

สมรรถนะของซูเปอร์โซนิกสตีมีอีเจกเตอร์พร้อมแนวทาง การวิเคราะห์การสูญเสียอย่างง่าย

Performance of Supersonic Steam Ejectors and A Simple Loss Analysis

ไชยณรงค์ จักรธรรณห์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
คลองหลวง ปทุมธานี 12121

มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาสมรรถนะของซูเปอร์โซนิกสตีมีอีเจกเตอร์ ที่มีนอซเซิลปฐมภูมิที่มีความเร็วที่ทางออกเลขมัคเท่ากับ 2 โดยใช้นอซเซิลสองลักษณะคือ ท่อตรงที่มีหน้าตัดคงที่และท่อตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างง่าย ผลการศึกษาพบว่าท่อผสมแบบท่อตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างง่ายจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าท่อตรงที่มีหน้าตัดคงที่ และระยะห่างการติดตั้งตำแหน่งที่เหมาะสมของนอซเซิลปฐมภูมิจากทางเข้าคอคอดของท่อผสมแบบท่อตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างง่ายจะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขมัค (Mach No.) ของนอซเซิลปฐมภูมิ

Abstract

This paper proposed the result of studying in performance of the supersonic steam ejectors as Mach No. of primary nozzle is 2.0 In the experiments used the two types of mixing tubes are the constant and simple variable cross sections. Tests found that the simple variable mixing tube gave the higher efficiency than the other. And the appropriated distances between the primary nozzle exit to the simple variable mixing throat that is depend on its Mach No.

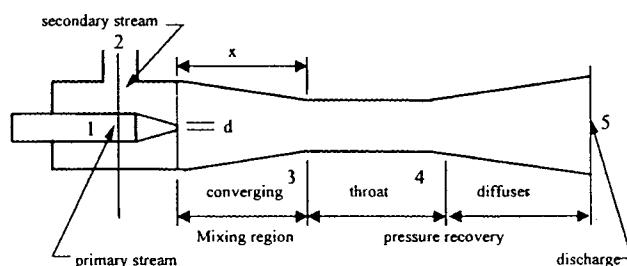
บทนำ

สตีมีอีเจกเตอร์เป็นอุปกรณ์เพิ่มความดันให้กับไอน้ำที่มีความดันต่ำ ตัวอย่างเช่น ไอน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะมีความดันต่ำ เมื่อนำมาผ่านสตีมีอีเจกเตอร์จะทำให้ได้ความดันสูงขึ้นหรือใช้ในการสร้างสุญญากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ต่างๆ โดยหลักการคือ จะใช้ไอน้ำความดันสูงไหลผ่านนอซเซิลเพื่อทำให้เกิดความเร็วสูง และความดันจะต่ำลงเพื่อเหนี่ยวนำเอาไอน้ำความดันต่ำให้เข้าไปผสมด้วยกันผ่านท่อผสม และทำให้ได้ความดันที่ต้องการนำไปใช้งาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะของสตีมีอีเจกเตอร์ เพื่อจะได้นำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของสตีมีอีเจกเตอร์ให้ดีขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ค่าอัตราส่วนของระยะห่างจากปลายทางออกของนอซเซิลปฐมภูมิกับคอของท่อผสมต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของนอซเซิลปฐมภูมิ (x/d) ดังรูปที่ 1 เลขมัคความเร็วของไอน้ำจากนอซเซิลปฐมภูมิ (M) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำโดยมวล (E_m) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลโดยมวลของของไหลทุติยภูมิต่อของไหลปฐมภูมิ ($\dot{m}_2 / \dot{m}_1$) และค่าอัตราส่วนการอัด (P_{01}/P_{02})

ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะดูผลของพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อผสมแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างง่ายกับแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

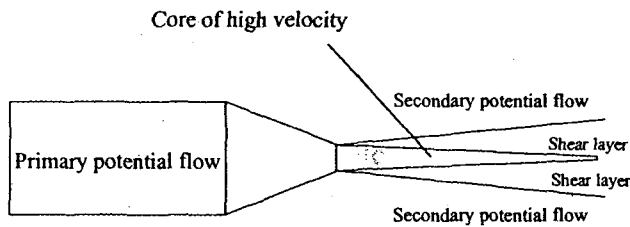
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสตีมีอีเจกเตอร์

