

บทที่ 3

ทฤษฎี

กล่าวนำ

อีเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปความดันสูงให้เป็นพลังงานจลน์ในรูปของความเร็วสูง และความเร็วสูงของไอน้ำที่ออกจากนอซเซิลเป็นของไหลขับดัน (motive fluid) จะทำหน้าที่นำพาเอาของไหลที่ความดันต่ำกว่าดูดเข้าไปในส่วนของช่องของการผสมซึ่งผลผลิตที่ได้ของกระแสที่ถูกผสมอย่าง uniform จะถูกนำพาไปด้วยความเร็วที่มีค่าต่ำลง โดย diffuser เป็นส่วนที่จะทำให้ความเร็วของของไหลที่ผสมนี้มีค่าลดลงโดยทีละน้อย ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่ทำการเปลี่ยนพลังงานจลน์ในรูปของความเร็วให้เป็นความดันที่สูงขึ้นเมื่อปล่อยออก

อีเจคเตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนแรก converging nozzle สำหรับรับของไหลกระทำกับ jet หรือ expanding nozzle สำหรับ jet ที่กระทำกับก๊าซ ส่วนที่สองคือ diffuser (ส่วนที่เป็น converging-diverging , บางครั้งเรียกว่า tail หรือ venturi) และส่วนที่ยึดส่วนเหล่านี้ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

โดยการออกแบบอีเจคเตอร์นี้จะไม่ขึ้นส่วนที่จะเคลื่อนที่เลย ทำให้ตัดผลความเสียหายหรือการสึกหรอเนื่องจากชิ้นส่วนต้องเคลื่อนที่เช่นปั๊มต่างๆไป และนอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบปั๊มอีกข้อหนึ่งคือ ไม่จำเป็นจะต้องมีการหล่อลื่น (lubrication) เพราะผลของการไม่มีการเสียดสีของชิ้นส่วน วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนของอีเจคเตอร์สามารถทำจากโลหะ (metallic) และอโลหะ (non-metallic) เพื่อต้านทานการสึกหรอและหรือการกัดกร่อนของชิ้นส่วนเมื่อต้องได้รับความเร็วและความร้อนสูง

การออกแบบอีเจคเตอร์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องคำนึงถึงอยู่หลายตัวเช่น การกำหนดสภาวะความดันของการผสม อุณหภูมิ วัสดุที่เลือกใช้ อัตราการไหล เป็นต้น โดยเฉพาะอัตราการไหลซึ่งเป็นตัวแสดงถึงตำแหน่งที่จะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

ในขั้นตอนของการศึกษาเพื่อทำการออกแบบหรือวิจัยอีเจคเตอร์นี้จำเป็นจะต้องอาศัยพื้นฐานทางการคำนวณทางวิศวกรรมหลายอย่างเช่น thermodynamics, fluid mechanics และ heat transfer ซึ่งในการคำนวณจริงค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนมากถ้าหากจะพิจารณาของไหลเป็นสภาวะการไหลจริง ดังนั้นเพื่อช่วยในการศึกษาในขั้นต้นให้ง่ายขึ้นจึงพิจารณาของไหลเป็นแบบของไหลอุดมคติ (Ideal fluid), newtonian fluid และการไหลแบบลามินาร์ ซึ่งในการศึกษาจะใช้กฎของการอนุรักษ์ต่าง ๆ มาคำนวณเช่น

1. Continuity equations, Conservation of mass
2. Momentum equations, Navier stoke's equations (Newton's second law)
3. Energy equation
4. Second Law of Thermodynamics

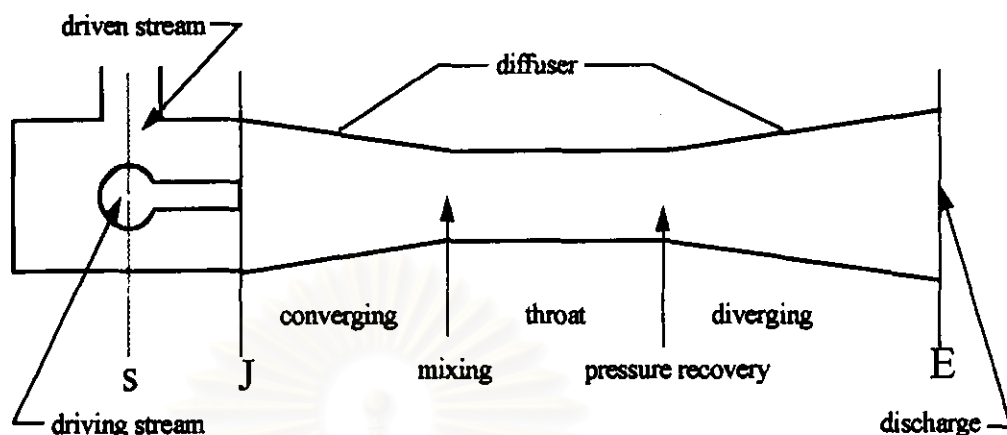
ซึ่งในการศึกษาจะไม่คำนึงถึง conservation of species และ laws of chemical reaction และการศึกษาในขั้นต้นนี้จะพิจารณาการไหลเป็นแบบ 1 มิติ (1 dimensions)

สมมติฐานเบื้องต้น

1. Steady flow, $\frac{d}{dt} = 0$
2. Uniform flow ที่หน้าตัดทางเข้าและหน้าตัดทางออก
3. ของไหลที่ผสมมีคุณสมบัติในรูปของก๊าซอุดมคติ
4. ของไหลทั้งสองผสมกันอย่างสมบูรณ์ที่หน้าตัดทางออก
5. ไม่คำนึงถึงความเค้นเฉือนที่ผนังของอุปกรณ์
6. สมมติว่าเป็นการไหลแบบไม่มีความร้อนถ่ายเทผ่านผนังอุปกรณ์ (adiabatic process)

3.1 สมการทั่วไปสำหรับอีเจคเตอร์

อีเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนพลังงานชนิดหนึ่ง โดยพลังงานของกระแสของของไหลที่ขับเคลื่อนจะถูกส่งผ่านไปยังกระแสของของไหลที่ถูกขับ โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะถูกสมมติว่าประกอบขึ้นด้วยการผสมและการถ่ายเทความร้อน สภาวะของของไหลที่ผสมกันแล้วที่ถูกปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันของสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ รูปทรง การไหล และของไหล



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบหลักและระนาบหน้าตัดของอ็เจกเตอร์

โดยทั่วไปอ็เจกเตอร์จะเป็นดังรูป 3.1 อุปกรณ์จะประกอบด้วย diffuser ซึ่งเป็นส่วนประกอบของอ็เจกเตอร์ที่ของไหลความดันสูง (ของไหลขับเคลื่อน) และของไหลความดันต่ำ (ของไหลถูกขับ) ไหลผ่านไอเซนทรอปิกนอซเซิล และต่อจากนั้นจะเกิดการผสมกันของของไหลแล้วจะถูกปล่อยออกมาที่ระนาบ E โดยระนาบที่ของไหลทั้งสองสัมผัสกันครั้งแรกเรียกว่าระนาบทางเข้า J และขอบเขตที่ของไหลทั้งสองมีสภาวะเป็น stagnation คือระนาบ S diffuser ดังนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 บริเวณคือ บริเวณของการผสม (mixing), คอ (throat) และ ขอบเขตของความดันกลับคืน (pressure recovery zones) ดังรูปที่ 3.1

เมื่อพิจารณาอ็เจกเตอร์ให้เป็นรูปแบบอย่างง่าย คือให้เป็นการไหลคงตัวแบบสมดุล (equilibrium steady flow) เมื่อใช้ปริมาตรควบคุม (control volume) ล้อมรอบรูปของกระบวนการต่างๆ ดังรูป 3.2 จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) ได้เป็น

