหลที่เป็นเจ็ตพัฒนาใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตลดลงจนเท่ากับความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก และเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณ vortex zone ดังรูปที่ (2.2)

2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

2.3.1 การทดลองศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่ไม่จำกัด

2.3.1.1 ผลที่เกิดจากค่าอัตราส่วนความเร็วที่ใช้แตกต่างกัน

Pratte และ Baines [1967] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วของไหลที่เป็นเจ็ต (jet) ต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก (main stream) ($R = v_j/w_0$) ที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต (jet trajectory) ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนความเร็วในช่วง 5 ถึง 35 โดยได้สร้างเป็นสมการแสดงวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต 3 เส้น คือ สมการแสดงวิธีการเคลื่อนที่ที่ผิวด้านนอก ที่แนวเส้นกึ่งกลาง และที่ผิวด้านในของของไหลที่เป็นเจ็ตตามลำดับ ดังสมการ (2.1) , (2.2) และ (2.3)

$$\frac{y_0}{Rd} = 2.63 \left(\frac{z}{Rd} \right)^{0.28} \quad (2.1)$$

$$\frac{y_c}{Rd} = 2.05 \left(\frac{z}{Rd} \right)^{0.28} \quad (2.2)$$

$$\frac{y_i}{Rd} = 1.35 \left(\frac{z}{Rd} \right)^{0.28} \quad (2.3)$$

โดย y_0 = ระยะความสูงที่ผิวด้านนอกของของไหลที่เป็นเจ็ต

y_c = ระยะความสูงที่แนวเส้นกึ่งกลางของของไหลที่เป็นเจ็ต

y_i = ระยะความสูงที่ผิวด้านในของของไหลที่เป็นเจ็ต

z = ระยะความยาวที่เคลื่อนที่ไปทางปลายทางการไหล (downstream)

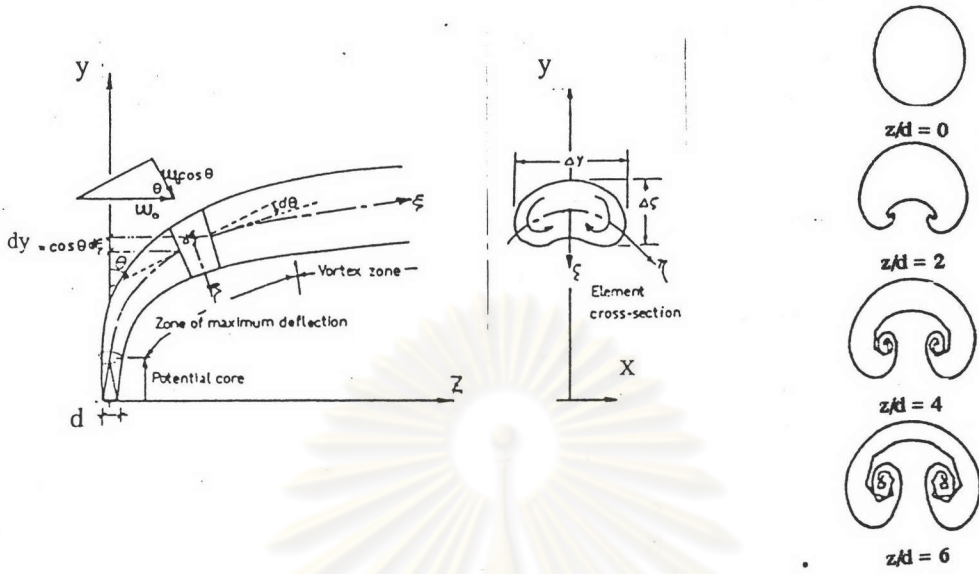
และได้แสดงผลการทดลองไว้ในรูปกราฟ ดังรูปที่ (2.3)

Kamotani และ Greber [1972] ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อการกระจายตัวของความเร็ว โดยทางออกของเจ็ตมีรูปร่างเป็นรูปวงกลม ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนความเร็วในช่วง 3.9 ถึง 23.9 และใช้ hot wire anemometry เป็นเครื่องมือวัด และรูปที่ (2.4)

แสดงการกระจายตัวของความเร็วในระนาบภาคตัดขวาง ที่ระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ตห่างจากทางออกของเจ็ตไปทางด้านปลายทางการไหล (ξ/d) ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 8.5 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของความเร็วบริเวณทางออกของเจ็ตเกือบเรียงกันเป็นหน้ากระดาน (uniform) แบบสมมาตร (symmetry) และเมื่อระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ตเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของความเร็วบริเวณทางออกของเจ็ตเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่สมมาตร (asymmetry) โดยเกิดการหน่วงที่บริเวณผิวด้านนอกของเจ็ตและเกิดการเร่งที่บริเวณผิวด้านในของเจ็ต

Ramsey และ Goldstein [1971] ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อหลักที่มีฉนวนหุ้ม โดยทางออกของเจ็ตมีรูปร่างเป็นรูปวงกลม ฉีดของไหลที่มีอุณหภูมิสูงเข้าไปในของไหลในสายของไหลหลักที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยใช้ thermocouple เป็นเครื่องมือวัด ดังรูปที่ (2.5) แสดงการกระจายตัวของค่าเส้นรอบอุณหภูมิคงที่ (temperature contour) ที่ระนาบภาคตัดขวางห่างจากทางออกของเจ็ตไปทางด้านปลายทางการไหลต่างๆกัน (z/d) เท่ากับ 3.06 ถึง 4.92 และที่อัตราส่วนพลังค์ของมวลไหลเข้าที่เป็นเจ็ตต่อมวลไหลเข้าในสายของไหลหลัก ($M = \rho_j v_j / \rho_o w_o$) แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนพลังค์ของมวลเท่ากับ 0.5 ค่าเส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดอยู่นือผนังฉีด (injection wall) ส่วนที่อัตราส่วนพลังค์ของมวลเท่ากับ 1 เส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดจะอยู่ห่างออกไปจากผนังฉีด และที่อัตราส่วนพลังค์ของมวลเท่ากับ 2 ของไหลที่เป็นเจ็ตเริ่มพัฒนารูปร่างเป็นรูปไต เนื่องจากเกิดการไหลหมุนวนขึ้นมา แต่การไหลหมุนวนเริ่มหายไปเมื่อของไหลที่เป็นเจ็ตเคลื่อนไปทางด้านปลายทางการไหลเป็นระยะทางไกลๆ เพราะว่าการสูญเสียความเร็วไปทางด้านข้าง

Kamotani และ Greber [1972] ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อหลักโดยของไหลที่เป็นเจ็ตมีอุณหภูมิสูงถึง 204 K ฉีดออกมาจากทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลมเข้าไปในของไหลในสายของไหลหลักที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีอัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 3.9 และ 7.7 จากรูปที่ (2.6) แสดงเส้นรอบอุณหภูมิกงที่ อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 3.9 และ 7.7 และที่ระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ตห่างจากทางออกของเจ็ตไปทางด้านปลายทางการไหล (ξ/d) เท่ากับ 3, 15 และ 70 ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 3.9 พบว่า เส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดอยู่ใกล้กับระนาบสมมาตร และที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 7.7 เส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดอยู่ห่างจากระนาบสมมาตร เนื่องจากเกิดการไหลหมุนวนรุนแรงกว่า