ของไหลปฐมภูมิ (primary stream) ที่ไหลออกจากนอซเซิลปฐมภูมิ (primary nozzle) จะมีลักษณะเป็นเหมือนแท่งแกนความเร็วสูง โดยไหลที่แยกออกเป็นคลื่นชั้นจากกระแสของไหลทุติยภูมิ (secondary stream) ด้วยชั้นของแรงเฉือน (shear layer) ที่มีค่าสูงมาก

ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการผสมกันแบบปั่นป่วน (turbulence) ระหว่างชั้นของไหลทั้งสองกระแส โดยชั้นของแรงเฉือนจะมีขนาดโตมากขึ้นตามระยะในแนวแกนการไหลที่มากขึ้น [1,2]



รูปที่ 2 ชั้นของแรงเฉือนระหว่างของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิ

พิจารณาการไหลใน 1 มิติ จากสมการอนุรักษ์มวลเขียนได้เป็น

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_e \quad (1)$$

และจากกฎข้อที่ 1 และ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถนิยามประสิทธิภาพของสตีมอีเจกเตอร์ [3] ได้เป็น

$$\eta_a = 1 - \frac{\Delta s}{Em} \left[\frac{(1 + Em)^2}{\left(\frac{h_{o1} - h_{o2}}{T_r} \right) + (s_2 - s_1) + \Delta s \left(1 + \frac{1}{Em} \right)} \right] \quad (2)$$

เมื่อ

η_a = ประสิทธิภาพที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง

$\dot{m}$ = อัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำ

Em = อัตราส่วนอัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำ, $\dot{m}_2 / \dot{m}_1$

Δs = $s_{exp} - s_{ideal}$

s_e = เอนโทรปีทางออก

h_o = เอนทัลปีสแตกเนชัน

T_r = อุณหภูมิอ้างอิง

โดย η_a แสดงถึง ความสามารถที่จะนำงานที่เทียบจากสภาวะต่ำสุดของงานที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มาเปรียบเทียบกับงานที่ให้ ซึ่งแตกต่างจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่พิจารณางานที่ได้ทั้งหมดต่องานที่ให้เป็นประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ดังนั้นประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เท่ากับส่วนต่างของงานที่ได้ทั้งหมดกับงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงต่องานที่ให้ ในที่นี้จะพิจารณาที่สภาวะก่อนทางเข้าของไอน้ำทุติยภูมิเป็นสภาวะต่ำสุดเพื่ออ้างอิง ในทางกลับกันถ้าหากพิจารณาในรูปของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เราสามารถนิยามความดันรวมสูญเสียได้เป็น

$$Loss = \frac{P_{oi} - P_o}{P_{oi} - P_{o2}} \quad (3)$$

เมื่อ

P_o = ความดันสแตกเนชันที่ทางออก

P_{oi} = ความดันอุดมคติสแตกเนชัน

P_{o2} = ความดันสแตกเนชันของของไหลทุติยภูมิ

โดย loss ในสมการ (3) ให้ความหมายทางกายภาพคือถ้าหาก P_o มีค่าเข้าใกล้ P_{oi} แสดงว่าความดันสูญเสียน้อย Loss เข้าใกล้ค่า 0 ในทางตรงกันข้ามถ้าหาก P_o มีค่าเข้าใกล้ P_{o2} ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำที่สุดของระบบแสดงว่าเกิดความดันสูญเสียมากค่า Loss มีค่าเข้าใกล้ 1

