

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อีเจ็คเตอร์

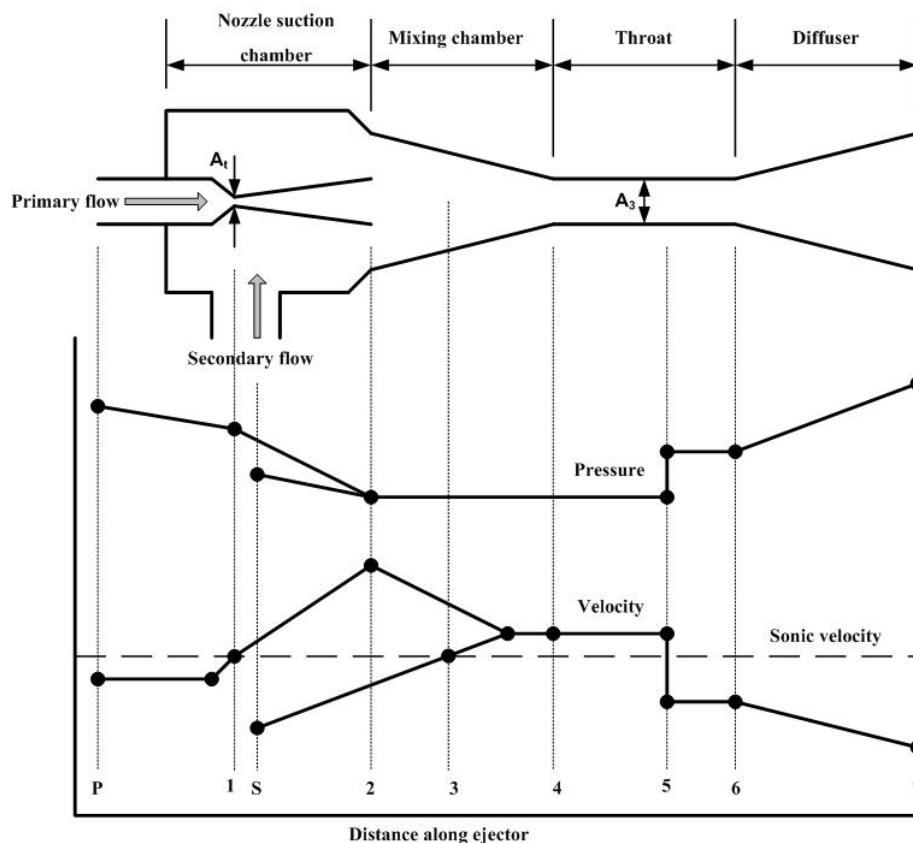
2.1.1 ประวัติและการทำงานของอีเจ็คเตอร์

ในปี 1858 นักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศสชื่อว่า Henry Giffard ได้ประดิษฐ์อีเจ็คเตอร์ (Condensing-type injector) ขึ้นเป็นครั้งแรกของโลกเพื่อใช้ในการสูบน้ำไปยังถังเก็บน้ำของระบบ เครื่องยนต์ผลิตไอน้ำ (steam engine boiler) (Elbel, 2011: 1545 - 1561) หลังจากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้อีเจ็คเตอร์กันอย่างกว้างขวาง เช่น ในปี 1901 Sir Charles Parson ใช้อีเจ็คเตอร์เพื่อดูดเอา ก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-condensable gases) ออกจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ (Steam condenser) (Chunnanond and Aphornratana, 2004: 311 - 322) หรือใช้ในระบบน้ำหล่อเย็นของเขา ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Baeithou and Aybar, 2000: 56 - 70) เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วอีเจ็คเตอร์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็น หรือที่เรียกกันว่าระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

อีเจ็คเตอร์คืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการทำงานของปรากฏการณ์การไหลผ่าน คอคอด (Venturi effect) โดยการเปลี่ยนความดันสถิตของของไหลป้อนให้มีกลายเป็นความดัน พลศาสตร์ ซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณที่มีความดันต่ำ (ความดันสถิต) ภายในอีเจ็คเตอร์และเกิดการ เหนี่ยวนำเอาของไหลทุติยภูมิเข้ามาผสมกับของไหลป้อนก่อนที่จะไหลออกจากอีเจ็คเตอร์

อีเจ็คเตอร์ ประกอบด้วย หัวฉีด (Primary nozzle), ห้องดูด (Nozzle suction chamber), ห้องผสม (Mixing chamber), คอคอด (Throat) และช่วงลู่ออก (Diffuser) จากภาพที่ 2.1 ที่ ตำแหน่ง (P) ของไหลป้อนที่มีความดันสูงจากเครื่องกำเนิดไอขยายตัวและเร่งความเร็วผ่านหัวฉีด ในตำแหน่งที่ (1) ของไหลจะพุ่งออกจากคอคอดหัวฉีดด้วยความเร็วเหนือเสียงซึ่งทำให้เกิดบริเวณที่มีความดันต่ำที่ปากทางออกของหัวฉีด (ตำแหน่งที่ (2)) และห้องผสม จากความแตกต่างของความดันของทั้งสองตำแหน่ง ของไหลทุติยภูมิ (ตำแหน่ง S) ที่มีความดันสูงกว่าห้องผสมจึงถูกเหนี่ยวนำ เข้าสู่ห้องผสม ในช่วงแรกนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะยังไม่ผสมกันทันที แต่จะผสมกันก็ต่อเมื่อของไหลทุติยภูมิมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงและเกิดการไหลแบบ Choke flow ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการผสมกันระหว่างของไหลป้อนและของไหลทุติยภูมิจะเกิดขึ้นบริเวณห้องผสม ตำแหน่งนั้น เรียกว่า Effective position ในที่นี้สมมุติให้คือตำแหน่งที่ (3) ที่ปลายทางออกของห้องผสมของไหล

ทั้งสองชนิดจะผสมกันอย่างสมบูรณ์และสมมุติให้ความดันสถิตมีค่าคงที่ไปจนถึงช่วงคอคอของอีเจ็คเตอร์ (Stoecker, 1958) ในตำแหน่งที่ (4) เนื่องจากอิทธิพลของความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ที่มีค่าสูงเมื่อเทียบกับความดันคอคอ จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก (Shock wave) ที่ตำแหน่งที่ (5) คลื่นกระแทกนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์กดอัด (Compression effect) และลดความเร็วในการไหลลงอย่างรวดเร็วของของไหลผสม (Mixed fluid) จากที่มีความเร็วเหนือเสียงลดลงเหลือต่ำกว่าเสียง ในตำแหน่งที่ (6) ของไหลผสมจะไหลออกจากอีเจ็คเตอร์ในตำแหน่งที่ (7) โดยถูกทำให้ความเร็วลดลงและมีความดันสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีความดันเท่ากับความดันบริเวณปากทางออกของอีเจ็คเตอร์



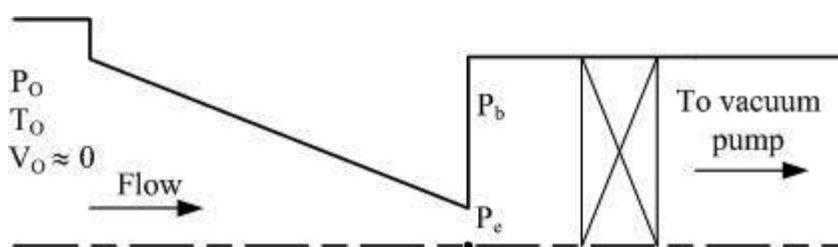
ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วของการไหลตลอดการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

Choke flow คือ ปรากฏการณ์ไหลของของไหลที่จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านคอคอ ซึ่งสามารถอธิบายการเกิด choke flow (Fox *et al*, 2004) ได้ดังต่อไปนี้

จากภาพที่ 2.2 ในขณะที่วาล์วปิดอยู่จะไม่มีมีการไหลเกิดขึ้น ความดันมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหัวฉีด

ถ้าค่าความดันกลับ P_b ถูกทำให้มีค่าลดลงกว่าความดัน P_0 เล็กน้อย จะเกิดการไหลผ่านหัวฉีดจากตำแหน่งที่มีความดันสูง (P_0) ไปในทิศทางที่มีความดันมีค่าลดลง (P_b) ที่สภาวะนี้ การไหลที่ปากทางออกจะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง และความดันที่ปากทางออก (P_e) มีค่าเท่ากับความดันกลับ (P_b)