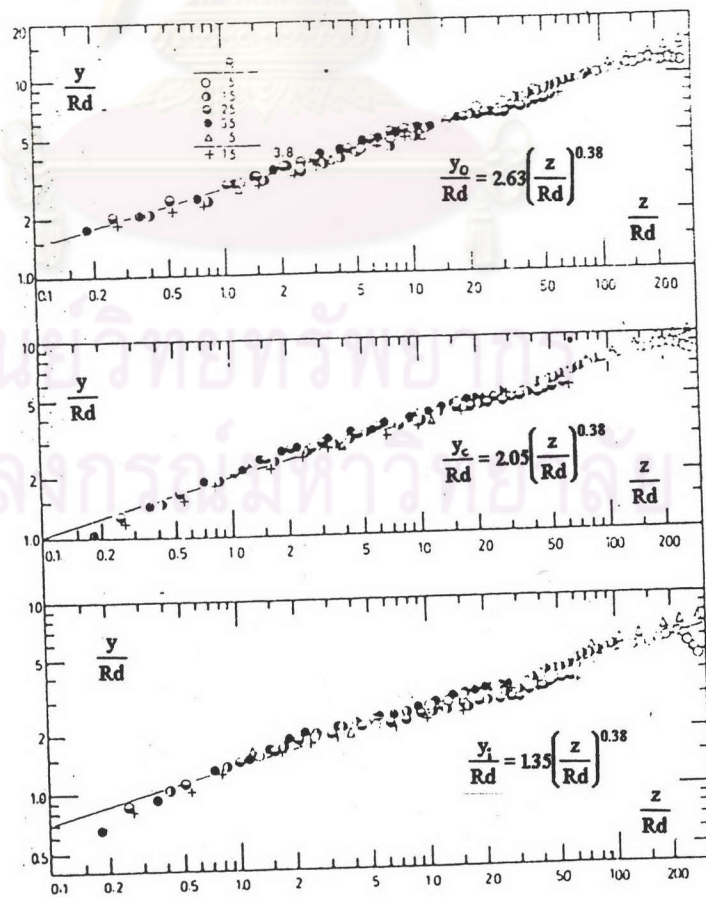


รูปที่ 2.1 แสดงวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตทางทฤษฎี

Pratte และ Baines [1967]

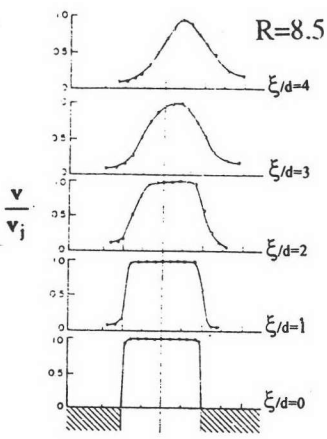
รูปที่ 2.2 แสดงการบิดเบี้ยวของของไหลที่เป็นเจ็ต

Margason [1968]

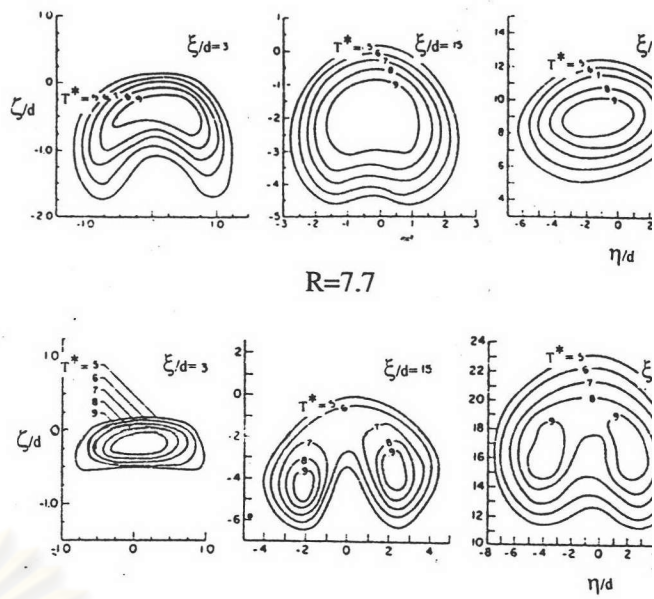


รูปที่ 2.3 แสดงวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตที่ผิวด้านนอก ที่แนวเส้นกึ่งกลาง และที่ผิวด้านใน

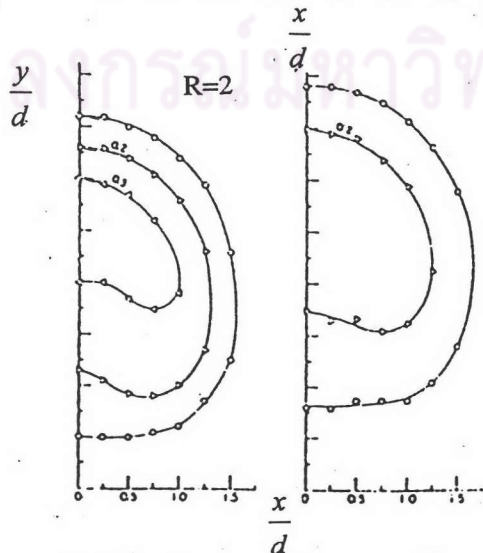
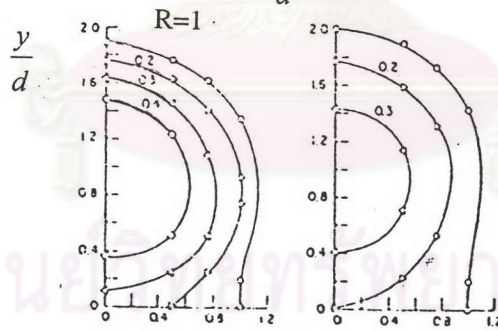
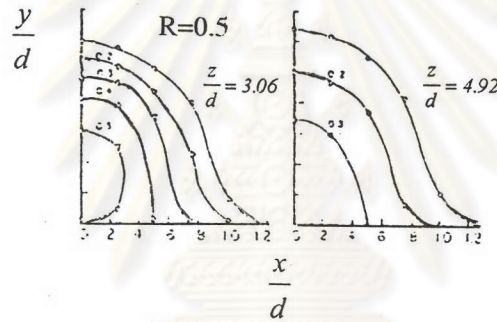
Pratte และ Baines [1967]



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของความเร็ว
 ในระนาบภาคตัดขวางตามระยะทางด้านปลายทางการไหล
 ที่เพิ่มขึ้น Kamotani และ Greber [1972]



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ
 ในระนาบภาคตัดขวางกับอัตราส่วนความเร็ว
 Kamotani และ Greber [1972]



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบภาคตัดขวางกับอัตราส่วนความเร็ว
 Ramsey และ Goldstein [1972]

2.3.2 การทดลองศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่จำกัด
ซึ่งสามารถสรุปการศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่จำกัด
เป็นดังตารางที่ (2.3)

2.3.2.1 ลักษณะพิเศษของการผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่จำกัด

Stoy และ Benhaim [1973] สามารถจำแนกการผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะ
ขอบเขตที่จำกัด ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ โดยที่ L_y คือ ความสูง
ของท่อหลัก [ซึ่งคือระยะห่างระหว่างผนังฉีด (injection wall) กับผนังกระทบ (impingement
wall)] ตารางที่ (2.2) แสดงค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ ที่แตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย

1. เจ็ตไม่กระทบผนัง (non-impinging jet) มีค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$
น้อยกว่า 0.25 พฤติกรรมของการผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่จำกัด คล้ายกับ
พฤติกรรมการผสมกันเป็นรูปตัวทีในสภาวะขอบเขตที่จำกัด แต่เนื่องจากผลจากสภาวะขอบเขต
ที่จำกัด ทำให้ของไหลที่เป็นเจ็ตเกิดการเบี่ยงเบนมากขึ้น ทำให้ของไหลในสายของไหลหลัก
เคลื่อนที่ด้วยความเร่งในบริเวณระหว่างของไหลที่เป็นเจ็ตกับผนังกระทบ พร้อมทั้งเกิดการไหล
หมุนวนเป็นรูปเกือกม้าขึ้นภายในของไหลที่เป็นเจ็ต