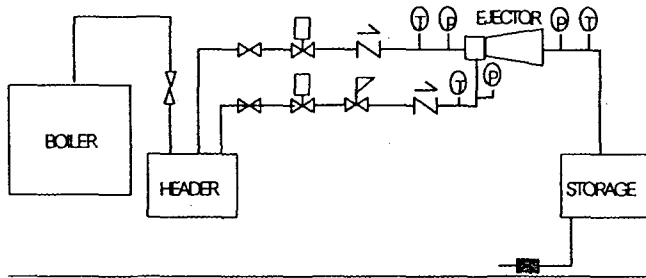
การติดตั้งชุดทดสอบ

จากรูปที่ 3 ไอน้ำถูกผลิตจากหม้อต้มไอน้ำที่สามารถผลิตไอน้ำได้ประมาณ 80 kg/hr ที่ความดัน 10 bar ส่งไอน้ำผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วไปยังถังต่อรวมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้วเพื่อเก็บไอน้ำก่อนถูกแยกเป็น 2 สาย สายแรกเป็นสายไอน้ำความดันสูงหรือไอน้ำปฐมภูมิ (primary steam) และสายที่สองเป็นสายไอน้ำแรงดันต่ำหรือไอน้ำทุติยภูมิ (secondary steam) แต่เนื่องจากทั้งสองสายไหลออกจากท่อร่วมเดียวกันทำให้ความดันภายในท่อของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงใช้วาล์วปรับแรงดัน (pressure regulator valve) ซึ่งติดตั้งต่อจากเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำเป็นตัวปรับลดแรงดันให้ได้แรงดันตามที่ต้องการในสายของไอน้ำทุติยภูมิ และสามารถปรับอัตราการไหลโดยมวลของแต่ละสายด้วย globe valve โดยเราจะทราบค่าอัตราการไหลโดยมวลได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำที่เป็นแบบ วอเทกมิเตอร์ (vortex meter)

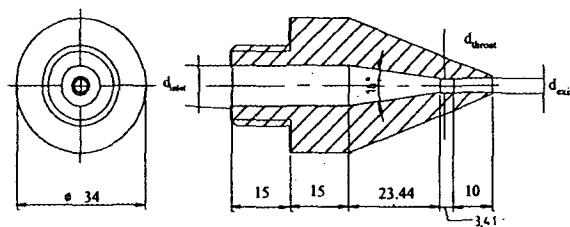
ในการทดลองจะกำหนดให้ความดันที่ทางเข้าของเซลล์มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง (7.1 bar) และทำการเปลี่ยนค่าความดันของไหลทุติยภูมิค่าต่างๆ เพื่อให้ได้อัตราส่วนความดันระหว่างของไหลปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ (7.1, 4.73 และ 3.55) ที่ระยะ x/d ต่างๆ (0, 5, 10 และ 15) แล้วทำการบันทึกค่าอัตราการไหลโดยมวล ความดันและอุณหภูมิที่แต่ละหน้าตัด โดยค่าความดันสามารถอ่านได้จากเกจความดัน ซึ่งเป็นแบบ bourdon gauge ช่วง 0 ถึง 10 bar สำหรับอ่านค่าความดันทางเข้าของสายปฐมภูมิ และทางออกของสตีมอีเจกเตอร์ และ ช่วง -30 mm Hg ถึง 10 bar สำหรับอ่านค่าความดันที่ทางเข้าของไอน้ำทุติยภูมิ ซึ่งอาจจะมีค่าความดันต่ำกว่า 0 บาร์เกจ ข้อเสียของชุดทดลองก็คือ ไอน้ำในสายปฐมภูมิและทุติยภูมิจากหม้อไอน้ำเดียวกันซึ่งมีความสามารถในการผลิตไอน้ำค่อนข้างต่ำทำให้การปรับอัตราการไหลในสายที่หนึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราการไหลและความดันในสายที่สอง เราสามารถปรับค่า x/d ได้จากชุดแกนปรับระยะ ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งทองเหลืองทรงกระบอกกลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มม. คงที่ตลอดแนวศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5

การทดลองจะทดสอบตัวแปรต่างๆ ดังนี้คือ ผลของระยะห่างของเซลล์ปฐมภูมิกับ mixing throat (x/d) 4 ระยะ คือที่ 0, 5, 10 และ 15 เมื่อความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเซลล์มีค่าเลขมัค

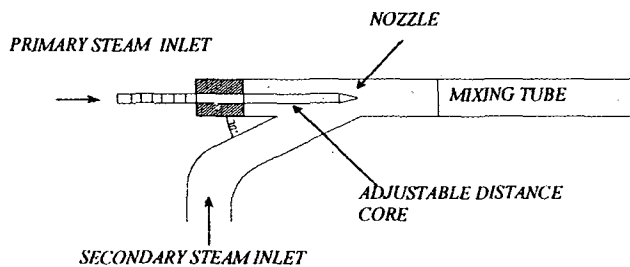
(M) เท่ากับ 2 แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแต่ละสภาวะดังแสดงในตารางที่ 1