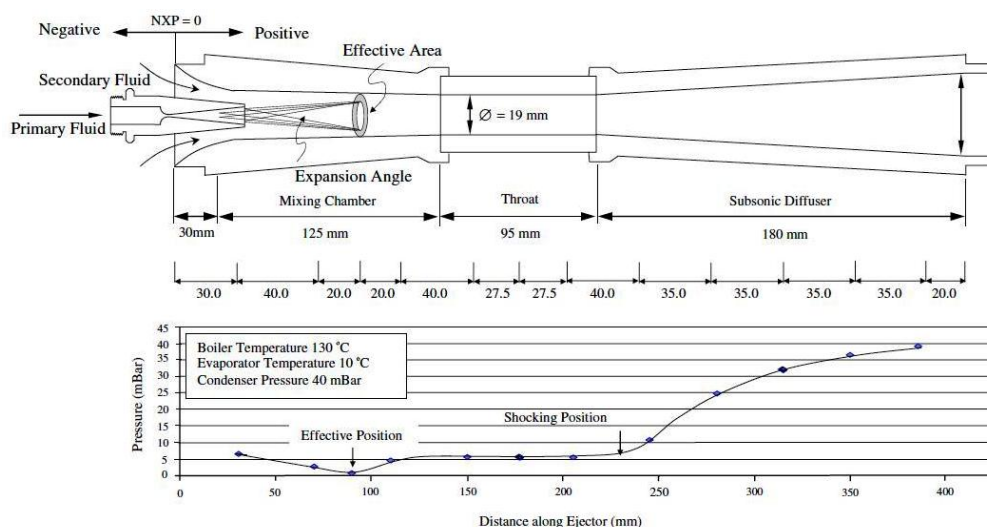
ถ้าความดันกลับยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง ความเร็วในการไหลของของไหลจะเพิ่มขึ้นและความดันที่ปากทางออกจะลดลง จนเมื่อลดความดันกลับลงจนมีค่าๆ หนึ่ง จะทำให้ความเร็วในการไหลมีค่าเท่ากับความเร็วเสียงและทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงสุด เราเรียกการไหลในสภาวะนี้ว่า การไหลแบบ choke flow และเรียกค่าความดันกลับที่จุดนี้ว่า ค่าความดันวิกฤต ซึ่งหลังจากสภาวะนี้อัตราการไหลก็จะไม่เพิ่มขึ้นแม้ว่าจะลดความดันกลับลงก็ตาม



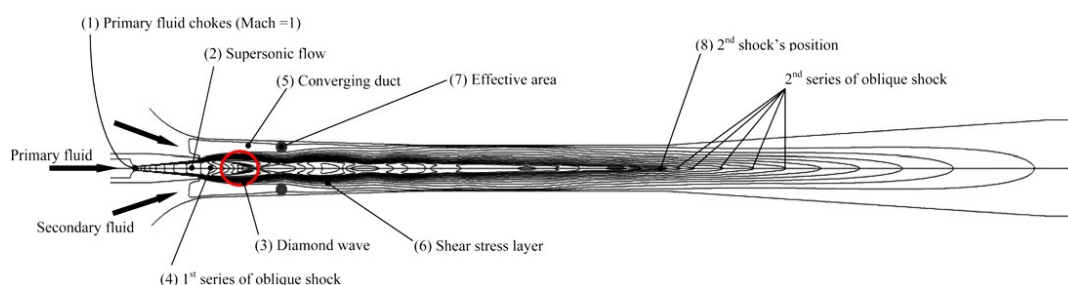
ภาพที่ 2.2 การไหลผ่านคอขวด

Effective position คือ จุดที่ความดันสถิตของของไหลทุกขุมเปลี่ยนแปลงเป็นความดันพลศาสตร์ (Dynamic pressure) และความเร็วในการไหลมีค่า เท่ากับความเร็วเสียง (Mach number = 1) เมื่อความเร็วของของไหลทุกขุมเท่ากับความเร็วเสียงจะเกิดการผสมกันระหว่างของไหลปฐมภูมิกับทุติยภูมิภายในอีเจ็คเตอร์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง Effective position เรียกว่า Effective area (Munday and Bagster, 1997: 442 - 449) และความดันสถิตภายในอีเจ็คเตอร์ที่จุดนี้จะมีค่าต่ำที่สุด Chunnanond และ Aphornratana (2004: 311 - 322) ได้ทำการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ความดันภายในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งจากงานวิจัยของพวกเขาสามารถอธิบายคุณลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ได้เป็นอย่างดี จากภาพที่ 2.3 พบว่า เมื่อลำพุ่งของของไหลปฐมภูมิเร่งความเร็วและขยายตัวออกจากปากหัวฉีด ลักษณะการไหลจะทำให้เกิดมุมขยายตัว (Expansion angle) ความดันสถิตในช่วงนี้จะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนมีความดันต่ำสุดซึ่งมีค่าประมาณ 0 มิลลิบาร์ เราเรียกตำแหน่งนี้ว่า Effective position ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของของไหลทุกขุมมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง และเกิดการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองชนิดอย่างสมบูรณ์ ตำแหน่งของ Effective position นี้จะเกิดอยู่ในช่วงของห้องผสม (Mixing chamber) หลังจากนั้นความดันสถิตของของไหลจะเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ตลอดไปจนถึงบริเวณปากทางออกของคอขวดอีเจ็คเตอร์ ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากการเกิดคลื่นกระแทก ตำแหน่งการเกิดคลื่นกระแทก (Shocking position) อยู่บริเวณทางออกของช่วงคอคอดของอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า ตำแหน่งของการเกิด Effective position และ Shocking position จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ด้วย



ภาพที่ 2.3 ความดันสถิตภายในอีเจ็คเตอร์ (Chunnanond and Aphornratana, 2004: 311 - 3 22)



ภาพที่ 2.4 การไหลภายในอีเจ็คเตอร์จากการจำลองการไหลเชิงตัวเลข (Ruangtrakoon *et al.*, 2013: 133 - 145)

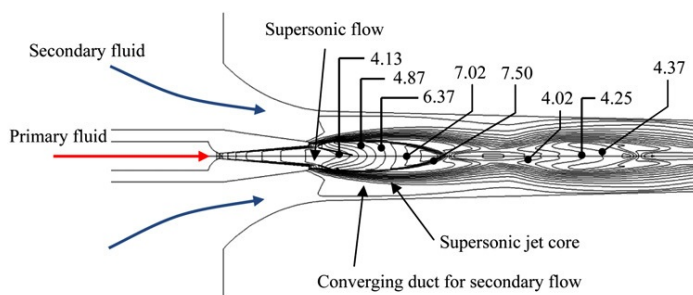
ต่อมา Ruangtrakoon และคณะ (2013: 133 - 145) ได้ใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลขอธิบายการไหลและกระบวนการผสมกันภายในอีเจ็คเตอร์ โดยใช้เส้นแสดงความเร็วเสียงของการไหล (Mach number contour line) ในการอธิบายการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ จากภาพที่ 2.4 ของไหลปฐมภูมิที่มีอุณหภูมิและความดันสูงไหลเข้าสู่หัวฉีดและถูกเร่งความเร็วให้สูงขึ้นเมื่อไหลผ่านคอคอดของหัวฉีดในตำแหน่งที่ (1) ที่ตำแหน่งนี้ความเร็วในการไหลจะเท่ากับความเร็วเสียง ($M = 1$) หลังจากนั้นความเร็วในการไหลจะเพิ่มขึ้นเป็นการไหลในระดับความเร็วเหนือเสียงในช่วงงอออกของหัวฉีด (ตำแหน่งที่ 2) ที่ปากทางออกของหัวฉีด ของไหลปฐมภูมิพุ่งออกจากของหัวฉีดด้วยความเร็วเหนือเสียง ($M \approx 4$) โดยขยายตัวพุ่งออกมาให้ลักษณะของคลื่นขยาย (Expanded wave) ที่

เกิดจากอิทธิพลของมุมการขยายตัว (Expansion angle) expanded wave สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ under-expanded wave และ over-expanded wave ดังแสดงในภาพที่ 2.5