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_e \quad (3.1)$$

โดยที่

- \dot{m}_1 = อัตราการไหลของมวลของของไหลขับเคลื่อน, kg/s
- \dot{m}_2 = อัตราการไหลของมวลของของไหลถูกขับเคลื่อน, kg/s
- \dot{m}_e = อัตราการไหลของมวลของของไหลที่ผสม, kg/s

และเมื่อสมมติให้เป็นกระบวนการแบบ adiabatic สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้เป็น

$$\dot{m}_1 h_{01} + \dot{m}_2 h_{02} - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_{0e} = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่

h_{01} = เอนทัลปีของของไหลขั้วตันที่ stagnation, kJ/kg

h_{02} = เอนทัลปีของของไหลถูกขั้วที่ stagnation, kJ/kg

h_{0e} = เอนทัลปีของของไหลผสมที่ stagnation, kJ/kg

และเมื่อเขียนอยู่ในรูปของการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีในระบบจะได้

$$\dot{m}_1 (s_{0s1} + \Delta s) + \dot{m}_2 (s_{0s2} + \Delta s) - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) s_{0e} = 0 \quad (3.3)$$

โดยที่

s_{01} = เอนโทรปีของของไหลขั้วตันที่ stagnation, kJ/kg/K

s_{02} = เอนโทรปีของของไหลถูกขั้วที่ stagnation, kJ/kg/K

s_{0e} = เอนโทรปีของของไหลผสมที่ stagnation, kJ/kg/K

Δs = เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง, kJ/kg/K

เมื่อคูณสมการ (3.3) ด้วยค่าอุณหภูมิใดๆ T_r และบวกเข้ากับสมการ (3.2) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 h_{01} + \dot{m}_2 h_{02} - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_{0e} \\ - T_r \left[\dot{m}_1 (s_{01} + \Delta s) + \dot{m}_2 (s_{02} + \Delta s) - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) s_{0e} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงของของไหล, K

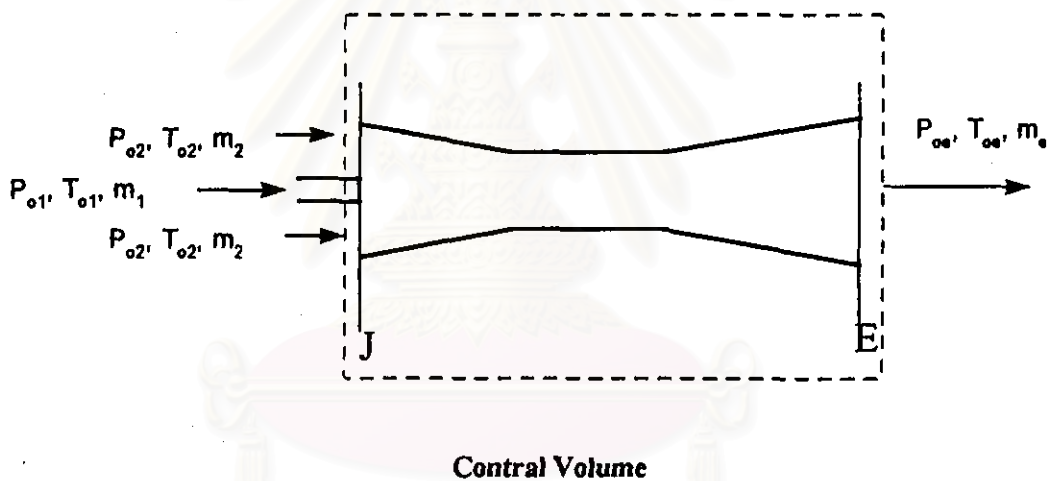
ซึ่งอาจจะแสดงให้เห็นได้ว่าสมการ (3.4) สมมูลกับสมดุลพลังงาน (available-energy balance) บนปริมาตรควบคุม (control volume)

$$\Phi_{01} + \Phi_{02} = \Phi_{0e} + \Delta\Phi \quad (3.5)$$

โดยที่

Φ = พลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ (available-energy)

$$\Phi = H - T_0 S \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.2 รูปปริมาตรควบคุม (control volume) ของอีเจกเตอร์ซึ่งแสดงเส้นทางการไหลของพลังงาน

โดยสภาวะที่ปล่อยออกสำหรับอุปกรณ์สามารถจะกำหนดในเทอมของสภาวะทางเข้าและ Δs

$$\dot{m}_e = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (3.7)$$

$$h_{0e} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_{01} + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_{02} \quad (3.8)$$

$$s_{0e} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} [s_{01} + \Delta s] + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} [s_{02} + \Delta s] \quad (3.9)$$

ดังนั้นถ้ารู้ค่า Δs สภาวะที่ทางเข้าและทางออก อัตราการไหลของของไหลทั้งสอง ก็จะสามารถหาสมรรถนะของอีเจคเตอร์ได้ ถ้าอีเจคเตอร์ถูกสมมติว่าเป็นอุดมคติ ตัวอย่างเช่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีแล้ว ($\Delta s = 0$) กำหนดให้อัตราส่วนการไหลเป็น E_m

$$E_m = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (3.10)$$

สภาวะที่ทางออกอาจจะเขียนได้เป็น

$$h_{0e} = \frac{1}{1 + E_m} h_{0c} + \frac{E_m}{1 + E_m} h_{0c} \quad (3.11)$$

$$s_{0e} = \frac{1}{1 + E_m} s_{01} + \frac{E_m}{1 + E_m} s_{02} \quad (3.12)$$

ถ้าของไหลทั้งสองเป็นของไหลชนิดเดียวกันแล้วจะได้ว่า

$$P_{0e} = P(h_{0e}, s_{0e}) \quad (3.13)$$

$$T_{0e} = T(h_{0e}, s_{0e}) \quad (3.14)$$

$$v_{0e} = v(h_{0e}, s_{0e}) \quad (3.15)$$

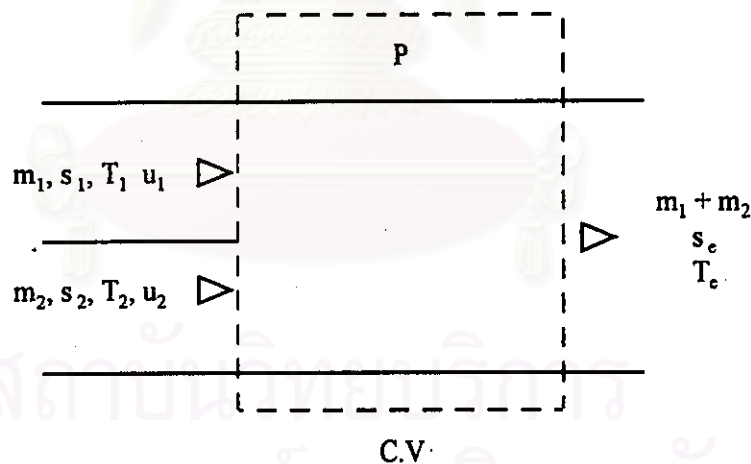
ซึ่งฟังก์ชัน $P(h,s)$, $T(h,s)$ และ $v(h,s)$ เป็นรูปแบบของสมการสถานะของของไหลและขึ้นอยู่กับเพียงคุณสมบัติของของไหล

ถ้าพิจารณาเป็นแบบอุดมคติคือไม่มีการสูญเสียใดๆ เกิดขึ้นในระบบจะได้กระบวนการผสมที่สามารถย้อนกลับมาได้ ก็คือการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีสุทธิในระบบมีค่าเป็นศูนย์ ขั้นตอนสามารถพิจารณาได้ว่าของไหลสองกระแสเป็นของไหลชนิดเดียวกันที่ความดันเดียวกันแต่มีค่าเอนโทรปีต่างกันระหว่างไหลและผสมมาด้วยกันดังรูป 3.2 เมื่อพิจารณาเป็นแบบการไหลคงตัวทำให้ไม่ต้องคิดคำนึงถึงความเสียดทานขณะเข้าที่ความดันและความเร็วเท่ากันดังรูป 3.3