2. เจ็ตที่กระทบผนัง (impinging jet) ของไหลที่เป็นเจ็ตกระทบกับผนังกระทบ
ฝั่งตรงข้ามกันกับทางออกของเจ็ต โดยค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ มีค่ามากกว่า 0.75 โดย
สามารถพิจารณาแบ่งได้ออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณแรกเป็นบริเวณระหว่างทางออกของเจ็ต
กับผนังกระทบ ของไหลที่เป็นเจ็ตยังอยู่ในสภาพเป็นรูปแท่ง (rod) คือ รูปร่างของของไหลที่
เป็นเจ็ตไม่เปลี่ยนแปลงไป และบริเวณที่สองเป็นบริเวณที่ของไหลที่เป็นเจ็ตกระทบกับผนัง
กระทบ ทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้นสองบริเวณ คือ บริเวณแรกเกิดขึ้นทางผิวด้านนอกของ
ของไหลที่เป็นเจ็ต และบริเวณที่สองเกิดขึ้นทางผิวด้านในของของไหลที่เป็นเจ็ตใกล้ๆกับผนัง
กระทบ ความรุนแรงของการกระทบยิ่งมาก จุดศูนย์กลางของการไหลหมุนวนยิ่งห่างจากผนัง
กระทบ

3. เจ็ตที่มีลักษณะก้ำกึ่งกันระหว่างสองกรณีข้างต้น (intermediate case) ของ
ไหลที่เป็นเจ็ตเบี่ยงเบนเป็นเส้นโค้ง และกระทบกับผนังกระทบห่างจากบริเวณทางออกของเจ็ต
โดยไม่เกิดการไหลวนขึ้นทางผิวด้านในของของไหลที่เป็นเจ็ต

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่า $R/(L_y/d)$ ในแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมา จาก Stoy และ Benhaim [1973]

| ผู้วิจัย | อัตราส่วนความกว้าง ต่อความสูงของท่อหลัก (L_x/L_y) | อัตราส่วนของไหล ที่เป็นเจ็ตของไหล ในสายของไหลหลัก (R) | ค่าความสูง รูมีติ (L_y/d) | ค่าตัวแปร รูมีติ $R/(L_y/d)$ | เจ็ตที่ กระทบผนัง |
|---------------------------------|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Stoy และ Benhaim [1973] | 4 | 2.5 | 3 | 0.83 | + |
| | | 3.4 | | 1.13 | + |
| | | 5 | | 1.67 | + |
| | | 6.9 | | 2.3 | + |
| Kamotani และ Greber [1974] | 2.5-14 | 2.8 | 8 | 0.35 | - |
| | | 4.2 | | 0.53 | ± |
| | | 5.7 | | 0.71 | + |
| | | 5.7 | | 0.48 | ± |
| | | 8.5 | | 0.71 | + |
| Bouchez และ Goldstein [1975] | 1.3 | 4 | 16 | 0.53 | + |
| | | 8 | | 0.33 | - |
| | | 12 | | 0.67 | + |
| | | 14 | | 1 | + |
| | | | | 1.17 | + |

หมายเหตุ + เป็นเจ็ตที่กระทบผนัง - เป็นเจ็ตที่ไม่กระทบผนัง ± เป็นเจ็ตที่ก้ำกึ่ง

2.3.2.2 ผลที่เกิดจากค่าอัตราส่วนความเร็วที่ใช้แตกต่างกัน

2.3.2.2.1 วิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต

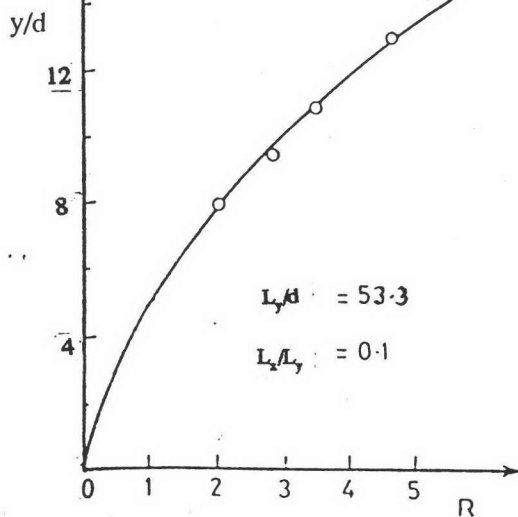
Callaghan และ Ruggeri [1948] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อ (L_x/L_y) เท่ากับ 0.1 โดยทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลักอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 และมีค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ น้อยกว่า 2 โดยใช้ pressure probe เป็นเครื่องมือวัด ซึ่งได้สร้างความสัมพันธ์อธิบายวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต ดังสมการ (2.4)

$$\frac{z}{d} = \frac{0.118 \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_j} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^{3.3}}{R^2} \quad (2.4)$$

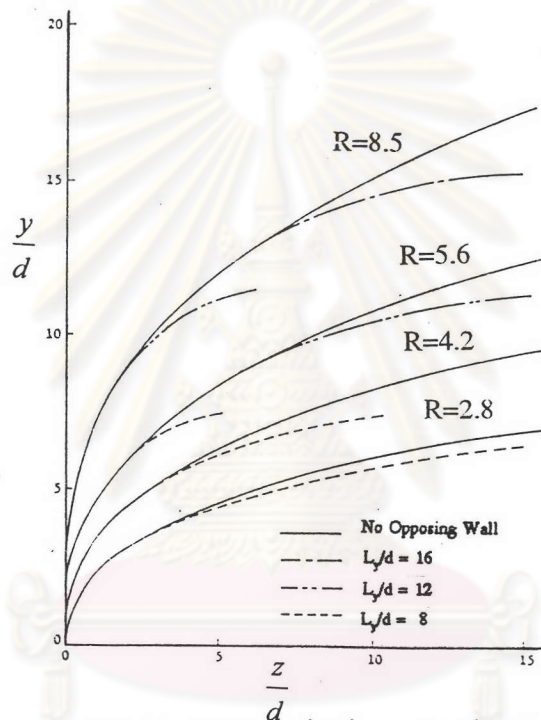
ใช้ได้เมื่อ L_x/L_y เท่ากับ 0.1 และ L_y/d มีค่ามากประมาณ 32 ถึง 79

จากรูปที่ (2.7) แสดงตำแหน่งของการกระทบของของไหลที่เป็นเจ็ตที่แปรเปลี่ยนตามอัตราส่วนความเร็ว ที่ตำแหน่ง z/d เท่ากับ 21.2 พบว่าของไหลที่เป็นเจ็ตทะลุทะลวง (penetrate) ได้ลึกมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเร็วเพิ่มขึ้น คือ ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 2 ของไหลที่เป็นเจ็ตอยู่ที่ตำแหน่ง y/d เท่ากับ 8 ขณะที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 5 ของไหลที่เป็นเจ็ตทะลุทะลวงมากขึ้น 5d

Kamotani และ Greber [1974] ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อเท่ากับ 7 ถึง 13.9 โดยทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 8.5 และมีค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ เท่ากับ 0.3 ถึง 0.7 โดยใช้ hot wire anemometry เป็นเครื่องมือวัด ดังรูปที่ (2.8 a) พบว่าห่างจากทางออกของเจ็ตไปทางด้านปลายทางการไหลเป็นระยะ 10d และอัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 2.8 ของไหลที่เป็นเจ็ตทะลุทะลวงเข้าไปได้สูง 5.6d ขณะที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 5.6 ของไหลที่เป็นเจ็ตทะลุทะลวงเข้าไปได้สูงถึง 10d

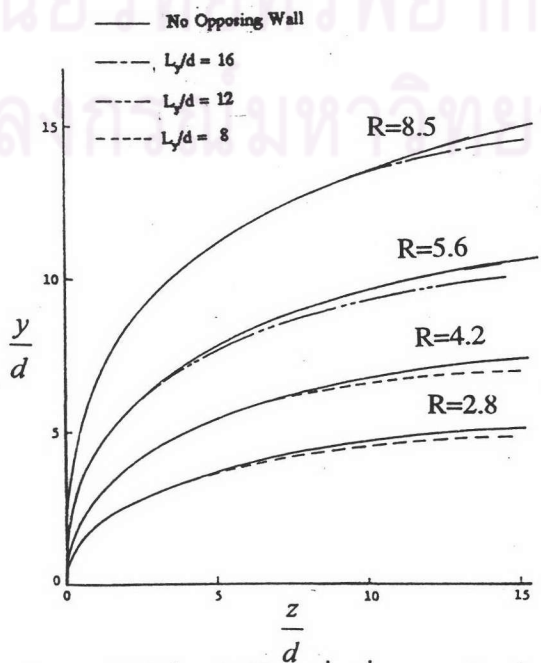


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทะลุทะลวงของของไหลที่เป็นเจ็ทกับอัตราส่วนความเร็ว Callaghan และ Ruggeri [1948]