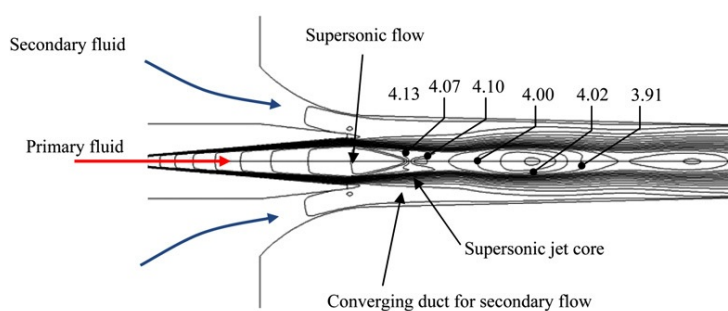
ในกรณีของ under-expanded wave ลำพุงจะออกจากหัวฉีดโดยที่มุมขยายตัวมีลักษณะลู่ออกดังแสดงในภาพที่ 2.5 A กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความดันที่ปากทางออกของหัวฉีดสูงกว่าในห้องผสม ผลของการเกิด under-expanded wave จะทำให้ลักษณะของลำพุงขยายตัวทันทีหลังจากออกจากปากทางออกของหัวฉีดและทำให้ลำพุงมีความเร็วในระดับเหนือเสียง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เกิด diamond wave มุมขยายตัวและระดับความเร็วเหนือเสียงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างปากทางออกของหัวฉีดและห้องผสม

ส่วนในกรณีของ over-expanded wave ลำพุงจะออกจากหัวฉีดโดยที่มุมขยายตัวมีลักษณะลู่เข้าดังแสดงในภาพที่ 2.5 B กรณีนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความดันสถิตที่ปากทางออกของหัวฉีดมีค่าต่ำกว่าในห้องผสม ชุดของคลื่นกระแทกที่มีลักษณะแหลม (Oblique shock) และ diamond wave ถูกทำให้เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม oblique shock ก็ไม่ได้มีความรุนแรงเหมือนกับกรณีของ under-expanded wave ดังนั้นความเร็วในการไหลของลำพุงจึงมีค่าคงที่ ซึ่งสังเกตได้จากระดับของความเร็วเหนือเสียงที่ออกจากปากทางออกหัวฉีดที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ด้วยเหตุนี้การสูญเสียที่เกิดจากการไหลจึงมีค่าน้อยกว่าในกรณีของ under-expanded wave ซึ่งการไหลในลักษณะนี้จะทำให้มีผลดีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

จากรูปที่ 2.4 จากการขยายตัวของลำพุง เราจะพบการเกิด 1st series oblique shock หรือ 1st shock ในตำแหน่งที่ (4) ซึ่งเราสามารถสังเกตเห็นรูปแบบการไหลในลักษณะนี้ในระหว่างที่ของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิยังไม่ได้เกิดการผสมกัน จากการที่ของไหลทั้งสองชนิดยังไม่ได้ผสมกันจึงเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการลู่เข้าท่อ (Converging duct) ระหว่างชั้นของการไหลของลำพุงและผนังของอีเจ็คเตอร์ ในตำแหน่งที่ (5) ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิให้เข้าสู่อีเจ็คเตอร์ เนื่องจากความเร็วในการไหลที่แตกต่างกันมากของของไหลทั้งสองชนิดจึงทำให้เกิด shear stress layer ในตำแหน่งที่ (6) นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้ของไหลทุติยภูมิถูกเร่งความเร็วจนมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงและเกิดการไหลแบบ choked flow ในตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่งในช่วง converging duct ซึ่งตำแหน่งนั้นจะเกิดพื้นที่หน้าตัดที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนซึ่งเกิดจากชั้นขอบเขตของลำพุงกับผนังของอีเจ็คเตอร์ โดยพื้นที่ในตำแหน่งนี้เรียกว่า effective area (ตำแหน่งที่ (7))



A Mach number contour lines of Under-expanded wave using the primary nozzle d2.0M4 for a boiler temperature of 150°C, an evaporator temperature of 7.5°C and a condenser pressure of 30 mbar.



B Mach number contour lines of Over-expanded wave using the primary nozzle d1.40M5.5 for a boiler temperature of 150°C, an evaporator temperature of 7.5°C and a condenser pressure of 30 mbar.

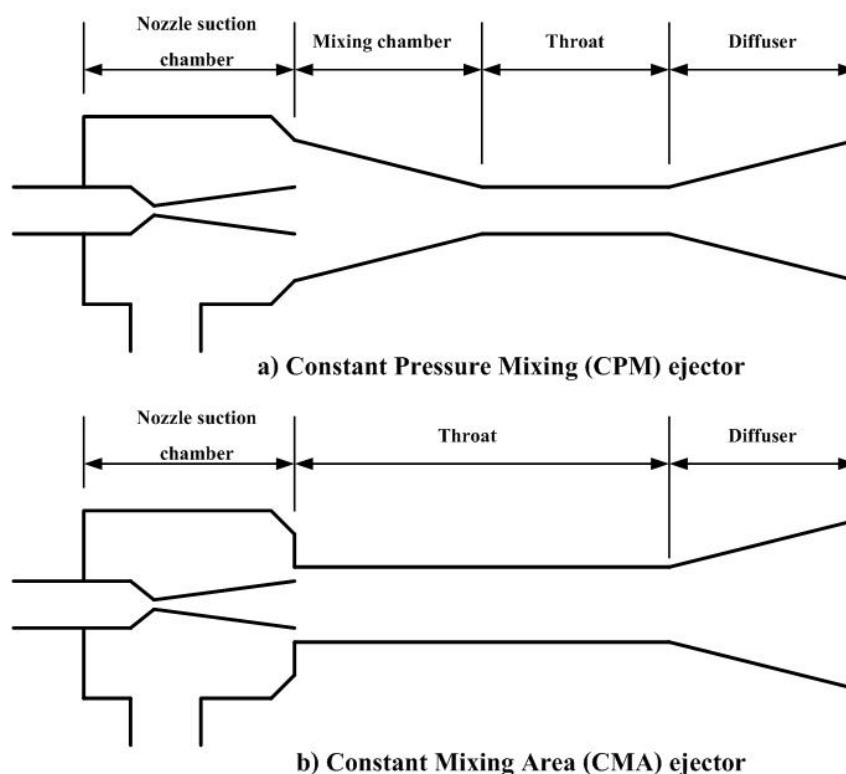
รูปที่ 2.5 รูปแบบการขยายตัวของของไหลปฐมภูมิที่ปากทางออกของหัวฉีด (Ruangtrakoon *et al.*, 2013: 133 - 145)

ที่ตำแหน่ง effective area ของไหลทุติยภูมิจะเริ่มผสมกับของไหลปฐมภูมิ แต่ปริมาณของไหลทุติยภูมิที่ผสมจะมีปริมาณน้อยและยังไม่ผสมกับของไหลปฐมภูมิทั้งหมด ของไหลทุติยภูมิที่ยังเหลือจะเริ่มผสมกับของไหลปฐมภูมิก็ต่อเมื่อความเร็วในการไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงและเกิดการไหลแบบ choked flow effective area สามารถเกิดขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดใดๆ ก็ได้ในบริเวณห้องผสมของอีเจ็คเตอร์และเป็นการยากมากที่จะระบุตำแหน่งของการเกิด effective area ที่ถูกต้องแม่นยำเพราะมันขึ้นอยู่กับความดันขณะทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์

ในระหว่างขบวนการผสม โมเมนตัมของของไหลปฐมภูมิจะถูกส่งผ่านไปยังของไหลทุติยภูมิ ด้วยเหตุนี้ของไหลปฐมภูมิจึงถูกหน่วงอย่างช้าๆ ดังสังเกตได้จากการค่อยๆ หายไปของ diamond wave ในขณะเดียวกันของไหลทุติยภูมิก็ค่อยถูกเร่งความเร็วขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ของผสม (ปฐมภูมิ+ทุติยภูมิ) ไหลผ่านคอคอดของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากอิทธิพลของความดันกลับที่มีค่าสูงจะ

ทำให้เกิดชุดของ 2nd series of oblique shock หรือ 2nd shock ในตำแหน่งที่ (8) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ผลของการเกิด 2nd shock นี้คือความดันของของไหลผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลที่ความเร็วเหนือเสียงเป็นต่ำกว่าเสียง ในช่วงลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ ความเร็วในการไหลหรือความดันพลศาสตร์ของของไหลผสมจะชะลอตัวลงจนเกือบจะหยุดนิ่งเพื่อที่จะเปลี่ยนกลับไปเป็นความดันสถิตก่อนที่จะปลดปล่อยไปยังเครื่องควบแน่น

2.1.2 ประเภทของอีเจ็คเตอร์



ภาพที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM (a) และ CMA (b)