ความต้องการความเร็วเท่ากันเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงเหตุผลหนึ่งของความไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversibility) ในอีเจกเตอร์จริงเมื่อความเร็วของการไหลมีเข้าอุปกรณ์มีค่าไม่เท่ากัน

สมการหาสมรรถนะของอีเจกเตอร์ไม่ได้ใช้กับอีเจกเตอร์แบบอุดมคติดังสมการ (3.11) และ (3.15) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถย้อนกลับได้ อีเจกเตอร์แบบอุดมคตินี้ใช้สำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะของอีเจกเตอร์จริง ซึ่งไม่สามารถย้อนกลับมาได้ที่เกิดขึ้นและบางที่ใช้เป็นการอ้างอิงเพื่อหาประสิทธิภาพของอีเจกเตอร์

สมรรถนะของอีเจกเตอร์จะมีค่าลดลงเมื่อเกิดค่า Δs ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามแต่ละรูปทรง สภาวะของของไหลและรูปแบบของการไหลนั้นๆ เพื่อที่จะหาค่าการสูญเสียหรือความไม่สามารถย้อนกลับได้รวมอยู่ในเทอมของ Δs ในลักษณะการไหลของของไหลจริงในอุปกรณ์จะต้องการรายละเอียดว่าความไม่สามารถย้อนกลับได้เกิดขึ้นได้อย่างไรและเกิดที่ใดโดยกลไกหรือกระบวนการอะไรทำให้เกิดขึ้น สิ่งเหล่านี้จะต้องสร้างสมมติฐานหรือแบบจำลองลักษณะการไหลในอุปกรณ์ขึ้น

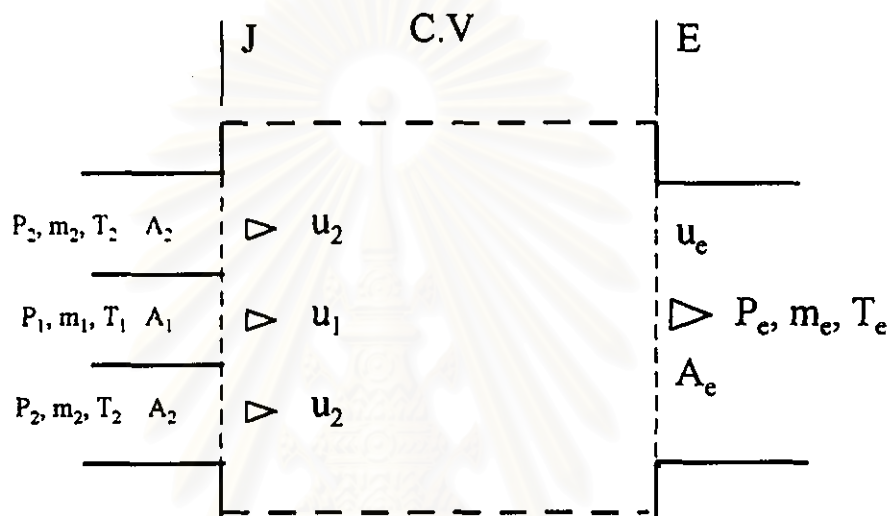


รูปที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์การไหลแบบคงตัว (steady flow) สำหรับการผสมกันของของไหลที่สภาวะที่แตกต่างกันเข้าปริมาตรควบคุม (control volume) ที่ความเร็วที่เท่ากัน

สำหรับ Δs อาจจะเขียนในรูปฟังก์ชันของตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta s = \Delta s(P_{01}, T_{01}, P_{02}, T_{02}, m_1, m_2, P_{0e}, T_{0e}) \quad (3.16)$$

เพื่อที่จะหาค่า P_{0e} และ T_{0e} ดังนั้น Δs อาจจะเขียนอยู่ในเทอมของสภาวะทางเข้าและรูปทรงเมื่อพิจารณารูป 3.4 จะเห็นได้ว่าสามารถหาค่า Δs ได้จากรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์



รูปที่ 3.4 รูปปริมาตรควบคุมถูกจำกัดขอบเขตโดยระนาบทางเข้าและทางออกซึ่งแสดงตัวแปรที่เพิ่มขึ้นเพื่อเขียนอยู่ในรูปสมการทั่วไป

จากรูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมและสมการของความต่อเนื่องจะเขียนได้เป็น

$$m_1 + m_2 = m_e \quad (3.17)$$

และสมการโมเมนตัมเขียนได้เป็น

$$P_j A_{j1} + m_1 u_{j1} + P_{j2} A_{j2} + m_2 u_{j2} = P_e A_e + m_e u_e + F \quad (3.18)$$

โดยที่

P = ความดันของของไหล, Pa

- A = พื้นที่หน้าตัด, m^2
 u = ความเร็วของของไหล, m/s
 F = แรงที่กระทำบนปริมาตรควบคุม, N/m^2

สมการพลังงานเขียนได้เป็น

$$\dot{m}_1 \left[\frac{u^2}{2} + h \right]_1 + \dot{m}_2 \left[\frac{u^2}{2} + h \right]_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left[\frac{u^2}{2} + h \right]_e \quad (3.19)$$

h_{0e} อาจจะเขียนในรูป

$$h_{0e} = h_{0e}(u_1, h_1, u_2, h_2, \dot{m}_1, \dot{m}_2) \quad (3.20)$$

ซึ่ง

$$h_{0e} = \left[\frac{u^2}{2} + h \right]_e$$

สมมติว่า u_e มีค่าน้อย และอาจจะหาค่า P_e ได้จาก

$$P_e = P_e(P_1, u_1, \dot{m}_1, P_2, u_2, \dot{m}_2, F) \quad (3.21)$$

เราอาจจะเขียนอยู่ในรูปของเอนโทรปี ถ้ากระบวนการจากหน้าตัดทางเข้าไปยังหน้าตัดทางออกเป็นแบบไอเซนโทรปิก (isentropic process)

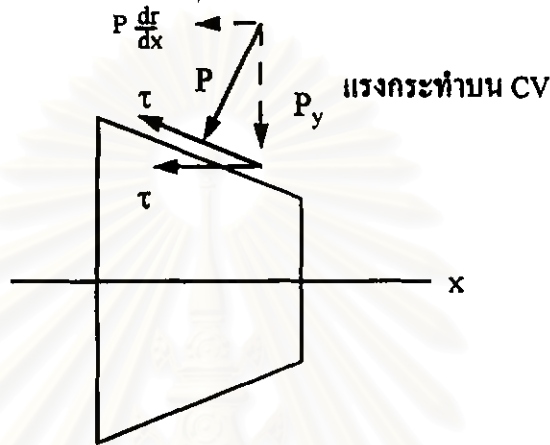
$$s_{01} = s(P_1, T_1) \quad ; \quad s_{02} = s(P_2, T_2)$$

$$s_{0e} = s_e(P_e, T_{0e})$$

แรงกระทำ F เป็นแรงรวมที่กระทำตามแนวแกน x โดยรวมผลแรงของกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์และผลของรูปร่าง และแรง F เป็นการอินทิเกรตขอบเขตทั้งหมดของของไหลที่เกิดขึ้นในอีเจกเตอร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแรง F จะรวมเทอมของการอินทิเกรตของ local shear stress และ wall pressure ซึ่ง τ เป็น local wall shear stress

$$F = \int \left[\tau(x) + P(x) \frac{dr}{dx} \right] 2\pi r(x) dx \quad (3.22)$$

ซึ่ง $\frac{dr}{dx}$ เป็นองค์ประกอบของ P ที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างทีละน้อย