รูปที่ 2.8 a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิถีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ทกับอัตราส่วนความเร็ว

Kamotani และ Greber [1974]



รูปที่ 2.8 b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิถีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิจของไหลที่เป็นเจ็ทกับอัตราส่วนความเร็ว

Kamotani และ Greber [1974]

2.3.2.2.2 จุดกระทบ (impingement point) เป็นตำแหน่งที่ของไหลที่เป็นเจ็ตกระทบกับผนัง กระทบ คือ ตำแหน่ง P_{im} แสดงในรูปที่ (2.9) และระยะที่วัดตั้งแต่บริเวณตรงข้ามกับทางออกของเจ็ตถึงจุดกระทบ เรียกว่า ระยะกระทบ (Z_{im})

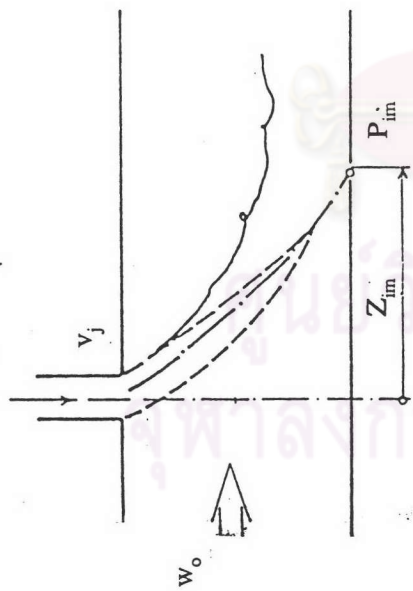
Stoy และ Benhaim [1973] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อระยะกระทบที่เกิดขึ้นในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อเท่ากับ 4 และทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 7.7 และมีค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ อยู่ในช่วง 0.83 ถึง 2.3 โดยใช้ pressure probe เป็นเครื่องมือวัด รูปที่ (2.10) แสดงระยะกระทบที่แปรเปลี่ยนไปกับอัตราส่วนความเร็วในท่อ ที่ y/d เท่ากับ 3.05 พบว่า ระยะกระทบจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วเพิ่มขึ้น

2.3.2.2.3 จุดอยู่นิ่ง (stagnation point) เป็นตำแหน่งของไหลที่เป็นเจ็ตเกิดการไหลย้อนกลับไปทางด้านต้นทางการไหล (upstream) คือ ตำแหน่ง P_{st} เป็นดังรูปที่ (2.11) และระยะที่วัดตั้งแต่บริเวณตรงข้ามกับทางออกของเจ็ตถึงจุดอยู่นิ่ง เรียกว่า ระยะนิ่ง (Z_{st})

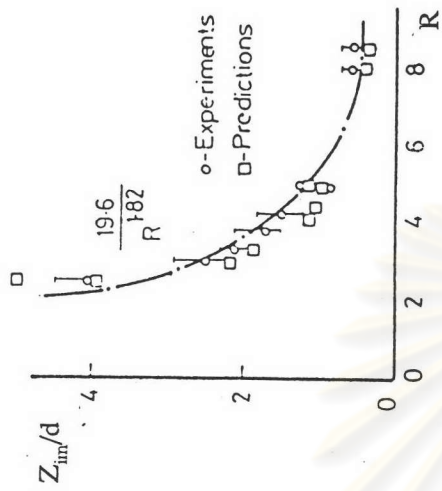
Bouchez และ Goldstein [1975] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อระยะนิ่งที่เกิดขึ้นในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อเท่ากับ 4 และทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 3 ถึง 14 และมีค่าตัวแปรไร้มิติ $R/(L_y/d)$ อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 1.2 โดยใช้เทคนิค flow visualisation เป็นเครื่องมือวัด จากรูปที่ (2.12) แสดงระยะนิ่งที่แปรเปลี่ยนไปกับอัตราส่วนความเร็วในท่อ พบว่า ระยะนิ่งเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วเพิ่มขึ้น

2.3.2.2.4 การกระจายตัวของความเร็ว

Kamotani และ Greber [1974] ได้ทำการทดลองตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อการกระจายตัวของความเร็ว ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 8.5 รูปที่ (2.13) สังเกตได้ว่าระนาบภาคตัดขวางห่างจากทางออกของเจ็ตไปทางด้านปลายทางการไหลต่างๆกัน (z/d) เท่ากับ 12 ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 5.6 เส้นรอบความเร็วคงที่ (velocity contour) สูงสุดอยู่ในแนวสมมาตรใกล้ผนังด้านบน และที่อัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 8.5 เส้นรอบความเร็วคงที่ที่สูงสุดเคลื่อนตัวออกจากแนวสมมาตรไปยังด้านข้างติดไปกับผนังกระทบ เนื่องจากผนังกระทบด้านของไหลที่เป็นเจ็ตที่มากกระทบออกไปทางด้านข้าง

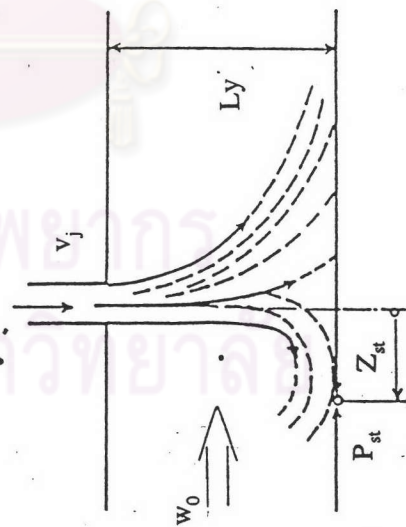


รูปที่ 2.9 แสดงจุดกระทบ และระยะกระทบ

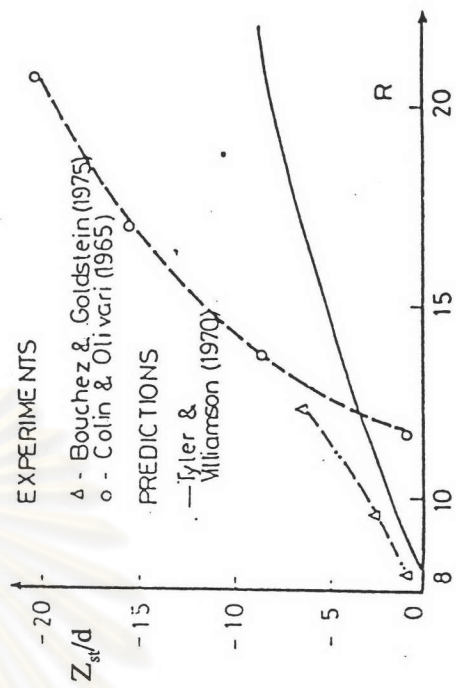


รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระทบกับอัตราส่วนความเร็ว

Stoy และ Ben-Haim [1973]

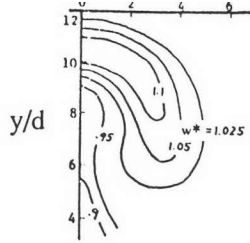


รูปที่ 2.11 แสดงจุดขุ่น และระยะขุ่น

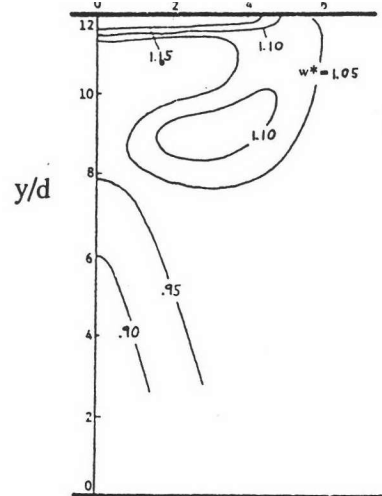


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขุ่นกับอัตราส่วนความเร็ว

Bouchez และ Goldstein [1975]