อีเจ็คเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะทางกายภาพของมันซึ่งได้แก่ อีเจ็คเตอร์แบบ Constant Pressure Mixing (CPM) และอีเจ็คเตอร์แบบ Constant Mixing Area (CMA) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 อีเจ็คเตอร์แบบ CPM ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ห้องดูด (Nozzle suction chamber) ห้องผสม (Mixing chamber) คอคอด (Throat) และช่วงลู่ออก (Diffuser) (ภาพที่ 2.6a) ในขณะที่อีเจ็คเตอร์แบบ CMA มีส่วนประกอบเพียง 3 ส่วน คือ ห้องดูด (Nozzle suction chamber) คอคอด (Throat) และช่วงลู่ออก (Diffuser) อีเจ็คเตอร์แบบ CMA มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM แต่มีค่าความดันวิกฤตต่ำกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM (Aphornratana *et al.*, 2001: 397 - 341) ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์อีเจ็คเตอร์ทั้งสองชนิด

ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งพบว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM มีสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นสูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CMA ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อีเจ็คเตอร์แบบ CPM

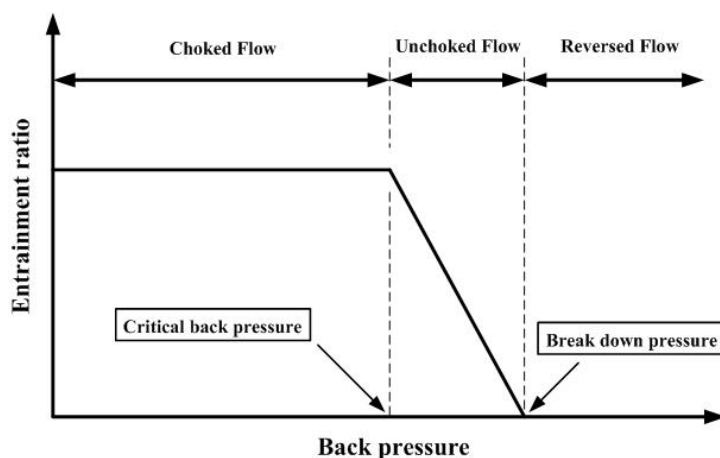
2.1.3 สมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์

ตัวชี้วัดที่สำคัญที่บอกลถึงสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ คือ อัตราส่วนการเหนียวน้ำ (Entrainment ratio, R_m) ซึ่งอัตราส่วนการเหนียวน้ำคืออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิต่ออัตราส่วนการไหลของของไหลปฐมภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$R_m = \frac{\text{mass flowrate of secondary fluid}}{\text{mass flowrate of primary fluid}} \quad (2.1)$$

ภาพที่ 2.7 แสดงคุณลักษณะเส้นกราฟสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งเส้นกราฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการไหลแบบ choke flow, การไหลแบบ unchoke flow และการไหลแบบย้อนกลับ (Reversed flow) ซึ่งทั้งสามช่วงการไหลถูกแบ่งออกจากกันโดยค่าความดันวิกฤต (Critical back pressure) และค่าความดันวิบัติ (Break down pressure)

ซึ่งสามารถอธิบายการไหลของอีเจ็คเตอร์ได้ดังนี้ หนึ่ง ภายใต้อัตราการไหลในช่วง choke flow ที่ความดันกลับ (Back pressure) หรือค่าความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ มีค่าน้อยกว่าค่าความดันวิกฤต อีเจ็คเตอร์จะเหนียวน้ำของไหลทุติยภูมิในปริมาณคงที่ซึ่งทำให้อัตราส่วนการเหนียวน้ำมีค่าคงที่ สอง ภายใต้อัตราการไหลแบบ unchoke flow ที่ค่าความดันกลับมีค่ามากกว่าความดันวิกฤตแต่น้อยกว่าค่าความดันวิบัติ ของไหลทุติยภูมิเกิดการไหลแบบ unchoke flow ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลลดลงเป็นสาเหตุให้อัตราส่วนการเหนียวน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว และสุดท้ายการไหลภายใต้อัตราการไหลย้อนกลับ ที่ค่าความดันกลับมีค่ามากกว่าค่าความดันวิบัติ การไหลของอีเจ็คเตอร์ในช่วงนี้จะเป็นการไหลย้อนกลับกล่าวคือของไหลปฐมภูมิจะไหลออกจากเข้าอีเจ็คเตอร์ของของไหลทุติยภูมิทำให้อีเจ็คเตอร์สูญเสียการทำงานของมันอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2.7 คุณลักษณะสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์

2.2 การออกแบบและปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์

2.2.1 การออกแบบอีเจ็คเตอร์

โดยทั่วไปแล้วขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมของอีเจ็คเตอร์จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของมัน ซึ่งสภาวะการทำงานที่สำคัญของอีเจ็คเตอร์ ได้แก่ ชนิดของของไหลที่ใช้ อุณหภูมิ และความดันที่บริเวณทางเข้าและออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบอีเจ็คเตอร์จะต้องคำนึงถึงสภาวะการทำงานจริงของอีเจ็คเตอร์นั้นๆ ด้วย เพื่อที่จะได้ขนาดและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่มีสมรรถนะการทำงานสูงสุด โดยการออกแบบอีเจ็คเตอร์นั้นได้มีการนำเสนอโดยนักวิจัยหลายท่าน รวมถึงสถาบันวิจัยเพื่อใช้ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์หลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

Keenan และ Neuman (1942: 75 - 81) ได้นำเสนอทฤษฎีวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ (1-D Analysis) โดยใช้คุณสมบัติของก๊าซในอุดมคติมาวิเคราะห์การไหลภายในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งต่อมาทฤษฎีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและประเมินผลสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์กันอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ก็ยังไม่สามารถอธิบายคุณลักษณะของการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ในขณะที่เกิดการผสมกันของของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ รวมทั้งวิธีนี้ยังไม่ได้นำเอาค่าแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลภายในอีเจ็คเตอร์มาทำการคำนวณด้วย ซึ่งต่อมา Khalil และคณะ (2011: 1684 - 1698) ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ บนพื้นฐานของสมการเชิงอนุพันธ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ตามลำดับ มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและทำนายประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สาร R134a เป็นสารทำความเย็น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้คำนวณการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานของการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ในช่วงคอคอของอีเจ็คเตอร์ด้วย โดยผลการคำนวณที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัย

ท่านอื่น ซึ่งพบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองเพียง 6 เปอร์เซ็นต์

Chou และคณะ (2001: 486 - 499) ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาจากทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ เพื่อทำการวิเคราะห์การไหลของไอเจ็คเตอร์ในช่วง Choked flow และทำนายอัตราการเหนี่ยวนำของไอเจ็คเตอร์ ซึ่งพวกเขาพบว่าผลการคำนวณของสมการของพวกเขาที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ

Huang และ Chang (1999: 379 - 388) ใช้ไอเจ็คเตอร์ที่มีรูปร่างต่างกัน 15 ขนาด ทดสอบและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ เพื่อที่จะทำนายสมรรถนะของไอเจ็คเตอร์โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่ของทางเข้าของของไหลทฤษฎีต่อคอคอดหัวฉีด, อัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio), อัตราส่วนความดัน และอัตราส่วนความดันยก เพื่อใช้ในการออกแบบไอเจ็คเตอร์ที่ใช้สาร R141b เป็นสารทำงาน โดยขนาดของไอเจ็คเตอร์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ คือ พื้นที่ของคอคอดหัวฉีด, คอคอดไอเจ็คเตอร์และทางเข้าของสารทฤษฎี นอกจากนี้ยังสามารถทำนายอัตราการเหนี่ยวนำของไอเจ็คเตอร์ได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 10 เปอร์เซ็นต์

Eames (2002: 121 - 131) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบไอเจ็คเตอร์แบบ Constant Rate Momentum Change (CRMC) ซึ่งเป็นการออกแบบโดยรวมเอาข้อดีของไอเจ็คเตอร์แบบ CMA และ CPM ไว้ด้วยกันซึ่งคาดหวังว่าไอเจ็คเตอร์แบบใหม่นี้จะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบเดิม สำหรับจุดเด่นของวิธีการนี้คือมีรูปร่างของช่วงดูดเข้าและออกของไอเจ็คเตอร์แบบใหม่ และลดการสูญเสียพลังงานจากการเกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) จากการศึกษาพบว่าไอเจ็คเตอร์ที่ออกแบบโดยวิธี CRMC มีอัตราการเหนี่ยวนำมากกว่า CPM และค่าความดันวิกฤตสูงกว่าไอเจ็คเตอร์แบบ CMA เล็กน้อยที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน