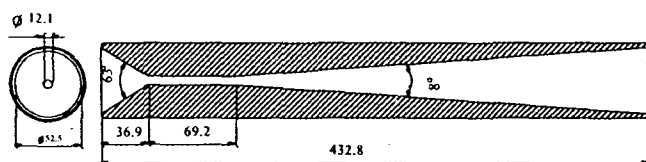
รูปที่ 3 โลหะการนำตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดทดสอบ steam ejector



รูปที่ 4 นอซเซิลปฐมภูมิ



รูปที่ 5 ชุดท่อผสม



รูปที่ 6 ท่อผสม (mixing tube) แบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง

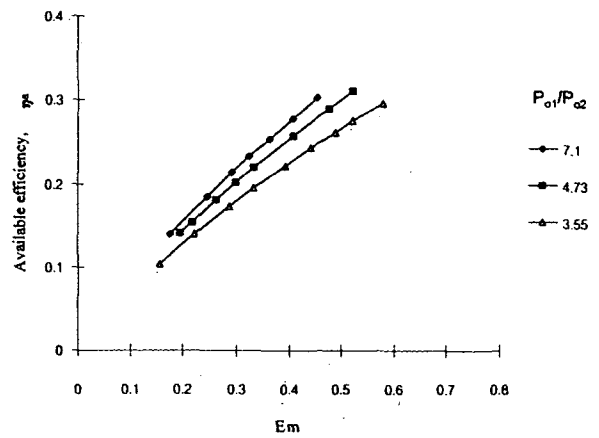
ตารางที่ 1 แสดงสภาวะที่ทำการทดสอบสตีมีอเจกเตอร์

Mach No.	P_{o1}/P_{o2}	x/d	Em
2	7.1	0	0-0.7
	4.7	5	
	3.55	10	
		15	

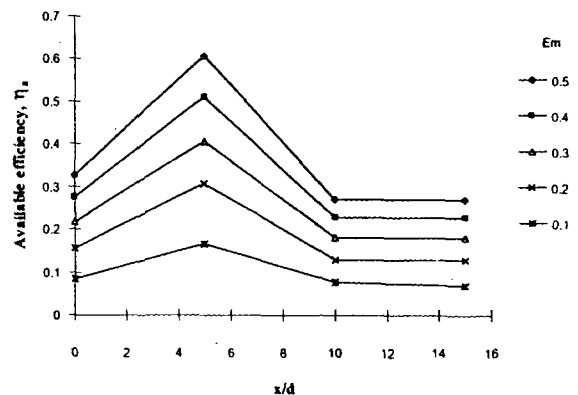
ผลการทดลอง

ในส่วนผลการทดลองนี้จะนำผลการนำเสนอออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก จะนำเสนอผลการทดลองของสตีมีอเจกเตอร์ที่ใช้กับท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด และส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลการทดลองของสตีมีอเจกเตอร์ที่ใช้กับท่อผสมแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ โดยในตอนท้ายจะนำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองของทั้งสองส่วน

จากการศึกษาผลของ Em ที่มีต่อประสิทธิภาพของสตีมีอเจกเตอร์ พบว่าประสิทธิภาพจะแปรผันตามค่า Em เมื่อ Em มีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพของสตีมีอเจกเตอร์ก็จะมีค่ามากขึ้น โดยที่ค่า $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$ ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเพราะเป็นสภาวะที่ P_{o1}/P_{o2} สอดคล้องกับเลขมัค 2 ทำให้ลดการเกิดคลื่นช็อกภายในระหว่างการผสม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ P_{o1}/P_{o2} ต่างๆ ที่ $M = 2$ $x/d = 5$

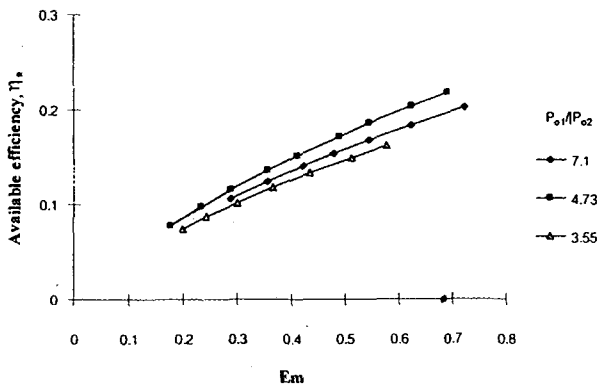


รูปที่ 8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสตีมีอเจกเตอร์ที่ Em ต่างๆ โดยใช้ท่อผสมแบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงทดสอบที่ $M = 2$ $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$