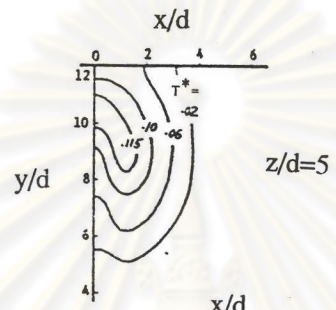
$R = 5.6$
 $z/d = 12$



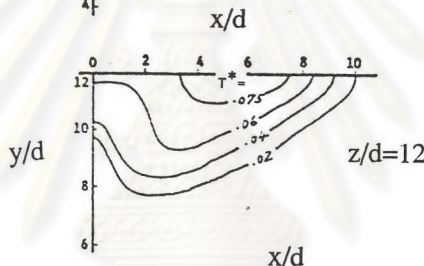
$R = 8.5$
 $z/d = 12$

รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของความเร็วกับอัตราส่วนความเร็ว

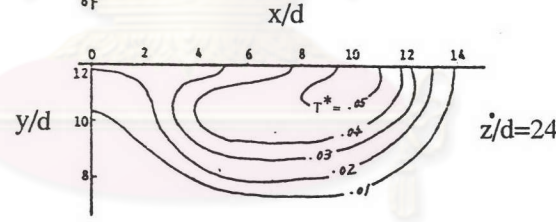
Kamotani และ Greber [1974]



$R = 8.5$
 $T_j/T_0 = 1.6$



$z/d = 12$

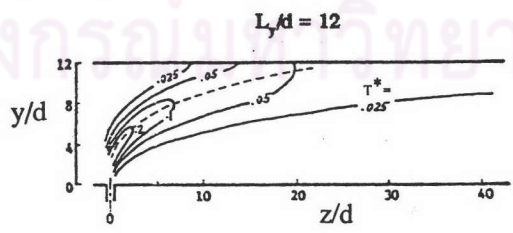


$z/d = 24$

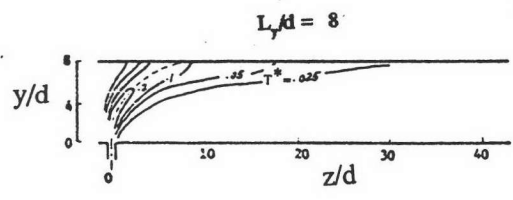
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบภาคตัดขวาง

ตามระยะทางด้านปลายทางการไหลที่เพิ่มขึ้น

Kamotani และ Greber [1974]



$R = 5.6$



$R = 5.6$

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบสมมาตรกับรูปร่างของท่อหลัก

Kamotani และ Greber [1974]

2.3.2.2.5 วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต

Kamotani และ Greber [1974] ได้ทำการทดลองตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต โดยของไหลในสายของไหลหลักมีอุณหภูมิเท่ากับ 298 K และของไหลที่เป็นเจ็ตมีอุณหภูมิสูงเท่ากับ 197 K จากรูปที่ (2.8 b) พบว่า วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต คล้ายกับวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต คือ การทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตมากขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วมากขึ้น

2.3.2.2.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

Kamotani และ Greber [1974] ได้ทำการทดลองตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากรูปที่ (2.14) แสดงเส้นรอบอุณหภูมิกงที่ในระนาบภาคตัดขวางที่ระยะทางที่เคลื่อนที่ไปทางปลายทางการไหล (z/d) 3 ระยะ เท่ากับ 5 ,12 และ 24 ตามลำดับ โดยที่ z/d เท่ากับ 5 เส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดจะอยู่ในแนวแกนสมมาตรที่ตำแหน่ง y/D เท่ากับ 11.2 และที่ z/d เท่ากับ 12 เส้นรอบอุณหภูมิกงที่สูงสุดจะเคลื่อนไปอยู่ที่ผนังด้านข้าง

2.3.2.3 ผลที่เกิดจากรูปร่างของท่อหลักที่ใช้แตกต่างกัน

2.3.2.3.1 วิธีการเคลื่อนที่ของไหลที่เป็นเจ็ตและวิธีการเคลื่อนที่อุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต

Kamotani และ Greber [1974] ได้ทำการทดลองตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ศึกษาผลของขนาดความสูงของท่อหลัก (L_y/d) ต่อวิธีการเคลื่อนที่ของไหลที่เป็นเจ็ตและวิธีการเคลื่อนที่อุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต พบว่า วิธีการเคลื่อนที่ของไหลที่เป็นเจ็ตและวิธีการเคลื่อนที่อุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตเกิดการเบี่ยงเบนมากขึ้น เมื่อความสูงของท่อหลักลดลง ดังรูปที่ (2.8a) และ (2.8b) ตามลำดับ

2.3.2.3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

Kamotani และ Greber [1974] ทำการทดลองตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ศึกษาผลของขนาดความสูงของท่อหลัก (L_y/d) ที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิกงที่ (2.15) แสดงเส้นรอบอุณหภูมิกงที่ที่ระนาบสมมาตร และที่ค่าความสูงไร้มิติ (L_y/d) เท่ากับ 12 และ 8 สังเกตพบว่า ที่บริเวณผนังกระทบ การกระจายตัวของอุณหภูมิกงที่มากขึ้นเมื่อค่าความสูงของท่อหลักที่ลดลง

2.3.2.4 ผลที่เกิดจากอัตราส่วนความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

2.3.2.4.1 วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต

Callaghan และ Ruggeri [1951] ศึกษาผลของอัตราส่วนความหนาแน่นของของไหลในสายของไหลหลักต่อความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ต ที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตในท่อหลัก ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อหลักเท่ากับ 0.1 และทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 3.3, 4.4 และ 7.8 โดยใช้ thermocouple เป็นเครื่องมือวัด และอัตราส่วนความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1.33 จากรูปที่ (2.16) แสดงตำแหน่งของการทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต ที่ระนาบภาคตัดขวาง z/d เท่ากับ 12.5 พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความหนาแน่นเป็นสาเหตุให้เกิดการทะลุทะลวงของของไหลที่เป็นเจ็ตมากขึ้น ซึ่งได้สร้างความสัมพันธ์อธิบายวิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต ดังสมการ (2.5)

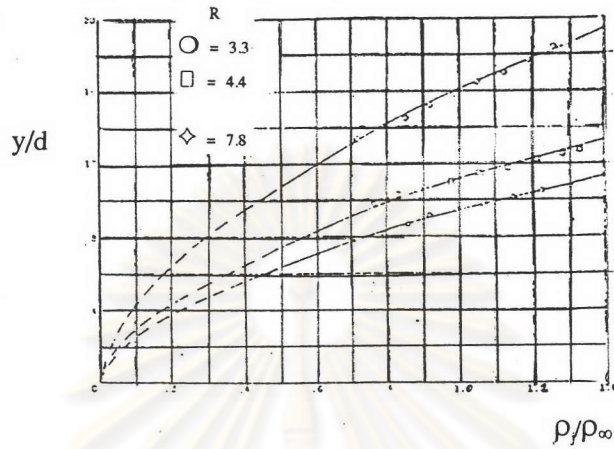
$$\frac{z}{d} = \frac{1}{R^{2.46}} \left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_j} \right)^{2.19} \left(\frac{y}{d} \right)^{3.85} \quad (2.5)$$