องค์ประกอบในแนวแกน $\frac{dr}{dx}$ มีค่าน้อยๆ

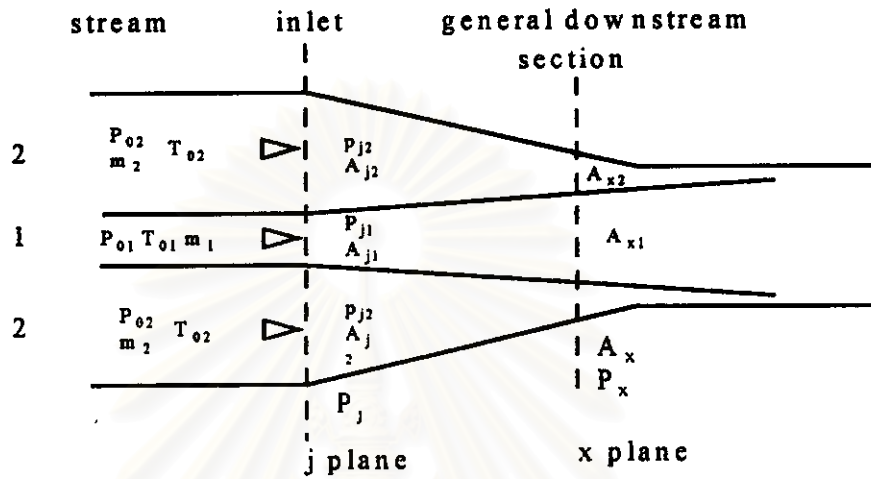
รูปที่ 3.5 รูปปริมาตรควบคุมถูกจำกัดขอบเขตโดยระนาบทางเข้า ทางออกและรูปร่างของดิฟเฟอเรนเชียล แสดงตำแหน่งของแรงรูน (thrust) และเพิ่มตัวแปร $P(x), \tau(x)$ และของประกอบในแนวแกน

ผลของการใช้ (choking) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของความสามารถในการอัดตัวได้ของของไหล สำหรับการประมาณผลของการใช้และการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลอาจจะตัดทิ้งได้เมื่อถูกพิจารณาเป็นแบบ isentropic non-mixing stream ในอุปกรณ์ รวมทั้งสมมติฐานที่กำหนดเป็นการไหลคงตัวแบบอะไดบาติก (adiabatic steady flow) และเป็นก๊าซอุดมคติที่เป็นแบบการไหลมิติเดียวในอุปกรณ์

สถานะเริ่มต้นที่ระนาบสัมผัส (j) รูปที่ 3.6 เราจะกำหนดให้เป็น

	driving fluid	driven fluid
mass flow rate	\dot{m}_1	\dot{m}_2
static pressure	P_{j1}	P_{j2}

area	A_{j1}	A_{j2}
stagnation pressure	P_{01}	P_{02}
stagnation temperature	T_{01}	T_{02}



รูปที่ 3.6 รูปจำลองการไหลแบบอุดมคติของของไหลที่ไม่ผสมกันซึ่งแสดงตัวแปรของระนาบทางเข้าและระนาบทั่วไป , ระยะ x , ระนาบของ downstream

สำหรับของไหลแต่ละชนิดในที่นี้จะกำหนดให้ค่าคงที่ของก๊าซ R และอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (specific heat) γ มีค่าเท่ากัน และสมมติการไหลเป็นแบบคงตัว, อะไดบาติก, ไอเซนทรอปิก และ ก๊าซอุดมคติ โดยพื้นที่ในหนึ่งมิติของกระแสไหลต่างๆ ไปอาจจะกำหนดที่ระยะ x จากรูป 3.6 จะหาพื้นที่หน้าตัดของแต่ละกระแสโดยการพิจารณาของไหลทั้งสองกระแสไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะสามารถหาพื้นที่ได้จากสมการ (3.23) แล้วนำพื้นที่ที่หาได้ของแต่ละกระแสมารวมกัน เพื่อเป็นพื้นที่หน้าตัดรวมของอุปกรณ์ที่ระยะทาง x ใดๆ ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการชดเชยผลของ boundary layer ที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้ effective area ลดลง

จากสมการ continuity equation สามารถอยู่ในรูปของ $\frac{\dot{m}}{A}$ ให้อยู่ในของ $P_0, T_0, Mach$ No. ได้คือ (Haluk, 1994)

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho V = \frac{PV}{RT}$$

โดยแทน $a = \sqrt{\gamma RT}$ และ $M = v/a$ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{\dot{m}}{A} &= \frac{PV}{RT} = \frac{\sqrt{\gamma}PV}{\sqrt{\gamma}RT\sqrt{RT}} = \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} PM \sqrt{\frac{T_0}{T}} \\ &= \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} PM \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}\end{aligned}\quad (3.23)$$

สมการนี้ใช้สำหรับกระบวนการแบบ adiabatic หรือ isentropic flow ซึ่ง static pressure, P อาจแทนด้วยความสัมพันธ์ของ isentropic ซึ่งจะได้เป็น

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} P_0 M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \quad (3.24)$$

กำหนดให้	γ	= 1.33
	R	= 462 J/kg K.
	A	= พื้นที่, m^2
	\dot{m}	= mass flow-rate , kg/sec
	T_0	= stagnation Temperature , Kelvin
	M	= Mach No.
	P_0	= stagnation Pressure , MPa

และสามารถเขียนเลขมัตอยู่ในรูป isentropic stagnation pressure ratio จะได้สมการเป็น

$$\frac{\dot{m}_n}{A_{xn}} = \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} P_0 \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma-1}\right) \left(\left(\frac{P_{xn}}{P_{on}}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{xn}}{P_{on}}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)} \quad (3.25)$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ที่ต้องการการไหลที่เหมาะสมตามความดันที่กำหนดให้ ซึ่งอาจจะหาได้จากการเปลี่ยนในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนการไหลของมวลซึ่งชี้ให้เห็นว่าความต้องการพื้นที่ที่เล็กที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อความดันลดลงไปที่สภาวะการไหลที่เหมาะสม พื้นที่เล็กที่สุดนี้เกี่ยวข้องกับสภาวะของการไหลที่เกิด choked (choked) ดังนั้นจะต้องหาพื้นที่เล็กที่สุดจากขนาดและอัตราส่วนการไหลที่ทำให้เกิดสภาวะการไหล choked ที่คอ (throat)

โดยการคำนวณในขั้นตอนนี้จะไม่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนหรืออิทธิพลของการผสมใดๆ ที่เกิดภายในช่องผสม ซึ่งในแต่ละแบบจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนการไหลที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ที่แต่ละค่าของสภาวะเริ่มต้นของทางเข้าสำหรับอีเจคเตอร์แต่ละอัน

3.2 ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์

โดยทั่วไปจะนิยามประสิทธิภาพในลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องสูบลม (pump) คือของไหลที่เป็นตัวขับเคลื่อน (driving stream) จะเป็นแหล่งของงานที่ให้กับระบบและของไหลถูกขับเคลื่อนเป็นส่วนที่ถูกทำงาน นิยามต่อไปนี้จะไม่รวมถึงการผสมกันของของไหล ซึ่งโดยปกติแล้วต้องการให้ของไหลที่ผสมกันแล้วถูกปล่อยออกมาให้ลักษณะประมาณว่าอุณหภูมิเท่ากัน (uniform temperature) การเพิ่มกลไกของการถ่ายเทความร้อนในอีเจคเตอร์ เป็นส่วนที่สำคัญของการถ่ายเทพลังงานในอุปกรณ์

งานสูงสุดและความสามารถในการนำมาใช้ประโยชน์ได้ (Maximum Work And Availability)

ปริมาณงานที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (maximum amount of reversible useful work) สามารถหาได้จากการสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์กับสิ่งแวดล้อมซึ่งถือว่าเป็น dead state โดยอุณหภูมิ, ความดันของที่สภาวะนี้กำหนดให้เป็น T_r และ P_r ตามลำดับ นอกจากนี้ที่สภาวะ dead state พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของสารจะมีค่าต่ำที่สุด โดยความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเทียบกับสิ่งแวดล้อม และถือว่าระดับความสูงของระบบเท่ากับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานที่ใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (maximum useful work) จะได้เมื่อสารในสภาวะเริ่มแรก (initial state) ผ่านขบวนการและสามารถย้อนกลับได้ไปสู่สภาวะ dead state ขณะที่การถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิ T_r ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิต่ำสุด