เมื่อดูผลของ x/d ที่มีต่อประสิทธิภาพของสตีมีอเจกเตอร์พบว่าระยะที่ต่างๆ จะให้ประสิทธิภาพไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 8 ซึ่งเปรียบเทียบ x/d 4 ระยะ พบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างมากในช่วงระหว่าง $x/d = 0$ ถึง $x/d = 10$ และจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงระหว่าง $x/d = 10$ ถึง 15 ซึ่งเป็นระยะที่อิทธิพลเนื่องจากความเร็วสูงของของไหลปฐมภูมิหมดไป และการทดลองพบว่าผลของ P_{o1}/P_{o2}

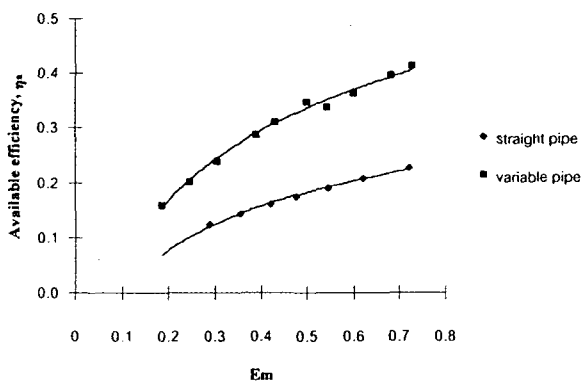
มีผลต่อประสิทธิภาพของสตีมีเจเนอเรตอร์น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ E_m และ x/d

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของสตีมีเจเนอเรตอร์เมื่อใช้ท่อผสมเป็นแบบหน้าตัดคงที่ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า E_m มากขึ้นพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อ E_m มากขึ้นและผลของ P_{o1}/P_{o2} ทั้งสามค่าให้ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพของสตีมีเจเนอเรตอร์ที่ใช้ท่อผสมที่เป็นแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ $M=2$

เมื่อนำกราฟประสิทธิภาพที่ได้จากข้อมูลการทดสอบท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดมาเปรียบเทียบกับท่อผสมแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่รูปที่ 10 พบว่าท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ประมาณ 20 % โดยการทดลองจะกำหนดให้ทั้งสองแบบมีขนาดความยาวเท่ากัน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อผสมแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงกับแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$

วิจารณ์

ถ้าหากทำให้การผสมกันระหว่างของไหลที่มีระดับความดันแตกต่างกันเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด (minimum loss) ก็จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยพารามิเตอร์อื่นนอกจากความดันทั้งสองค่าจะต้องผสมเข้าด้วยกันอย่างสอดคล้องแล้ว ยังขึ้นกับรูปร่างของท่อผสมอีกด้วย ดังเช่นในรูปที่ 8 ประสิทธิภาพที่ได้จากท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลง

หน้าตัดอย่างง่ายได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$ ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าท่อผสมที่มีหน้าตัดคงที่ แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากท่อผสมที่มีหน้าตัดคงที่จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ $P_{o1}/P_{o2} = 4.73$ ดังรูปที่ 9 ทั้งนี้เนื่องจากท่อผสมการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะลดลง (contraction) จะช่วยให้ของไหลทุกติถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น ส่งผลทำให้ผลต่างความเร็วของของไหลทั้งสองมีค่าน้อยลง ดังนั้นทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณชั้นของความเร็วกว่าที่แตกต่างกันมีค่าน้อยลงหรือความสูญเสีย (loss) น้อยลงนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการพรูปที่ 7 คือเมื่อ E_m มากขึ้นประสิทธิภาพก็สูงขึ้น หรืออธิบายได้ว่าการที่ E_m มากขึ้นหมายถึงอัตราการใช้ของไหลโดยมวลของของไหลทุกติจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งในการทดลองพื้นที่หน้าตัดทางเข้าของของไหลทุกติจะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าความเร็วของของไหลทุกติจึงมีค่าสูงขึ้น ทำให้ผลต่างความเร็วระหว่างชั้นทุกติกับชั้นปฐมภูมิมีค่าน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าแรงเฉือนระหว่างชั้นของของไหลมีค่าน้อยลงตาม