ใช้ได้เมื่อ L_x/L_y เท่ากับ 0.1 และ R มีค่าอยู่ในช่วง 3.3 ถึง 7.8

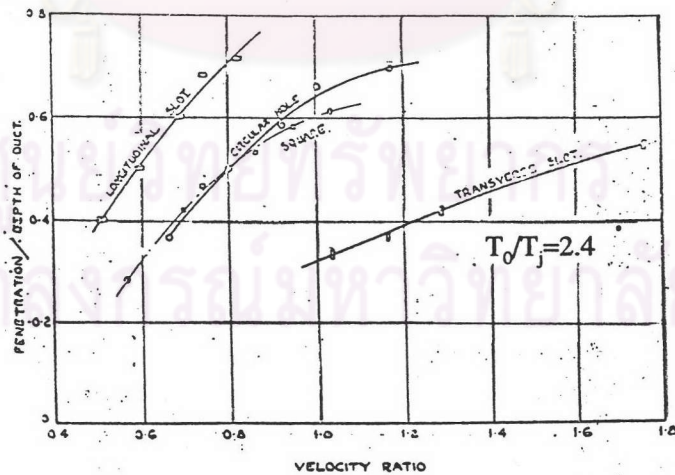
2.3.2.5 ผลของรูปร่างทางออกของเจ็ตที่แตกต่างกัน

2.3.2.5.1 วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต

Hawthorne และ คณะ [1944] ศึกษาผลของรูปร่างทางออกของเจ็ต ที่มีต่อวิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตในท่อหลัก ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของท่อหลักเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 0.4 โดยของไหลในสายของไหลหลักมีอุณหภูมิสูงเท่ากับ 750 K และของไหลที่เป็นเจ็ตมีอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 320 K ฉุดออกมาจากทางออกของเจ็ตที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 4 ลักษณะ คือ รูปวงกลม รูปสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับรูปวงกลม ช่องแคบตามแนวกว้างของท่อหลัก (transverse slot) และช่องแคบตามแนวยาวของท่อหลัก (longitudinal slot) ตามลำดับ รูปที่ (2.17) แสดงผลของรูปร่างทางออกของเจ็ตที่มีต่อการทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต พบว่า การทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตเมื่อรูปร่างทางออกของเจ็ตเป็นช่องแคบตามแนวยาวของท่อหลักทะลุทะลวงได้มากที่สุด ส่วนการทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ตเมื่อรูปร่างทางออกของเจ็ตเป็นรูปวงกลม ใกล้เคียงกับรูปร่างทางออกของเจ็ตเป็นรูปสี่เหลี่ยม และการทะลุทะลวงของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต เมื่อรูปร่างทางออกของเจ็ตเป็นช่องแคบตามแนวกว้างของท่อหลัก



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทะลุทะลวงของอุโมงค์ของไหลที่เป็นเจ็ทกับอัตราส่วนความหนาแน่น Callaghan และ Ruggeri [1951]



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทะลุทะลวงของอุโมงค์ของไหลที่เป็นเจ็ทกับรูปร่างทางออกของเจ็ท Hawthorne และ คณะ [1944]

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการทดลองศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวทีในสถานะขอบเขตที่จำกัด จาก Gosman และ Simitovic [1986]

| อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อหลัก (L_x/L_y) | เรย์โนลด์สต้นแบบของท่อหลัก (Re_0) | รูปร่างทางออกของเจ็ต | อัตราส่วนความเร็วของไหลในสายของไหลหลักต่อของไหลที่เป็นเจ็ต (R) | ค่าความสูงไร้มิติ (L_y/d) | เครื่องมือที่ใช้ทำการวัด | ตัวแปรที่ดัดแปลงการวัด | อ้างอิงจาก |
|--|---------------------------------------|----------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------|
| 1 | 100,000-300,000 | วงกลมและสี่เหลี่ยม | 0.56-2 | 1.8-3.5 | thermocouple | วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต | Hawthorne และคณะ [1944] |
| 0.1 | 20,000-550,000 | วงกลม | 3.3-8 | 32-79 | thermocouple | วิธีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิของของไหลที่เป็นเจ็ต | Callaghan และ Ruggeri [1951] |
| 4 | 100,000-600,000 | วงกลม | 2.5-7.7 | 3 | flow visualization | สังเกตจุดกระทบ | Stoy และ Benhaim [1973] |
| 2.5-14 | 27,000-81,000 | วงกลม | 2.8-8.5 | 8-16 | hot wire anemometer และ thermocouple | การกระจายตัวของความเร็วและอุณหภูมิ | Kamotani และ Greber [1974] |
| 1.3 | 131,000 | วงกลม | 3-14 | 12 | flow visualization | สังเกตจุดอยู่นิ่ง | Bouchez และ Goldstein [1975] |

2.4 วิธีการที่ใช้หาสถานะที่เหมาะสมในการผสมกันเป็นรูปตัวทีในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอก

วิธีการที่ใช้หาสถานะที่เหมาะสมในการผสมกันของของไหลในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอก สรุปได้ดังตารางที่ (2.3) และมีเนื้อหาคร่าวๆดังแสดงไว้ด้านล่าง

Forney และ Kwon [1979] ใช้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นตัวติดตาม (tracer) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผสม ในท่อหลักรูปทรงกระบอก ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลัก (d/D) ที่มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งใช้อัตราส่วนความเร็วที่มีค่ามากกว่าหนึ่ง โดยให้แก๊สมีเทนเจือจางไหลในท่อข้างและอากาศไหลในท่อหลัก ซึ่งจะทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการผสม เมื่อสถานะนั้นวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนแล้วค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนอยู่บริเวณกึ่งกลางท่อหลัก และสามารถสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลัก กับ อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ดต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก เป็นดังสมการ (2.6)

$$\frac{d}{D} = \frac{0.11}{R} + \frac{0.6}{R^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ $d/D < 1$ และ $R > 1$

Maruyama และ คณะ [1981] ใช้อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างของไหลที่เป็นเจ็ดกับของไหลในสายของไหลหลักเป็นตัวติดตาม เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผสม ในท่อหลักรูปทรงกระบอกที่หุ้มฉนวนกันความร้อน ที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลักที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.03 ถึง 1 และใช้อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ดต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลักที่มีค่าน้อยกว่า 6 ซึ่งจะทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการผสม เมื่อสถานะนั้นให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิ (σ) ที่มีค่าน้อยที่สุด และสามารถสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลัก กับ อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ดต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก เป็นดังสมการ (2.7)

$$\frac{d}{D} = \frac{2.65}{R^{0.24}} \quad (2.7)$$

เมื่อ $0.03 < d/D < 1$ และ $R < 6$

Tosun [1987] ใช้ปฏิกิริยาเอโซคัพปลิงแบบแข่งขันกัน (competitive azo coupling reaction) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผสม โดยให้สารละลายแอลฟาแนฟтол (alpha-naphthol) ไหลในท่อหลัก และสารละลายกรดไดอะโซโซไทด์ซัลฟานิลิก (diazotized sulfanilic acid) ไหลในท่อข้าง ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นสองชนิด คือ โมโนเอโซดาเยส (monoazo dyes, R) และ บิสเอโซดาเยส (bisazo dyes, S) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นแบบแข่งขัน ดังสมการ (2.8)



ต่อจากนั้นทำการหาค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยา (selectivity) ของบิสเอโซดาเยส (X_S)

$$X_S = \frac{2C_S}{(2C_S + C_R)}$$

ซึ่งเป็นค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ซึ่งจะทราบว่ถึงสถานะที่เหมาะสมในการผสม เมื่อสถานะนั้นให้ค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยทดลองในท่อหลักรูปทรงกระบอก ที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อข้างต่อท่อหลักที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 0.25 และใช้อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ดต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลักที่มีค่ามากกว่า 6 ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อข้างต่อท่อหลัก กับอัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ดต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก เป็นดังสมการ (2.9)

$$R_{opt} = 0.54 \left(\frac{d}{D} \right)^{-1.24} \quad (2.9)$$

เมื่อ $0.01 < d/D < 0.25$ และ $R > 6$

Cozewith และ คณะ [1989] ใช้ปฏิกิริยานิวทรัลไรเซชัน (neutralization) ระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม โดยใช้ท่อหลักรูปทรงกระบอก ที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลักที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 ถึง 0.25 และใช้อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลักที่มีค่าน้อยกว่า 10 โดยให้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกไหลในท่อหลัก และสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ไหลในท่อข้าง และใช้ bromothymol blue เป็นตัวอินดิเคเตอร์ (indicator) ซึ่งจะทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการผสม เมื่อสภาวะนั้นใช้ระยะทางที่ทำให้ตัวอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีน้ำเงินด้วยระยะทางที่น้อยที่สุด และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลัก กับอัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลัก เป็นดังสมการ (2.10)