จากสมการอนุรักษ์พลังงานและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์เราสามารถเขียนสมการอะแวลูเอบิลิตี (availability equation) (Van Wylen, 1973) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 h_{o1} - \dot{m}_1 T_r s_1 + \dot{m}_2 h_{o2} - \dot{m}_2 T_r s_2 \\ = \dot{m}_1 h_{o1} - \dot{m}_1 T_r s_e + \dot{m}_2 h_{o2} - \dot{m}_2 T_r s_e + (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) T_r \Delta s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \dot{m}_1 (h_{o1} - h_{oe} - T_r s_1 + T_r s_e) \\ & = \dot{m}_2 (h_{oe} - h_{o2} - T_r s_e + T_r s_2) + \dot{m}_1 T_r \Delta s + \dot{m}_2 T_r \Delta s \end{aligned} \quad (3.26)$$

หารสมการทางด้านซ้ายตลอดสมการ (3.26) จะได้

$$\begin{aligned} 1 & = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \left[\frac{h_{oe} - h_{o2} - T_r (s_e - s_2)}{h_{o1} - h_{oe} - T_r (s_1 - s_e)} \right] \\ & + \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_1} \left[\frac{T_r \Delta s}{h_{o1} - h_{oe} - T_r (s_1 - s_e)} \right] \\ \Delta s & = s_{cal} - s_{exp} \end{aligned}$$

ถ้าเป็น ideal ejector จะได้ $\Delta s = 0$ ดังนั้น

$$1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \left[\frac{h_{oe} - h_{o2} - T_r (s_e - s_2)}{h_{o1} - h_{oe} - T_r (s_1 - s_e)} \right]$$

ซึ่งจะแทนให้เป็นประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์, η_a ซึ่งสำหรับ ideal ejector $\eta_a = 1$ สำหรับ availability efficiency ยังนับรวมถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \eta_a & = Em \left[\frac{\Delta h_{e-2} - T_r [s_e - s_2]}{\Delta h_{1-e} - T_r [s_1 - s_e]} \right] \\ Em & = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \end{aligned} \quad (3.27)$$

ซึ่งจะเห็นว่าเทอม $T_r (s_m - s_n)$ เป็นการบอกถึงการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการผสมของของไหลทั้งสอง นิยามของประสิทธิภาพนี้ได้พิจารณาความเป็นจริงมากกว่าจะใช้นิยามประสิทธิภาพของเครื่องสูบล้าง ซึ่งนิยามนี้จะเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, T_r คล้าย ๆ กับการเปรียบเทียบกันระหว่างอุปรกรณ์ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\eta_a + (1 + Em) \left[\frac{T_r \Delta s}{h_{o1} - h_{oe} - T_r [s_1 - s_e]} \right] = 1 \quad (3.28)$$

$$\eta_a = 1 - \Delta s \left[\frac{T_r (1 + Em)}{h_{o1} - h_{oe} - T_r (s_1 - s_e)} \right] \quad (3.29)$$

จากสมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{m}_1 h_{o1} + \dot{m}_2 h_{o2} = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_{oe}$$

$$h_{oe} = \frac{h_{o1} + Em h_{o2}}{1 + Em}$$

$$\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) (s_e + \Delta s)$$

$$\frac{s_1 + Em s_2}{1 + Em} - \Delta s = s_e$$

แทนค่าลงในสมการ (3.29)

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

$$= 1 - \frac{\Delta s}{Em} \left[\frac{T_r (1 + Em)^2}{\left(\frac{h_{o1} - h_{o2}}{T_r} \right) + (s_2 - s_1) + \Delta s \left(1 + \frac{1}{Em} \right)} \right] \quad (3.30)$$

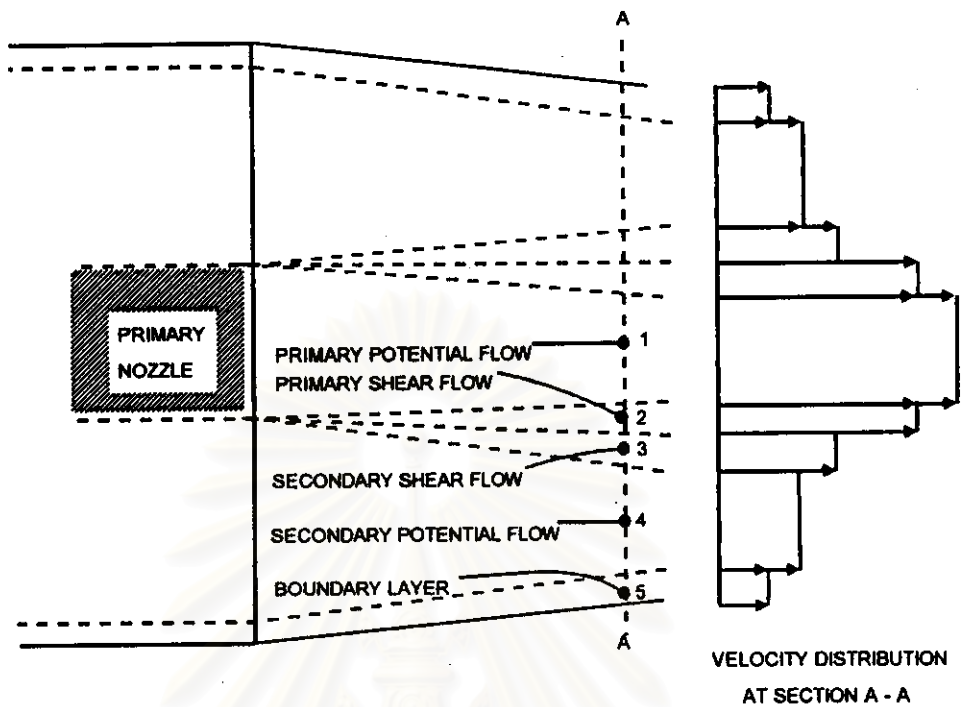
ถ้า s_1 และ s_2 เป็นสภาวะเริ่มต้นและมีค่าคงที่ และรูปร่างของอุปกรณ์ก็ไม่เปลี่ยนแปลง แล้ว Δs จะสามารถหาได้จาก E_m ดังนั้นประสิทธิภาพจะหาได้จาก E_m

ขณะที่อัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้นแล้วความเป็นไปได้ของการไหลที่ทำให้เกิดสภาวะไชคจะมากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของอีเจคเตอร์และการเปลี่ยนแปลงของ Δs ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความไม่สามารถย้อนกลับได้ อันเนื่องจากผลของความสามารถในการอัดตัวได้ที่อัตราส่วนการไหลใด ๆ สำหรับสภาวะไชค

3.3 การวิเคราะห์ความดันสูญเสีย

เมื่อพิจารณาแบบจำลองการไหลอย่างง่ายของอีเจคเตอร์ จาก Kurtz (1976) จะประกอบด้วย องค์ประกอบที่ต่อเนื่องของ potential flow และ shear flow โดยโปรไฟล์ของความเร็วสามารถประมาณอยู่ในรูปของ step โปรไฟล์ โดยแต่ละองค์ประกอบของการไหลความเร็วจะยูนิฟอร์ม และความสามารถในการอัดตัวได้ (compressibility) จะถูกนับรวมโดยการสมมติว่าเป็นการไหลแบบอุณหภูมิคงตัว (isothermal flow) ในแต่ละหน้าตัดของการผสม