การออกแบบไอเจ็คเตอร์ที่นิยมใช้กันอีกวิธีหนึ่งนั่นก็คือกระบวนการออกแบบของ ESDU โดยวิธีนี้เกิดจากการทดลองและรวบรวมผลการศึกษาจากงานวิจัยหลายๆ งานวิจัย นำมาสรุปเป็นกระบวนการในการออกแบบไอเจ็คเตอร์ ซึ่งวิธีนี้ง่ายต่อการออกแบบและสร้างไอเจ็คเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นแต่ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถหาขนาดที่เหมาะสมของไอเจ็คเตอร์ได้ซึ่งรายละเอียดจะได้นำเสนอในบทถัดไป

นอกจากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์แล้วยังมีนักวิจัยบางท่านได้ใช้การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (CFD) มาร่วมในการออกแบบและศึกษาคุณลักษณะการไหลภายในไอเจ็คเตอร์อีกด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Sriveerakul และคณะ (2007: 812 - 822) ที่ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์กับผลการทดลองจริง ซึ่งพบว่า การจำลองการไหลเชิง

พลศาสตร์นอกจากจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำนายสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แล้วยังสามารถอธิบายคุณลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ได้เป็นอย่างดี จึงเป็นที่ยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าสามารถใช้การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์ได้

Yadev และ Patwardhan (2008: 3886 - 3897) ใช้การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์มาออกแบบและศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของห้องดูด (Suction chamber) พบว่า รูปร่างของห้องดูดมีอิทธิพลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำอย่างมีนัยสำคัญ อิทธิพลของขนาดของห้องดูดที่มีผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีความสลับซับซ้อนมาก กล่าวคือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดเมื่ออีเจ็คเตอร์มีขนาดของห้องดูดหลายขนาด อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์ (Area ratio) ที่มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.6 และมุมลู่อู่อีเจ็คเตอร์ควรมีขนาด 5° - 15° ในขณะที่ Ji และคณะ (2010: 2694 - 2702) ได้ใช้การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ศึกษาขนาดที่เหมาะสมของมุมลู่อู่อีเจ็คเตอร์ โดยใช้อีเจ็คเตอร์แบบ CPM และไอน้ำเป็นของไหลที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยขนาดมุมลู่อู่อีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 0° , 0.5° , 1° , 2° , 3.5° และ 4.5° ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ขนาดมุมลู่อู่อีเจ็คเตอร์เท่ากับ 1° อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์มีค่าสูงสุด

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ได้แก่ รูปร่าง สภาพะการทำงานและชนิดของสารทำงาน (Working fluid) โดยทั้งสามปัจจัยจะส่งผลต่อกันโดยตรง เช่น เมื่อสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงขนาดที่เหมาะสมของมันก็จะเปลี่ยนไป หรือเมื่อสารทำงานเปลี่ยน รูปร่างและสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ก็ต้องเปลี่ยนตาม ดังนั้น จึงมีความพยายามที่จะศึกษาเพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ของสภาวะการทำงาน และรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของมัน

Sriveerakul และคณะ (2007: 823 - 823) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของมัน ซึ่งเขาพบว่าในกรณีที่มีอีเจ็คเตอร์มีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง และมีอุณหภูมิของเครื่องระเหยคงที่ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้นจะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำลดลงแต่จะมีค่าความดันวิกฤตเพิ่มขึ้น และในกรณีที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอมีค่าคงที่ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความดันวิกฤตจะมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อสภาวะการทำงานคงที่ ถ้าหัวฉีดมีขนาดใหญ่ขึ้น อีเจ็คเตอร์จะมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำลดลงแต่จะมีค่าความดันวิกฤตสูงขึ้น ในขณะที่ถ้าความยาวของคอคอดอีเจ็คเตอร์จะไม่มีผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ แต่จะมีผลต่อทำให้ค่าความดันวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น

ตำแหน่งของหัวฉีด (Nozzle Exit Position, NXP) และความยาวของคอคอดอีเจ็คเตอร์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของมัน Pianthong และคณะ (2007: 2556 - 2564) ได้ประยุกต์ใช้การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (CFD) ศึกษาอิทธิพลของความยาวของคอคอดอีเจ็คเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ พบว่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเลื่อนตำแหน่งของหัวฉีดออกจากห้องผสม ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้ Effective area มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่เหมาะสมของมันจะมีเพียงแค่จุดเดียว เพราะถ้ายังเลื่อนออกไปอีกจะทำให้ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าลดลง ส่วนอีเจ็คเตอร์ที่มีคอคอดยาวจะมีค่าความดันวิกฤตสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีคอคอดสั้น โดยที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ แต่ถ้าอีเจ็คเตอร์มีความยาวของคอคอดมากเกินไปค่าความดันวิกฤตจะลดลง อย่างไรก็ตามความยาวของคอคอดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดอื่นๆ ของอีเจ็คเตอร์ รวมทั้งสภาวะการทำงานของมันด้วย

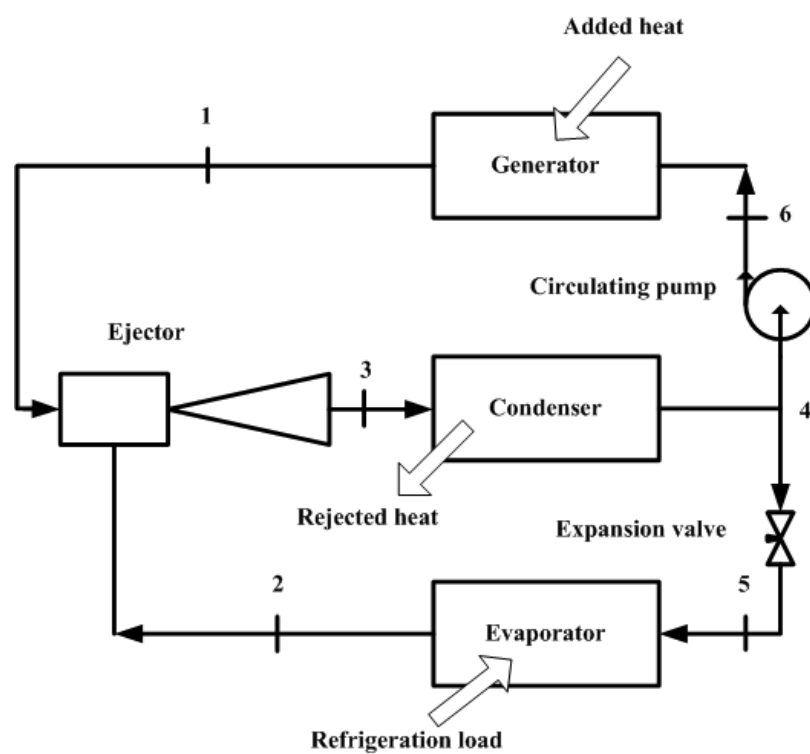
ต่อมา Varga และคณะ (2009: 1203 - 1211) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำโดยใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลข พบว่า ที่สภาวะการทำงานคงที่ เมื่ออัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้นถึงจุดๆ หนึ่ง อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นมันจะมีค่าลดลง โดยนิยามค่าอัตราส่วนพื้นที่ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงสุดนั้นว่า อัตราส่วนพื้นที่ที่เหมาะสม (Optimum area ratio) ซึ่งจะเห็นว่าที่สภาวะการทำงานคงที่จะมีอัตราส่วนพื้นที่ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาของ Sun (1999: 873 - 884) ที่ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้ว่า ในช่วงก่อนถึงจุดอัตราส่วนพื้นที่ที่เหมาะสม สาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ คือ เมื่อขนาดของคอคอดของหัวฉีดเพิ่มขึ้น (ขนาดของคอคอดอีเจ็คเตอร์คงที่) จะทำให้ของไหลปฐมนุมมีขนาดของลำพุ่งใหญ่ขึ้นเป็นสาเหตุให้มีพื้นที่ในการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิลดลง จึงเป็นสาเหตุให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ในขณะที่ในช่วงหลังจุดอัตราส่วนพื้นที่ที่เหมาะสม อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าต่ำเพราะขนาดของลำพุ่งของของไหลปฐมนุมมีขนาดที่เล็กจนไม่สามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลทุติยภูมิมีความเร็วถึงระดับของความเร็วเสียงได้

Guangming และคณะ (2010: 915 - 921) ได้ศึกษาอิทธิพลของความดันปฐมนุม ความดันทุติยภูมิและความดันกลับที่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันทุติยภูมิเพิ่มขึ้น, การลดลงของความดันกลับจะช่วยทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น และความดันปฐมนุมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ ซึ่งอัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันปฐมนุมมีค่าเพิ่มขึ้น