$$R_{\text{opt}} = 1.0 \left(\frac{d}{D} \right)^{-0.537} \quad (2.10)$$

เมื่อ $0.05 < d/D < 0.25$ และ $R < 10$

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปวิธีการที่ใช้หาสถานะที่เหมาะสมในการผสมกันเป็นรูปตัวที่ในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอกจาก Tosun [1987]

| ในสายของไหลหลัก | ชนิดของไหล | เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm) | | ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของท่อหลัก (Re_0) | ระยะทางที่ทำการวัด (z/d) | ตัวแปรที่ต้องการวัด | สภาวะการผสมที่เหมาะสมเกิดขึ้นเมื่อ | เอกสารอ้างอิง |
|-----------------|--------------------------|------------------------|----------------|---|--------------------------|-------------------------------------|--|------------------------|
| | | ของท่อหลัก (D) | ของท่อข้าง (d) | | | | | |
| อากาศ | อากาศ+ก๊าซมีเทน | 6.35 | 0.16 | 2,000-90,000 | 2-10 | ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของก๊าซมีเทน | ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดที่แกนกลางท่อหลัก | Forney และ Kwon [1979] |
| อากาศ | อากาศ | 5.1 | 0.5-1.3 | 1,600-63,000 | 2-10 | อุณหภูมิ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสูงสุด | Maryama และคณะ [1981] |
| 25 องศาเซลเซียส | 35 องศาเซลเซียส | 0.71-1.03 | 0.09-0.18 | > 10,000 | <3 | monoazodyes | monoazodyes น้อยสุด | Tosun [1987] |
| alpha-naphthol | diazotized sulfuric acid | 2.54 | 0.119-0.635 | > 10,000 | <3 | สีของ bromothymol blue | bromothymol blue เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน | Cozewith และคณะ [1989] |

2.4.1 การศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันเป็นรูปตัวทีในท่อหลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอก

Chen และ คณะ [1990] ได้ใช้ (1.) สมการเชิงวิเคราะห์ (analytical method) ของการถ่ายเทมวลรวมและการถ่ายเทโมเมนตัมของ Stoy และ Ben-Haim [1973] ร่วมกับ (2.) สมการแสดงวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตของ Maruyama และคณะ [1981] (3.) สมการหาพื้นที่ภาคตัดขวางของของไหลที่เป็นเจ็ตที่เปลี่ยนแปลงไปตามวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ตของ Wooler [1967] และ (4.) สมการแสดงการเอ็นเทรนเข้าไปของของไหลรอบๆเข้าไปในของไหลที่เป็นเจ็ตของ Hirst [1971] และแก้สมการที่ (1) โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อคำนวณหาค่าความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ต (v_j) และ พื้นที่ภาคตัดขวางของไหลที่เป็นเจ็ต (A_j) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ต (ξ)

1. สมการเชิงวิเคราะห์ของการถ่ายเทมวลรวมและการถ่ายเทโมเมนตัม ของ Stoy และ Ben-Haim [1973] เป็นไปดังสมการ (2.11) และ (2.12)

$$\text{mass:} \quad \frac{d(\rho A_j v_j)}{d\xi} = E_\xi \quad (2.11)$$

$$\text{momentum:} \quad \frac{d(\rho A_j v_j)}{d\xi} = E_\xi w_0 \sin \theta \quad (2.12)$$

2. สมการแสดงวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต ของ Maruyama และ คณะ [1981] เป็นไปดังสมการ (2.13)

$$\frac{y_c}{Rd} = 0.57 \left(\frac{d}{D} \right)^{-0.39} \left(\frac{z}{Rd} \right)^m \quad (2.13)$$

$$\text{โดย} \quad m = 0.44 \quad \text{เมื่อ} \quad z < Rd$$

$$m = 0.26 \quad \text{เมื่อ} \quad z > Rd$$

3. สมการหาค่าพื้นที่ภาคตัดขวาง (A_j) และ เส้นรอบวงของของไหลที่เป็นเจ็ต (C_j) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นผ่านศูนย์กลางของของไหลที่เป็นเจ็ต (d_j) ของ Wooler [1967] โดยสมมติให้อัตราส่วนขนาดแกนรองต่อขนาดแกนหลัก (minor axis / major axis) ของพื้นที่หน้าตัดของของไหลที่เป็นเจ็ตมีค่าเท่ากับ $1/4$ เมื่อ $y_c / Rd = 0.3$ เป็นไปดังสมการ (2.14) ถึง (2.19)

$$\frac{\text{minor axis}}{\text{major axis}} = 1 - \frac{5y_c}{Rd} \quad (2.14)$$

$$C_j = \pi d_j \left[\frac{1 + \left(1 - \frac{5y_c}{2Rd}\right)}{2} \right] \quad (2.15)$$

$$A_j = \pi \left(1 - \frac{5y_c}{Rd}\right) \frac{d_j}{4} \quad (2.16)$$

$$\text{เมื่อ } 0 \leq y_c/Rd \leq 0.3$$

และ
$$\frac{\text{minor axis}}{\text{major axis}} = \frac{1}{4} \quad (2.17)$$

$$C_j = 2.24 d_j \quad (2.18)$$

$$A_j = \frac{\pi d_j}{16} \quad (2.19)$$

$$\text{เมื่อ } y_c/Rd > 0.3$$

4. สมการแสดงการเอ็นเทรน (E_ξ) ของของไหลรอบๆเข้าไปในของไหลที่เป็นเจ็ตของ Hirst [1971] เป็นไปดังสมการ (2.20) และ (2.21)

$$E_\xi = (a_3 + a_4 \frac{\xi}{d}) \rho d \left[(v_j - w_0 \sin \theta) + a_2 w_0 \cos \theta \right] ; \xi < \xi_e \quad (2.20)$$

$$E_\xi = a_1 \rho \frac{A_j}{C_j} \left[(v_j - w_0 \sin \theta) + a_2 w_0 \cos \theta \right] ; \xi \geq \xi_e \quad (2.21)$$

ซึ่งค่า $a_1 = 0.32\pi$, $a_2 = 6$, $a_3 = 0.007\pi$ และ

$$a_4 = [-a_3 + (a_1 A_{je} / d_{j0} C_{je})] / (\xi_e / d_{je})$$

และ ค่า ξ_e คือ ความยาวของระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของของไหลที่เป็นเจ็ตในบริเวณ potential core ประมาณค่าได้จากสมการของ Maruyama และ คณะ [1981] เป็นไปดังสมการ (2.22) และ (2.23)

$$\frac{\xi_e}{d} = 6.0 \exp(-4.4 / R) ; 1/R < 0.2 \quad (2.22)$$

$$\frac{\xi_e}{d} = 3.0 \exp(-0.86 / R) ; 1/R \geq 0.2 \quad (2.23)$$

Chen และ คณะ [1990] ได้ใช้สมการอนุพันธ์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าประกอบของความเร็วดตามแนวแกนหลัก ζ และแนวแกนรอง η ในสมการความต่อเนื่อง ดังสมการ (2.24)

สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial v_j}{\partial \xi} + \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} + \frac{\partial v_\eta}{\partial \eta} = 0 \quad (2.24)$$

โดยสมมติให้ของไหลเกิดการปั่นป่วนเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic turbulence) คือ มีขนาดของความเร็วในแนวแกนหลัก ζ และแนวแกนรอง η มีค่าเท่ากัน มีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.25) และ (2.26)

$$v_{\zeta}(\zeta, \xi) = k_{\zeta}(\xi)(\zeta - \zeta_0) \quad (2.25)$$

$$v_{\eta}(\eta, \xi) = k_{\eta}(\xi)(\eta - \eta_0) \quad (2.26)$$

$$\text{ซึ่ง } k_{\zeta}(\xi) = k_{\eta}(\xi) = -(\partial v_j / \partial \xi) / 2$$