จากรูปที่ 3.7 แสดงหน้าตัดของการผสมซึ่งปฐมภูมิและทุติยภูมิมามีสัมผัสกันที่ระยะสั้น ๆ ของ downstream ห่างจากนอชเชิลปฐมภูมิ จะกำหนดให้การไหลภายในอีเจคเตอร์ประกอบด้วยวงแหวนของการไหล 5 ส่วน และแต่ละส่วนจะมีความดันเดียวกันและคุณสมบัติต่าง ๆ ภายในแต่ละวงเหมือนกันที่ค่า X ใด ๆ ในส่วนการไหลปฐมภูมิประกอบด้วย primary potential flow และ primary shear flow ส่วนการไหลทุติยภูมิประกอบด้วย secondary potential flow , secondary shear flow และ boundary layer shear flow เริ่มต้นจากส่วนที่สัมผัสกันระหว่าง potential flow สัมผัสกับผนังของหน้าตัดการผสม (mixing section) โดย potential flow จะถูกกลืนไปที่ละน้อยขณะที่ไหลผ่านแต่ละหน้าตัดของการผสม แต่ส่วน shear flow และ boundary layer จะกลับโตมากขึ้น ที่ระยะทางที่ไกลพอเพียงจากระนาบทางออกของนอชเชิล (nozzle-exit plane) primary และ secondary flow จะถูกกลืนไปจนหมดอย่างสมบูรณ์ แต่จะเหลือ shear flow และ boundary layer ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการหยุดสะสมทั้งหมด ความแตกต่างระหว่าง potential flow และ non potential flow จะเกี่ยวข้องกับธรรมชาติของกระบวนการถ่ายเทมวลที่บริเวณส่วนที่สัมผัสกันโดย potential flow จะยอมให้มีการถ่ายเทมวลไปสู่ส่วนสัมผัสกับ non potential flow และจะสามารถถ่ายเทมวลไปยังส่วน non potential flow ส่วนอื่นที่สัมผัสกันได้ ดังนั้นทำให้ potential flow จึงมีค่าลดลงเรื่อย ๆ



รูปที่ 3.7 องค์ประกอบของการไหลและโปรไฟล์ของความเร็ว

ส่วนสัมผัสกันระหว่าง 2 non potential flow จะถือว่ามี การถ่ายเทมวลเท่ากันและตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทมวลสุทธิข้ามแต่ละส่วนที่รวมกัน โดยแต่ละส่วนที่รวมกันจะถูกเชื่อว่าเป็นผลเสมือนผนังแข็ง (solid boundary) มวลที่ออกจะไหลด้วยความเร็วของการไหล และไหลกลับมาที่การไหลเสมือนกับการกระดอนกลับจากส่วนที่สัมผัสกันตามความหนาแน่นของ มันและด้วยความเร็วของวัตถุที่อยู่บนด้านตรงข้ามของส่วนที่รวมกัน

ดังนั้นเราสามารถจำแนกตัวแปรความเสียดทาน (friction factors) คือ wall friction factor friction factor f_{bl} ที่ boundary layer ส่วนนอกที่สัมผัสกับของไหล shear-flow friction factors jet friction factor และ downstream friction factor ซึ่งความเสียดทานต่างๆเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์มีค่าลดลง และยังมีผลมากสำหรับท่อผสม (mixing tube) ที่มีหน้าตัดเล็กมากเพราะ boundary layer ของ turbulent flow จะโตเร็วทำให้ effective area ยิ่งน้อยลงมากผลส่งให้ประสิทธิภาพตกลง

การวิเคราะห์ผลกระทบจาก Shock Wave

เนื่องจากความเร็วที่ออกจากรอกนอชเชิลปฐมภูมิจะมีความเร็วเป็น supersonic เพื่อช่วยในการเหนี่ยวนำของไหลถูกขับดัน (driven fluid , secondary steam) ดังนั้นเมื่อเกิดความดันเปลี่ยนแปลง (back pressure) ก็จะมีผลทำให้เกิดช็อคขึ้นภายในท่อผสมโดยเมื่อเกิดคลื่นช็อคขึ้นแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ molecular energy และโมเมนตัมภายในระบบดังสมการ (3.31) (Anderson,1990)

$$M_2^2 = \frac{1 + [(\gamma - 1)/2]M_1^2}{\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)/2} \quad (3.31)$$

แต่สมการที่ (3.31) ให้สำหรับ calorically perfect gas ซึ่งอธิบายจากสมการได้ว่า ถ้ากำหนดให้ $\gamma = \text{const}$ ดังนั้นเลขมัคหลังช็อคจะเป็นฟังก์ชันของเลขมัคหน้าช็อคเพียงอย่างเดียว

$$\frac{T_y}{T_x} = \left(\frac{P_y}{P_x}\right) \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right) = \frac{h_y}{h_x} = \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)\right] \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{(\gamma + 1)M_1^2}\right]$$

ถ้าเป็น equilibrium thermally perfect gas การเปลี่ยนแปลงข้ามช็อคตั้งฉาก จะขึ้นอยู่กับ M_1 และ T_1 และเมื่อพิจารณาในเทอมของเอนโทรปีจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

$$\begin{aligned} s_y - s_x &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= c_p \ln \left\{ \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)\right] \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{(\gamma + 1)M_1^2}\right] \right\} \\ &\quad - R \ln \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)\right] \end{aligned}$$

$$\frac{P_{oy}}{P_{ox}} = \left(\frac{\frac{1}{2}(\gamma+1)M_1^2}{1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)M_1^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีข้ามคลื่นช็อกแบบตั้งฉากจะเป็นฟังก์ชันของเลขมัค และเป็นที่ยืนยันว่า $M_1 \geq 1$ มิฉะนั้น $s_2 - s_1 < 0$ และเทอมของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะถูกพิจารณาในสมการ available efficiency ด้วย ถ้ายังมีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมากก็จะทำความสามารถในการทำงานมาใช้ประโยชน์ได้ก็ยิ่งจะน้อยลงด้วย หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีเป็นการบอกถึงปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

การวิเคราะห์ผลกระทบจาก oblique shock

ถ้าหากความดันที่ทางออกของนอชเชิลปรูมภูมิไม่เหมาะสม (unmatch) กับความดันรอบข้างของตัวมันในที่นี้ก็คือความดันของของไหลถูกขับดัน (secondary steam, driven fluid) ก็จะทำให้เกิดคลื่นช็อกขึ้น ซึ่งถ้าหากความดันที่ปลายทางออกของนอชเชิลปรูมภูมิต่ำกว่าไอน้ำทุติยภูมิแล้ว จะทำให้เกิดคลื่นแบบ oblique shock ในท่อผสม และถ้าความดันที่ทางออกของนอชเชิลปรูมภูมิสูงกว่าความดันรอบข้างแล้วก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ของ expansion fan ซึ่งทำให้กันการไหลผ่านของของไหลทุติยภูมิ โดยเมื่อเกิดคลื่นช็อกขึ้นแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ molecular energy และโมเมนตัมภายในระบบตั้งสมการ

$$\tan \theta = 2 \cot \beta \left[\frac{M_1^2 \sin^2 \beta - 1}{M_1^2 (\gamma + \cos 2\beta) + 2} \right] \quad (3.32)$$

$$M_{n1} = M_1 \sin \beta \quad (3.33)$$

จาก calorically perfect gas

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)M_{n1}^2}{(\gamma-1)M_{n1}^2 + 2} \quad (3.34)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_{n1}^2 - 1) \quad (3.35)$$

$$M_{n2}^2 = \frac{M_{n1}^2 + [2/(\gamma - 1)]}{[2\gamma/(\gamma - 1)]M_{n1}^2 - 1} \quad (3.36)$$

$$M_2 = \frac{M_{n2}}{\sin(\beta - \theta)} \quad (3.37)$$

3.4 แบบจำลองการสูญเสียของระบบ (Model loss for System)