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของความดันแต่ละระยะตลอดความยาวของท่อผสมได้ดังนั้นจึงขอเสนอแบบจำลองง่ายเพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในท่อผสมนี้

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสตีมีเจเนอเรตอร์สามารถพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าน้อยลง หรืออยู่ในรูปของค่าความดันสูญเสีย (loss) สำหรับท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเราสามารถพิจารณาในรูปการสูญเสียแบบง่ายๆ โดยแบ่งการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้จาก 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการสูญเสียเนื่องมาจากบริเวณชั้นของแรงเฉือน ส่วนที่สอง เป็นการสูญเสียเนื่องจากของไหลไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และมีความเสียดทาน ส่วนที่สาม เป็นการสูญเสียเนื่องจากของไหลไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงและมีความเสียดทาน เมื่อพิจารณาการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากส่วนแรก เริ่มต้นที่หน้าตัดที่ของไหล 2 กระแสที่มีความเร็วแตกต่างกันสูงเริ่มผสมกันจนถึงบริเวณก่อนเข้าของท่อผสม จะเกิดความสูญเสียตรงส่วนที่ชั้นของของไหลทั้งสองสัมผัสกัน ซึ่งบริเวณนี้เนื่องจากมีความแตกต่างของความเร็วสูงมากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีสูง ตามสมการ (4) ของ Papamoschou [4] ซึ่งคำนวณจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

$$\frac{dS_{12}}{dx} \approx \frac{\tau_{ds1}}{T_1 T_2} \left[T_{avg} \Delta U + C_p \frac{(\Delta T)^2}{\Delta U} \right] \quad (4)$$

และจะได้
$$\psi = \exp\left(\frac{\dot{S}_{12}}{\dot{m}_{12} R_{12}}\right)$$

หรือ
$$\psi = \frac{P_{of}}{P_{oi}}$$

โดยที่

$$\dot{S}_{12} = \dot{S}_1 + \dot{S}_2$$

$$R_{12} = \left(\dot{m}_1 R_1 + \dot{m}_2 R_2 \right) / \left(\dot{m}_1 + \dot{m}_2 \right)$$

นำค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) แทนค่าเพื่อหาอัตราส่วนความดัน (ψ) ทำให้สามารถหาความดันในตำแหน่งถัดไปได้

โดย Brown and Roshko's (1974) ได้ให้ค่าประมาณสำหรับค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดชั้นแรงเฉือนแบบเทอร์บิวเลนต์ความหนาแน่นและความเร็วของทั้งสองกระแส และค่า c_r และประมาณได้ว่า $\tau_{dsi} \equiv \tau_{max}$ ดังนั้น

$$\tau_{max} = c_r \rho_{avg} (\Delta U)^2 \frac{U_{avg}}{U_c} f(Mc) \quad (5)$$

โดยที่ $f(Mc) \equiv 0.25 + 0.75e^{-Mc^2}$
เนื่องจากค่า convective velocity, U_c ซึ่งเป็นความเร็วที่สัมพันธ์กับความเร็วของทั้งสองกระแสหาได้จาก [5]

$$U_c = U_1 - (Mc_1) * a_1 \quad (6)$$

โดยที่

$$Mc_1 = \overline{Mc} - \frac{dMc}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2}}$$

$$\overline{Mc} = \frac{U_1 - U_2}{a_1 + a_2}$$

$$dMc = 1.5 \overline{Mc} - 0.4 \quad \text{เมื่อ } \overline{Mc} > 0.27$$

ซึ่ง

Mc = convective Mach No.

a = ความเร็วเสียง

แต่สมการ (4) เป็นการประมาณค่าที่สมภาวะที่ไม่มีผลคลื่นช็อกซึ่งในสมภาวะจริงถ้าหากความดันไม่สอดคล้องกันแล้ว จะทำให้เกิดคลื่นช็อกซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความสูญเสียความดัน [6]

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงภายในส่วนคอของท่อผสม

เมื่อรู้ค่า P_0 , T_0 , เลขมัค และความยาวของความยาวส่วนคอของท่อผสม กำหนดสมมติฐานในสมภาวะนี้เป็น