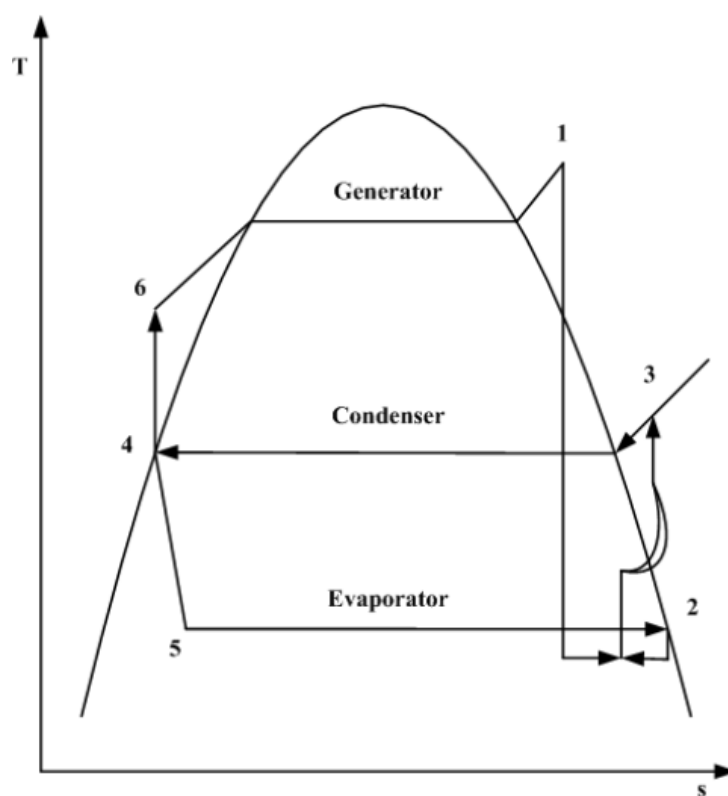
นอกจากปัจจัยด้านสภาวะการทำงาน และรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของมันแล้วชนิดของสารทำงานก็มีผลเช่นกัน Sevaraju และ Mani (2004: 827 - 838) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสภาวะการทำงานที่มีต่ออัตราส่วนพื้นที่และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้สารทำความเย็นหลายชนิด ได้แก่ R134a, R152a, R290, R600a และ R717 ซึ่งเขาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่, อัตราส่วนการเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่, อัตราส่วนการเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจะมีค่าลดลง สุดท้ายพวกเขาพบว่าการใช้สารทำความเย็น R134a มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็นชนิดอื่น

2.3 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

ในปี ค.ศ. 1910 Muarice Leblanc ได้นำเสนอวัฏจักรทำความเย็นที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นที่มีชื่อว่า “Vapour jet ejector cycle” ซึ่งวัฏจักรนี้สามารถใช้พลังงานความร้อนเกรดต่ำ (Low grade heat source) เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนระบบได้ ในช่วงเวลาดังกล่าวระบบนี้ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางโดยรู้จักกันในชื่อ “Steam jet refrigeration” ซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานปรับอากาศ (Elbel, 2011: 1545 - 1561) Steam jet refrigeration หรือ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system) ต่างจากระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapour compression refrigeration system) กล่าวคือ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังต่อไปนี้ อีเจ็คเตอร์, เครื่องกำเนิดไอ, เครื่องควบแน่น, เครื่องระเหย, เอ็กแพนชันวาล์วและปั๊มหมุนวน (Circulating pump) จะเห็นได้ว่าคอมเพรสเซอร์ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอถูกแทนที่ด้วย อีเจ็คเตอร์ เครื่องกำเนิดไอ และปั๊มหมุนวน ภาพที่ 2.8 และ 2.9 แสดงแผนผังอุปกรณ์และ T-s ไดอะแกรมของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 2.8 อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



ภาพที่ 2.9 T-s ไดอะแกรมระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

จากภาพที่ 2.8 และ 2.9 เครื่องกำเนิดไอในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ได้รับความร้อนจากภายนอก จะผลิตไอร้อนยวดยิ่ง (Superheat vapour) จากสารทำงานซึ่งมีความดันและอุณหภูมิสูงเพื่อใช้เป็นของไหลปฐมภูมิของอีเจ็คเตอร์ เมื่อของไหลปฐมภูมิไหลเข้าสู่อีเจ็คเตอร์ อีเจ็คเตอร์จะเหวี่ยงนำสารทำความเย็น (ของไหลทุติยภูมิ) ที่มีความดันต่ำจากเครื่องระเหย หลังจากนั้นของไหลทั้งสองชนิด (ของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิ) จะผสมกันภายในอีเจ็คเตอร์และถูกใช้เป็นสารทำความเย็นของระบบ สารทำความเย็นที่มีสถานะก๊าซจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวอัมคั่วที่ความดันและอุณหภูมิของเครื่องควบแน่น ก่อนที่ส่วนหนึ่งของสารทำความเย็นจะถูกนำกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอโดยปั๊มหมุนวน ในขณะที่ส่วนที่เหลือจะไหลผ่านอีกรุ่นชั้นวาล์วเข้าสู่เครื่องระเหย

ข้อดีของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์นอกจากที่สามารถใช้พลังงานความร้อนเกรดต่ำ เช่น ความร้อนทิ้งจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม พลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น ยังสามารถใช้น้ำที่ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสารทำความเย็นได้อีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันการนำพลังงานที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่หรือการใช้พลังงานทดแทนกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ซึ่งระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมในด้านนี้มาก แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังมีข้อเสียที่สำคัญข้อหนึ่ง คือ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นต่ำ

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์รับความร้อนเข้ายังระบบที่เครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย และคายความร้อนออกจากระบบที่เครื่องควบแน่น ดังแสดงในภาพที่ 2.8 จากสมการสมดุลความร้อนและมวล ตามลำดับ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.2) ถึง (2.5)

$$Q_G = \dot{m}_p (h_1 - h_6) \quad (2.2)$$

$$Q_E = \dot{m}_s (h_2 - h_5) \quad (2.3)$$

$$Q_C = \dot{m}_r (h_3 - h_4) \quad (2.4)$$

$$\dot{m}_r = \dot{m}_p + \dot{m}_s \quad (2.5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น คือ อัตราส่วนของวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นต่อพลังงานที่ให้กับระบบ ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$COP = \frac{Q_E}{(Q_G + W_P)} = \frac{Rm(h_2 - h_5)}{(h_1 - h_6) + v_4(P_G - P_C)} \quad (2.6)$$

ที่ Rm คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งอัตราส่วนการเหนี่ยวนำคืออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิต่ออัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ ดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$Rm = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ ตัวชี้วัดที่สำคัญที่ใช้ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER) โดยอัตราส่วนประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คือ อัตราส่วนของวิสัยสามารถการทำความเย็นต่อพลังงานที่ใช้ ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$EER = \frac{\text{Cooling capacity [BTU/h]}}{\text{Power consumption [W]}} \quad (2.8)$$

โดยวิสัยสามารถการทำความเย็นมีหน่วยเป็น บีทียูต่อชั่วโมง ในขณะที่พลังงานที่ใช้มีหน่วยเป็นวัตต์ โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของสภาวะการทำงานของระบบที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะขึ้นอยู่กับการทำงาน of อีเจ็คเตอร์ สภาวะการทำงานที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ, เครื่องควบแน่น, เครื่องระเหย, ชนิดของสารทำความเย็น และรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ ต่อจากนี้จะกล่าวถึงการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

Sun (1996: 919 - 929) ได้ทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์และรูปร่างของมัน ซึ่งเขาได้ให้คำแนะนำว่าในกรณีที่วิสัยสมรรถนะการทำความเย็นมีค่าคงที่ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์ควรจะปรับเปลี่ยนได้เพื่อรองรับสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น ขนาดของคอคอดหัวฉีด คอคอดอีเจ็คเตอร์ และความยาวของอีเจ็คเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น ขนาดของคอคอดหัวฉีด คอคอดอีเจ็คเตอร์และความยาวของอีเจ็คเตอร์จะมีค่าลดลง

นอกจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์แล้วตำแหน่งของหัวฉีดหรือ NXP (Nozzle Exit Position) ก็ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบด้วยเช่นกัน Aphornratana และ Eames (1997: 352 - 358) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวฉีดที่มีต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นและวิสัยสมรรถนะการทำความเย็น เขาพบว่า ในแต่ละสภาวะการทำงานจะมีตำแหน่งของหัวฉีดที่เหมาะสมอยู่เพียงตำแหน่งเดียวที่ทำให้สมรรถนะการทำงานสูงสุด ในกรณีที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยมีค่าคงที่ สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นและวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นจะมีค่าลดลงเมื่อเลื่อนตำแหน่งของหัวฉีดเข้าไปในห้องผสม แต่อย่างไรก็ตามระบบจะมีค่าความดันวิกฤตสูงขึ้น ในทางกลับกันระบบจะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นและวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อเลื่อนตำแหน่งของหัวฉีดออกจากห้องผสม แต่ค่าความดันวิกฤตของระบบก็จะลดลง Eames และคณะ (2007: 2833 - 2840) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างของหัวฉีดและตำแหน่งของมันที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็น ซึ่งพวกเขาพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดคอคอดของหัวฉีดเล็กจะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงกว่าแต่จะมีค่าความดันวิกฤตต่ำกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดของคอคอดหัวฉีดใหญ่ การเพิ่มขึ้นของขนาดคอคอดของหัวฉีดจะทำให้ อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความดันวิกฤตเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนตำแหน่งของหัวฉีดจะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงถึง 40%

อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ Selvaraju และ Mani (2006: : 1160 - 1166) ศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นโดยใช้อีเจ็คเตอร์ที่มีรูปร่างต่างกัน 6 รูปร่าง ทำงานภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำ ในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงถ้าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่อีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่สูงมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น อีเจ็คเตอร์จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างอีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่างกันพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่สูงจะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มี

อัตราส่วนพื้นที่ต่ำ ในกรณีที่อุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่สูงจะมีอัตราส่วนการเหี่ยวน้ำสูง แต่มีค่าความดันวิกฤตต่ำเมื่อเทียบกับอีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำ ต่อมา Sankarlal และ Mani (2007: 1403 - 1413) ได้สร้างชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น พวกเขาได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยใช้อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดอัตราส่วนพื้นที่ต่างกัน 3 ขนาดในการทดลอง พวกเขา พบว่า ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่และอัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มันจะลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัด (Compression ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ในการผสมของของไหลทั้งสองชนิดมากขึ้นทำให้อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่อัตราส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้น ความเร็วในการไหลของของไหลปฐมภูมิจะสูงขึ้นทำให้ความดันที่ปากทางออกของหัวฉีดมีค่าลดลง ทำให้อีเจ็คเตอร์สามารถเหี่ยวน้ำของไหลทุติยภูมิได้มากขึ้นทำให้อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำเพิ่มขึ้น และในกรณีที่อัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้น ค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์จะเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วในการไหลของทั้งสองสารลดลง เป็นเหตุผลให้อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำลดลง

Yapici และคณะ (2008: 1183 - 1189) ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ โดยใช้อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดอัตราส่วนพื้นที่ต่างกัน 6 ขนาด และใช้ R-123 เป็นสารทำความเย็น พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดก่อนที่จะลดต่ำลง, เมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจะมีค่าคงที่ก่อนที่จะลดลงเมื่อความดันของเครื่องควบแน่นมีค่าสูงกว่าค่าความดันวิกฤต นอกจากนี้ อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดอัตราส่วนพื้นที่สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นที่เหมาะสมสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดอัตราส่วนพื้นที่ต่ำ

Ruangtrakoon และคณะ (2011: 676 - 683) ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ โดยใช้หัวฉีดที่มีขนาดต่างกัน 8 ขนาด จากการศึกษา พบว่ารูปร่างของหัวฉีดมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบเป็นอย่างมาก โดยที่อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการไหลจะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนพื้นที่ ถึงแม้ว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่เท่ากันแต่มีขนาดของคอคอดหัวฉีดต่าง อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดคอคอดของหัวฉีดใหญ่กว่าจะมีอัตราการไหลของไหลปฐมภูมิสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดของคอคอดหัวฉีดเล็กกว่า และในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่ต่างกันแต่มีขนาดคอคอดของหัวฉีดเท่ากันอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากัน ในกรณีที่หัวฉีดมีค่า exit's Mach

number ของอีเจ็คเตอร์มีค่าเท่ากัน เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงแต่ค่าความดันวิกฤตจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ขนาดของคอคอดหัวฉีดมีค่าต่างกันทำงานที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยคงที่ อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามถ้าหัวฉีดนั้นมีค่าอัตราส่วนพื้นที่และค่า exit's Mach number เท่ากัน อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของคอคอดหัวฉีดมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่สามารถทำงานที่ค่าความดันวิกฤตสูงขึ้นได้

ในกรณีที่ขนาดคอคอดของหัวฉีดมีค่าเท่ากันทำงานที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยคงที่ อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามถ้าอัตราส่วนพื้นที่มีค่าต่างกัน หัวฉีดจะมีค่า exit's Mach number ต่างกัน อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับอัตราส่วนพื้นที่ หัวฉีดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ใหญ่ จะมีค่า exit's Mach number สูง และสามารถทำงานที่ค่าความดันวิกฤตสูงกว่าหัวฉีดที่มีอัตราส่วนพื้นที่เล็ก

เพื่อเป็นการยืนยันผลการศึกษานี้ Ruangtrakoon และคณะ (2013: 133 - 145) ได้ใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลขจำลองการไหลเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งพบว่า ผลการจำลองการไหลเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างมาก

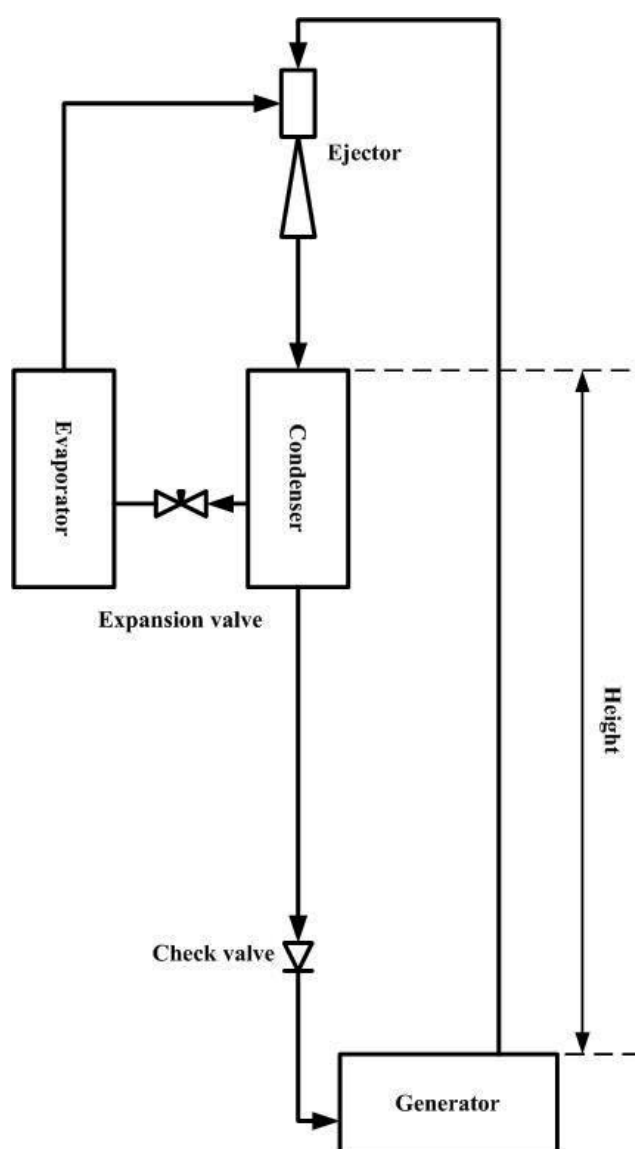
นอกจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์แล้วสภาวะการทำงานก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็น Sankarlal และ Mani (2006: 224 - 230) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะการทำงานของระบบที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของมัน โดยสารทำความเย็นที่ใช้กับระบบของเขาคือแอมโมเนีย ช่วงของอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ, เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นที่ทำการทดลองเท่ากับ 60°C - 72°C , 5°C - 15°C และ 30°C - 36°C ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิของเครื่องควบแน่นคงที่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้นความดันที่ตกคร่อมหัวฉีดจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วในการไหลของของไหลปฐมภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นอัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิก็จะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะลดลง เพราะเมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น ค่าความดันวิกฤตและอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ความเร็วในการไหลของของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิลดลง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น (COP) จะมีค่าแปรผันตรงกับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำและแปรผกผันกับค่าเอนทาลปีที่ตกคร่อมเครื่องกำเนิดไอ