เมื่อพิจารณาส่วนที่ทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียต่ออุปกรณ์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. การสูญเสียเนื่องจากการผสมกันของของไหล 2 อันที่มีความเร็วแตกต่างกัน
2. การสูญเสียเนื่องจากการไหลของของไหลอัดตัวได้ผ่านคอ (throat) ซึ่งมีหน้าตัดคงที่
3. การสูญเสียเนื่องจากการไหลเข้า diffuser ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดขยายขึ้น

ซึ่งทั้ง 3 ส่วนจะมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากข้อมูลที่คำนวณได้จากส่วนต้นจะเป็นตัวแปรสำหรับคำนวณหาสภาวะต่างๆ ในส่วนต่อไป และกำหนดสัญลักษณ์แทนหน้าตัดแต่ละส่วนเป็นดังรูปที่ 3.8

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในอีเจคเตอร์

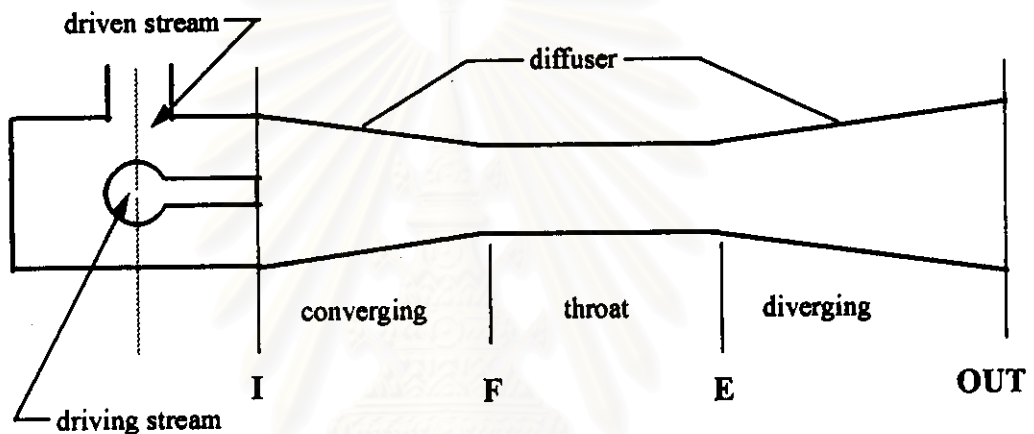
การสูญเสียเนื่องจากการผสมกันของไหล 2 อันที่มีความเร็วแตกต่างกัน เริ่มต้นจากการเลือกพิจารณาค่าความดันของของไหลทุติยภูมิให้เข้ากับความดันของของไหลปฐมภูมิที่ ณ ตำแหน่งที่ความเร็วออกจากทางออกของนอซเซิลปฐมภูมิโดยพิจารณาจากสมการ (3.38)

ขั้นตอนแรก เลือกค่าความดัน P_{02} ให้เหมาะสม (match) กับความดัน P_{01} โดยจะต้องทราบค่าเลขมัคของ P_{01} จากสมการ (3.38)

$$\frac{A}{m} = \frac{1}{GP_0 \times 10^6} \sqrt{RT_0} \left[\frac{1}{M} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \right] \quad (3.38)$$

$$\text{โดย } G = \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

- กำหนดให้ $\gamma = 1.33$
 $R = 462 \text{ J/kg K.}$
 $A = \text{พื้นที่, m}^2$
 $m = \text{mass flow-rate, kg/s}$
 $T_o = \text{stagnation Temperature, Kelvin}$
 $M = \text{เลขมัค}$
 $P_o = \text{stagnation Pressure, MPa}$



รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์แทนแต่ละหน้าตัดของอุปกรณ์ Steam Ejector

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในอีเจคเตอร์

จากสมการข้างต้นจะสมมติให้เป็น Isentropic Flow เมื่อรู้ค่า A , m , P_o , T_o สามารถหาค่า Mach No. ที่หน้าตัดนั้น ๆ ได้ จากสมการ (3.38) ทำการหาค่า Mach เพื่อนำมาคำนวณหา pressure matching กับความดันที่ทางออกของนอซเซิลปรูมูมิ

$$\frac{P_{o1}}{P_1} = \left(1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right)M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.39.1)$$

$$P_1 = \frac{P_o}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}$$

เนื่องจากค่าความเร็วของของไหลทุกขุมมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเสียง ดังนั้น $P_{02} \approx P_2$ และ $T_{02} \approx T_2$ เพราะฉะนั้นเลือกชุดข้อมูลที่ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์หาได้จากตารางไอน้ำแล้วแทนค่าอุณหภูมิในสมการ (3.39.2) เพื่อหาค่าอุณหภูมิจึงได้

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right) \quad (3.40)$$

ค่าความหนาแน่น ρ หาได้จากสมการ continuity of mass เมื่อทราบอุณหภูมิและเลขมัคของไอน้ำปฐภูมิ จะสามารถหาความเร็วที่ปลายทางออกของนอชเชิลได้จากสมการ

$$U = M \sqrt{\gamma RT} \quad (3.41)$$

และ U_2 ค่าได้จากสมการ continuity of mass $\dot{m} = \rho UA$

เนื่องจากความเร็วของไอน้ำทุกขุมมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเสียง ดังนั้น สมมติให้สภาวะที่อ่านค่าได้จากการทดลอง static pressure และ static temperature จะถูกประมาณสภาวะทั้งสองเป็นแบบ total pressure และ total temperature สามารถทราบคุณสมบัติของไอน้ำที่สภาวะนั้นๆ ได้จากตารางไอน้ำ

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติของของไหลที่ผสมกัน เนื่องจากค่า convective velocity, U_c ซึ่งเป็นความเร็วที่สัมพันธ์กับความเร็วของ 2 stream หาได้จาก (Papamoschou and Bunyajitradulya, 1997)

$$U_c = U_1 - (Mc_1) \cdot a_1 \quad (3.42)$$

Mc = Convective Mach No.

a = Speed of sound

$$Mc_1 = \overline{Mc} - \frac{dMc}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2}} \quad (3.43)$$

$$\overline{Mc} = \frac{U_1 - U_2}{a_1 + a_2} \quad (3.44)$$

$$d\overline{Mc} = 1.5\overline{Mc} - 0.4 \quad \text{เมื่อ } \overline{Mc} > 0.27 \quad (3.45)$$

จาก Brown and Roshko's , the Eulerian version of the momentum equation ใช้ค่าประมาณ maximum shear stress เป็น

$$\tau_{max} \sim \frac{d\delta}{dx} \rho_{avg} U_{avg} \Delta U \quad (3.46)$$

U_{avg} = ความเร็วเฉลี่ยที่ซึ่งโมเมนต์ถูกถ่ายเท ซึ่งสมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยของ Free stream velocities , m/s (Papamoschou, 1993)

ΔU = ผลต่างของความเร็วของ free stream velocities , m/s

$\frac{d\delta}{dx}$ = Turbulent shear-Layer growth rate

สมมติให้ที่ $\tau = \tau_{max}$ จะให้ค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นเฉลี่ย ρ_{avg} (Papamoschou, 1993) และจากการทดลองของ Papamoschou and Rosho และ Goebel et al. สามารถประมาณได้ว่า

$$\frac{d\delta}{dx} \sim \frac{\Delta U}{U_c} f(Mc) \quad (3.47)$$

จากการทดลองจะได้

$$\frac{d\delta}{dx} = 0.17 \frac{\Delta U}{U_c} f(Mc) \quad (3.48)$$

Papamoschou (1993) ประมาณค่า $f(Mc)$ จากการทดลองได้ดังสมการ (3.49)

$$f(Mc) \cong 0.25 + 0.75e^{-Mc^2} \quad (3.49)$$

รวมสมการ (6.18) ถึง (6.21) จะได้ค่า shear stress เป็น

$$\tau_{\max} = c_\tau \rho_{\text{avg}} (\Delta U)^2 \frac{U_{\text{avg}}}{U_c} f(Mc) \quad (3.50)$$

c_τ เป็นค่าคงที่ได้จากของไหลที่มีความเร็วในช่วง subsonic ที่ได้จากการทดลองที่กำหนดให้ความหนาแน่นเท่ากับ Wygnanski and Fielder โดยค่า $c_\tau = 0.013$ เนื่องจากต้องการให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_{\max} และ τ_{dsl} Papamoschou กำหนดให้ pressure gradient ใน self-similar shear layer มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ maximum shear stress จะเกิดขึ้นที่บริเวณที่แนวแบ่ง streamline ทั้งสองกระแส