- 1) การไหลแบบคงตัว
- 2) ความเร็วของการไหลเท่ากันตลอดหน้าตัดนั้นๆ
- 3) แรงกระทำต่อวัตถุ, $F_{xb} = 0$
- 4) เป็นการไหลแบบอะไดบาติก, $\dot{\theta} = 0$
- 5) $\dot{W}_{shear} = \dot{W}_{other} = 0$
- 6) $\dot{W}_s = 0$
- 7) ไม่คิดผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง

จะได้สมการการไหลของไหลแบบอัดตัวได้ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่คงที่แบบมีความเสียดทาน เนื่องจากท่อผสมทำจากวัสดุทองเหลืองซึ่งให้ค่า $\epsilon = 76.2 \times 10^{-4}$ [7] จาก Moody chart $\bar{f} = 0.0175$ เพราะฉะนั้นสมภาวะที่หน้าตัดทางออกจากส่วนคอของท่อผสม

$$\frac{P_{04}}{P_{03}} = \frac{M_3}{M_4} \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M_4^2}{2 + (\gamma - 1)M_3^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

การคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในดิฟฟูเซอร์สมมติฐานคือ

1. เป็นกระบวนการอะไดบาติก $T_4 = T_5$
2. ไม่เกิดการแยกชั้นของของไหลและไม่เกิดการหมุนวน
3. การไหลแบบพัฒนาเต็มและความเร็วของของไหลสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด
4. ไม่เกิดคลื่นช็อกตลอดการไหล
5. การไหลแบบคงตัว
7. อนุรักษ์อัตราการไหลโดยมวล
8. ไม่เกิดแรงจุดภายในท่อ

สมการการไหลผ่านดิฟฟูเซอร์ที่มีความเสียดทานโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขมัคและพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง

$$\frac{dM^2}{M^2 dx} = \frac{2\phi}{1 - M^2} \frac{dA}{A dx} + \frac{\gamma M^2 \phi}{1 - M^2} \left(\frac{4f}{D} \right) \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } \phi = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$

$$A(x) = \frac{\pi}{4} (a + bx)^2$$

จากสมการความต่อเนื่องของมวล $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ ดังนั้น

$$\frac{P_5}{P_4} = \frac{A_4 M_4}{A_5 M_5} \sqrt{\frac{T_5}{T_4}} \quad (9)$$

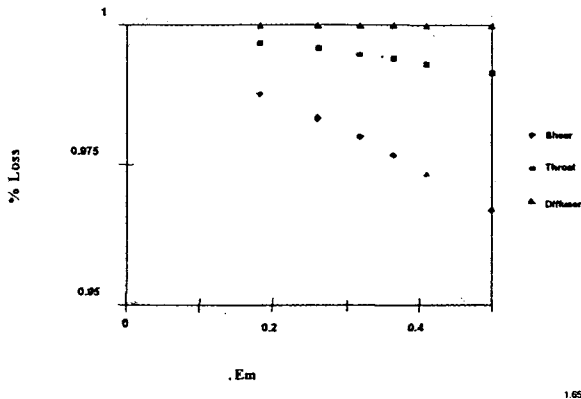
$$U_5 = M_5 (\gamma R T_5)^{1/2} \quad (10)$$

สำหรับความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนที่สองและส่วนที่สามจะเกิดเนื่องจากของไหลไหลเข้าไปในท่อที่มีพื้นที่ที่มีความเสียดทานเนื่องจากผนังของท่อผสมที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ [6] และพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น [8,9] ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจากทั้งสามส่วนจะเห็นว่า ความดันสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดจากส่วนแรกมากที่สุด ดังรูปที่ 12

และสำหรับท่อผสมที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่แล้วจะพิจารณาค่าความดันสูญเสียเกิดขึ้นเฉพาะจากสองส่วนแรกเท่านั้นโดยความดันสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในส่วนแรก