รวมทั้งใช้สมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นและสมการการถ่ายเทอุณหภูมิ เพื่อสังเกตการกระจายตัวของความชื้นของโนเนนและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีอยู่ในก๊าซธรรมชาติผสม ตามระยะทางตามวิธีการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นเจ็ต ดังสมการ (2.27) และ (2.28)

สมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นและอุณหภูมิ :

$$v_j \frac{\partial Y_i}{\partial \xi} + v_{\zeta} \frac{\partial Y_i}{\partial \zeta} + v_{\eta} \frac{\partial Y_i}{\partial \eta} = D_i \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \eta^2} \right) \quad (2.27)$$

$$v_j \frac{\partial T}{\partial \xi} + v_{\zeta} \frac{\partial T}{\partial \zeta} + v_{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \right) \quad (2.28)$$

ซึ่ง D_i และ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของความร้อนและความชื้นตามลำดับ

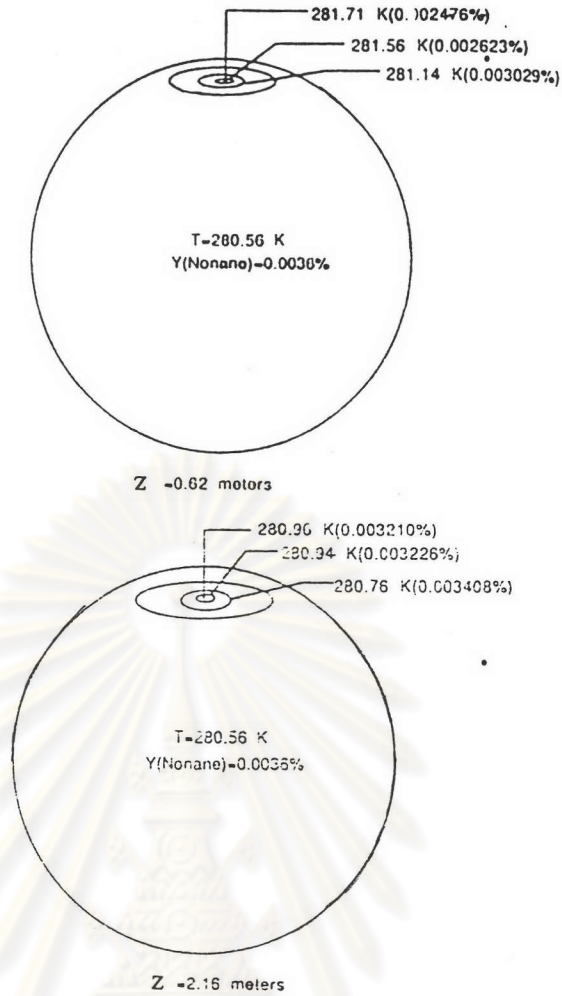
และทำการแก้สมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นและสมการการถ่ายเทอุณหภูมิ โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference) โดยผลที่ได้เป็นดังรูปที่ (2.19) แสดงการกระจายตัวของความชื้นของโนเนน และการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบภาคตัดขวางของท่อหลักที่ระยะทางด้านปลายทางการไหล (z) เท่ากับ 0.62 และ 2.16 เมตร พบว่า ผลที่ได้จากการทำนายใกล้เคียงกับผลที่ได้จากข้อมูลการทดลองของ Murthy และ Patel [1989] ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลของ Murthy และ Patel [1989]

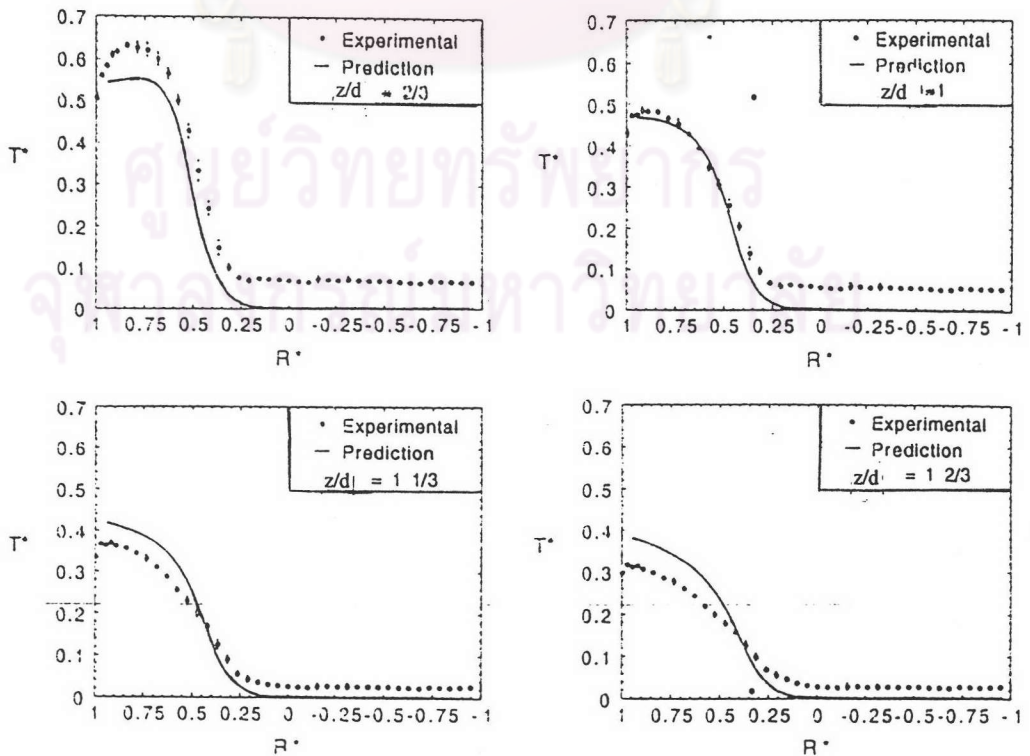
| Chen 1990 | | | Murthy and Patel [1989] | | |
|-----------|--------|-----------|-------------------------|--------|-----------|
| x,m | Tmax,K | Ymin,mol% | x,m | Tmax,K | Ymin,mol% |
| 0.62 | 281.71 | 0.00248 | 0.7 | 281.97 | 0.00206 |
| 2.16 | 280.96 | 0.00321 | 2.24 | 280.79 | 0.00318 |

Tang และ คณะ [1993] ได้ทำการทดลองและจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อหลักรูปทรงกระบอกที่ไม่มีฉนวนหุ้ม ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้างต่อท่อหลักเท่ากับ 0.15 และใช้อัตราส่วนความเร็วของของไหลที่เป็นเจ็ตต่อความเร็วของของไหลในสายของไหลหลักมีอยู่ในช่วง 0.44 ถึง 0.83 โดยให้อุณหภูมิของอากาศในท่อข้างสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศในท่อหลัก 7-10 องศาเซลเซียส และใช้ thermocouple เป็นเครื่องมือวัด รูปที่ (2.20) แสดงค่าอุณหภูมิในรูปไร้มิติ ($T^* = (T - T_0) / (T_j - T_0)$) เทียบกับระยะตามแนวรัศมีของท่อหลัก ในรูปไร้มิติ ($R^* = r/R$) ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 0.44 และที่ระยะทางด้านปลายทางการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อข้าง (z/d) เท่ากับ 2/3, 7/6, 5/3 และ 13/6 ตามลำดับ พบว่า ผลที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 แสดงการกระจายตัวของความเข้มข้นของโนนเนน และการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบภาคตัดขวางตามระยะทางด้านปลายทางการไหลที่เพิ่มขึ้น Chen และ คณะ [1990]



รูปที่ 2.20 แสดงค่าอุณหภูมิในรูปไร้มิติ เทียบกับ ระยะตามแนวรัศมีของท่อหลักในรูปไร้มิติตามระยะทางด้านปลายทางการไหลที่เพิ่มขึ้น Tang และ คณะ [1993]