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีสามารถหาได้โดยสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. สนใจเฉพาะการเกิดเอนโทรปีเนื่องจากการผสม shear layer โดยละทิ้งผลของ wall friction
2. ให้เป็นการไหลแบบ inviscid wall และให้ $\tau_1 = -\tau_{\text{dsl}}$ และ $\tau_2 = \tau_{\text{dsl}}$
3. Entropy flux = $\dot{S}_{12} = \dot{S}_1 + \dot{S}_2$
4. เป็นการไหลแบบ quasi-one-dimensional variables.
5. Isothermal case
6. $c_{p1} = c_{p2} = c_p$

จะได้

$$\frac{d\dot{S}_{12}}{dx} \approx \frac{\tau_{\text{dsl}}}{T_1 T_2} \left[T_{\text{avg}} \Delta U + c_p \frac{(\Delta T)^2}{\Delta U} \right] \quad (3.51)$$

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

$$U_{\text{avg}} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$$\rho_{\text{avg}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

Equivalent Total pressure ratio ϕ

$$\phi = \exp\left(-\frac{S_{12}}{\dot{m}_{12}R_{12}}\right)$$

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

$$R_{12} = \frac{1}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)}(\dot{m}_1 R_1 + \dot{m}_2 R_2)$$

คำนวณหาสภาวะของ mixing steam โดยการใช้สมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน ได้โดยคิดเป็นแบบไม่มีการสูญเสียใดๆ เกิดขึ้นในระบบระหว่างการผสมและการไหลไปด้วยกัน

$$h_{oi} = \frac{h_{o1} + Emh_{o2}}{1 + Em} \quad (3.52)$$

$$s_{oi} = \frac{s_{o1} + Ems_{o2}}{1 + Em}$$

จากสมการ (3.52) เมื่อรู้ค่าเอนทัลปีและเอนโทรปีแล้วสามารถหาค่าความดันและอุณหภูมิได้จากตารางไอน้ำ

$$\phi = \frac{P_{of}}{P_{oi}}$$

กำหนดให้เป็น adiabatic process ดังนั้น $T_{oi} = T_{of}$ และเมื่อรู้สภาวะ P_{of} , T_{of} , area, \dot{m}_{12} แล้วสามารถหาค่าเลขมัคที่หน้าตัดนั้นได้จากสมการ (3.38) แทนค่าหาเลขมัค

2 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงภายใน mixing throat

เมื่อรู้ค่า P_o , T_o , Mach No. และความยาวของ mixing throat length กำหนดสมมติฐานในสภาวะนี้เป็น

- 1) Steady flow
- 2) Uniform flow at each section
- 3) Body Force, $F_{xB} = 0$

- 4) Adiabatic flow, $\dot{\theta} = 0$
- 5) $\dot{w}_{\text{shear}} = \dot{w}_{\text{other}} = 0$
- 6) $\dot{w}_s = 0$
- 7) Effects of gravity are negligible

จะได้สมการการไหลของไหลแบบอัดตัวได้ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่คงที่แบบมีความเสียดทาน (Anderson, 1990)

$$\frac{4\bar{f}L^*}{D} = \frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \quad (3.53)$$

เนื่องจากท่อผสมทำจากวัสดุทองเหลืองซึ่งให้ค่า $\epsilon = 76.2 \times 10^{-4} \text{ mm}$ (Burmeister, 1993) จาก Moody chart $\bar{f} = 0.0175$ (ภาคผนวก ค)

จาก $L = L_1^* - L_2^*$ และ $L_2^* = L_1^* - L$

$$\frac{4\bar{f}L_2^*}{D} = \frac{4\bar{f}L_1^*}{D} - \frac{4\bar{f}L}{D}$$

หาสมการที่หน้าตัดทางออกจาก mixing throat

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{2+(\gamma-1)M_2^2}{2+(\gamma-1)M_1^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.54)$$

3. การคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในดิวเซอร์

สมมติฐานคือ

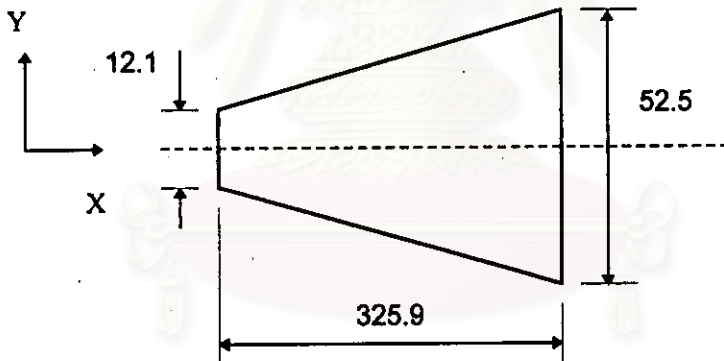
1. Pressure recovery coefficient
2. Adiabatic process $T_{02} = T_{01} = T_{03}$
3. No separation and No circulation

4. Fully develop turbulent pipe flow และ uniform flow on inlet
5. ไม่เกิด shock wave ตลอดการไหล
6. Steady flow
7. Conservation of mass flowrate
8. No.drag force in pipe

สมการของการไหลผ่านดิวเซอร์ที่มีความเสียดทานโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขมัค และพื้นที่แต่ละหน้าตัดเปลี่ยนแปลง

$$\frac{dM^2}{M^2 dx} = \frac{2\phi}{1-M^2} \frac{dA}{A dx} + \frac{\gamma M^2 \phi}{1-M^2} \left(\frac{4f}{D} \right) \quad (3.55)$$

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



รูปที่ 3.9 ขนาดมิติของ Diffuser ที่ใช้ทดสอบ

จากรูปเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับระบบ x ได้เป็น

$$D(x) = a + bx \quad (3.56)$$

ดังนั้น

$$A(x) = \frac{\pi}{4} (a + bx)^2 \quad (3.57)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{2b}{(a + bx)} \quad (3.58)$$

$$\frac{4f}{D} = \frac{4f}{a + bx} \quad (3.59)$$

แทนสมการ (3.56) ถึง (3.59) ในสมการ (3.55)

$$\frac{dM^2}{M^2 dx} = \frac{-2\phi}{1-M^2} \left[\frac{2b}{a+bx} \right] + \frac{\gamma M^2 \phi}{1-M^2} \left[\frac{4f}{a+bx} \right] \quad (3.60)$$

$$\frac{2dM}{\phi M} \frac{(1-M^2)}{[-4b + \gamma M^2 4f]} = \frac{1}{(a+bx)} dx \quad (3.61)$$

อินทิเกรตตลอดสมการ (6.31)

$$\int_{M_E}^{M_{out}} \frac{(1-M^2)dM}{\phi M[-2b + 2\gamma M^2 f]} = \int_0^x \frac{1}{a+bx} dx \quad (3.62)$$

จากสมการ continuity of mass $\dot{m}_E = \dot{m}_{out}$

ดังนั้น

$$\frac{P_{out}}{P_E} = \frac{A_E}{A_{out}} \frac{M_E}{M_{out}} \sqrt{\frac{T_{out}}{T_E}}$$

และสามารถหาความเร็วที่ทางออกของคิพฟิวเซอร์ได้จากสมการ

$$U_{out} = M_{out} (\gamma R T_{out})^{1/2}$$