จากแบบจำลองการสูญเสียอย่างง่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของท่อของผสมสตีมีโอเจคเตอร์ จะเห็นว่าทั้งท่อผสมแบบหน้าตัดคงที่และแบบหน้าตัดเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างง่ายความดันสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนแรก ดังรูปที่ 12 ซึ่งเป็นส่วนของไหลทั้งสองกระแสมีความเร็วแตกต่างกันมากเข้ามาผสมกัน โดยเราสามารถหาค่าประมาณของความดันที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านบริเวณดังกล่าวได้จากสมการ (4) ถึง (6) และจากสมการที่ (5) พบว่า τ_{max} เป็นฟังก์ชันของความเร็วของของไหลทั้งสอง ดังนั้นถ้าหากของไหลทั้งสองมีความเร็วแตกต่างกันมากเท่าไรก็ทำให้ได้ τ_{max} มากขึ้นตาม แต่จากสมการที่

(4) ในแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ผู้วิจัยไม่ได้รวมผลอันเกิดเนื่องจากคลื่นช็อกเข้าไปในสมการของแบบจำลองด้วย ซึ่งการเกิดคลื่นช็อกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพพลดต่ำลง เช่น จังรูปที่ 9 มีค่าความดันไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นประสิทธิภาพที่ได้จาก $P_{01}/P_{02} = 4.73$ จะมีค่ามากกว่า $P_{01}/P_{02} = 7.1$



รูปที่ 12 แสดงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วน

สำหรับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนที่ 2 และ 3 จะมีค่าน้อยลงตามลำดับเมื่อเทียบกับส่วนแรก ส่วนที่ 2 และ 3 ความสูญเสียเป็นความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน โดยค่าความสูญเสียแปรผันตรงกับความเร็วยกกำลังสอง ดังนั้นเมื่อ Em มากขึ้นความเร็วมากขึ้นทำให้ค่าความสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตาม แต่เมื่อรวมผลของความสูญเสียจากทุก ๆ ส่วนแล้วประสิทธิภาพจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ Em มีค่ามากขึ้น

นอกจากตัวแปรที่นำเสนอแล้วประสิทธิภาพของสตีมีอีเจกเตอร์ยังอาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ อีกด้วยเช่น รูปร่างของท่อผสม ความเร็วเลขมัคที่ใช้ ฯลฯ

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าค่า x/d มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมกันของของไหล สำหรับสตีมีอีเจกเตอร์ที่ใช้ท่อผสมแบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงที่ $x/d = 5$ เมื่อ $P_{01}/P_{02} = 7.1$ จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างท่อผสมที่เป็นแบบหน้าตัดคงที่กับแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดพบว่า ท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 20 % ส่วนสำหรับท่อผสมแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ $P_{01}/P_{02} = 4.73$ จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด

จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการสูญเสียพบว่าค่าความดันสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในส่วนเริ่มต้นของการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองซึ่งมีความเร็วเริ่มต้นแตกต่างกันมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณกรมส่งเสริมและพัฒนาพลังงานแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณบางส่วนในงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ข้อคิดเห็น เสนอแนะ

แนวทางและความเอาใจใส่เป็นอย่างดี สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ และ รศ.ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและความเห็นต่างๆ ในงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hickman, K. E., Hill P. G. and Gilbert U. B., (1972), Analysis and Testing of Compressible Flow Ejector With Variable-Area Mixing Tubes, *Journal of Basic Engineer*, June, pp. 407-416.
- [2] Kurtz, E. F., (1976), Theoretical Model for Predicting Steam-Ejector Performance, *Journal of Engineering for Industry*, March, pp. 645-651.
- [3] Van Wylen, J. G. and Sonntag, E.R., (1973), *Fundamental of Classical Thermodynamics*, 2nd ed., USA.
- [4] Papamoschou, D., (1994), Model of Entropy Production and Pressure Variation in Confined Turbulent Mixing, *AIAA Journal*, September, pp. 1643-1650.
- [5] Papamoschou, D. and Bunyajitradulya A., (1997), Evolution of Large Eddies in Compressible Shear Layers, *Phys Fluid* 9(3), pp. 756-765.
- [6] Anderson, D. J., (1990), *Modern Compressible Flow*, 2nd ed., McGraw-Hill.
- [7] Burmeister, *Convective heat transfer*, McGraw-Hill.
- [8] Hodge, B. K and Koenig, K., (1995), *Compressible Fluid Dynamics*, Prentice-Hall.
- [9] Shapiro, H. A., (1953), *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow Volume I*, The Ronald Press Company.