Yapıcı และ Yetişen (2007: 1560 - 1568) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานที่มีผลต่อวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบ โดยใช้ R-11 เป็นสารทำความเย็น ซึ่งพวกเขาพบว่า วิสัยสมรรถนะการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น แต่มันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น อีกหนึ่งปีต่อมา Yapıcı (2008: 953 - 961) ได้ศึกษาแบบเดียวกันกับของ Yapıcı และ Yetişen แต่เปลี่ยนสารทำความเย็นเป็นสาร R-123 ซึ่งก็ได้ผลสอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น วิสัยสมรรถนะการทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นก่อนที่จะมีค่าคงที่ สาเหตุที่ทำให้วิสัยสมรรถนะการทำความเย็นมีค่าคงที่หลังจากที่ผ่านจุดอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอที่เหมาะสม นั้นเป็นเพราะอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมีค่าคงที่หรือของไหลทุติยภูมิอยู่ในช่วงการไหลแบบ choked flow ในขณะที่สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุดที่เหมาะสม) ก่อนที่จะมีค่าลดลงเนื่องจากว่า ก่อนที่จะถึงจุดที่เหมาะสม อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้น หลังจากจุดที่เหมาะสม เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอก็เพิ่มขึ้นแต่อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องระเหย (วิสัยสมรรถนะการทำความเย็น) มีค่าเท่าเดิมจึงเป็นสาเหตุให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบลดลง, เมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะเพิ่มขึ้น เพราะอัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นแต่อัตราการไหลของไหลปฐมภูมิมีค่าคงที่ และเมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะมีค่าคงที่ก่อนที่จะลดลงเมื่อความดันของเครื่องควบแน่นผ่านจุดความดันวิกฤต

นอกจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์และสภาวะการทำงานของระบบแล้ว ชนิดของสารทำความเย็นก็มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบเช่นกัน Selvaraju และ Mani (2004: 915 - 921) ศึกษาผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบที่ใช้สารทำความเย็นต่างกัน ที่สภาวะการทำงานเหมือนกัน โดยใช้สมการการไหลแบบ 1 มิติของอีเจ็คเตอร์ โดยสารทำความเย็นที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ R134a, R152a, R290, R600 และ R717 ซึ่งพวกเขาพบว่าสารทำความเย็น R134a ให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงที่สุด

2.4 การพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

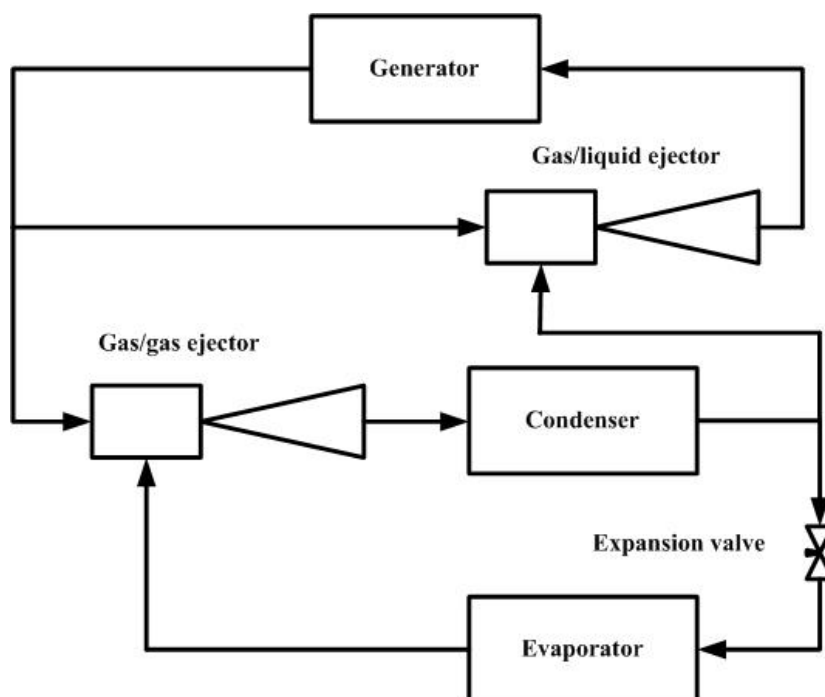
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าโดยทั่วไประบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะมีปั๊มหมุนวน (Circulating pump) ที่ใช้ส่งของเหลวที่ออกจากเครื่องควบแน่นกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักเพียงชิ้นเดียวที่ใช้ไฟฟ้าและต้องการการซ่อมบำรุงมากกว่าอุปกรณ์หลักอย่างอื่น จึงมีความพยายามที่จะทำให้ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ



ภาพที่ 2.10 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แรงโน้มถ่วง

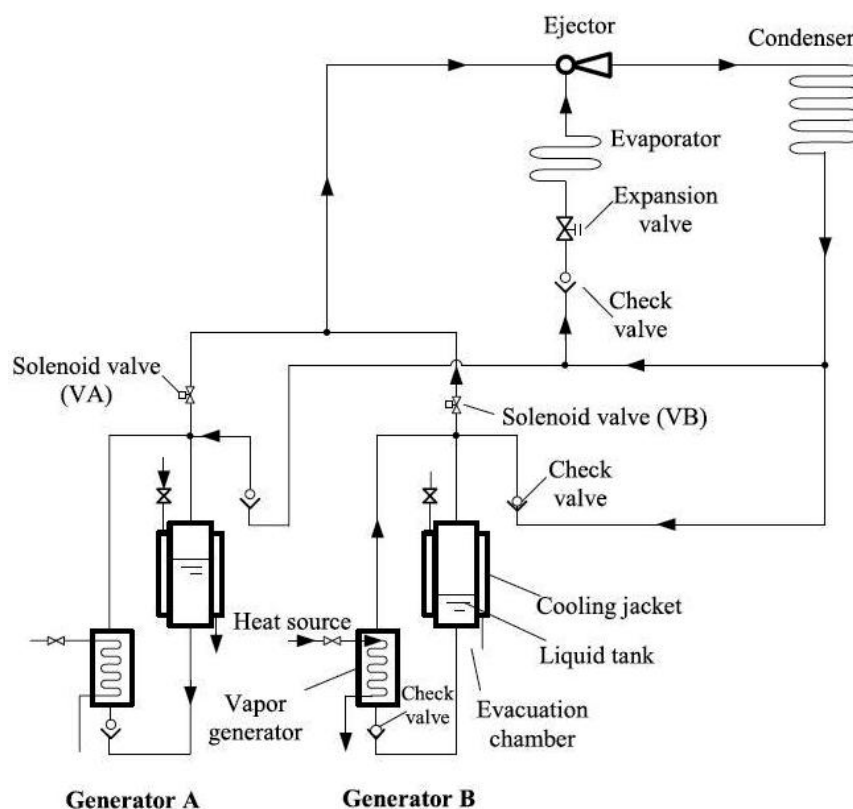
Nguyen และคณะ (2001: 157 - 168) ได้ออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แรงโน้มถ่วง (Gravity pumped ejector refrigeration system) ส่งของเหลวที่ออกจากเครื่องควบแน่นไปยังเครื่องกำเนิดไอที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นต้นกำลัง ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ พบว่า ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แบบที่ใช้แรงโน้มถ่วงมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า, ต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่า, มีเสียงรบกวนน้อยกว่าและมีความเสี่ยงที่จะเสียหายน้อยกว่าและใช้พลังงานที่มีความสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แต่ระบบนี้ก็มีข้อเสียคือ สมรรถนะการทำความเย็นต่ำ, ใช้ท่อขนาดใหญ่เนื่องจากใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น หรือพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์มีความไม่แน่นอน เป็นต้น ในด้านเศรษฐศาสตร์แล้วระบบของพวกเขาจะมีระยะเวลาคืนทุนภายใน 33 ปี

Shen และคณะ (2005: 2891 - 2902) ได้นำเสนอระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ที่ใช้อีเจ็คเตอร์คู่ (Bi-ejector refrigeration system) ทำงานร่วมกัน โดยอีเจ็คเตอร์ตัวที่หนึ่ง (Gas-gas ejector) ใช้ในการดูดสารทำความเย็นจากเครื่องระเหยส่งไปยังเครื่องควบแน่น ในขณะที่อีเจ็คเตอร์ตัวที่ 2 (Gas-liquid ejector) ทำหน้าที่ปั๊มสารทำความเย็นจากเครื่องควบแน่นไปยังเครื่องกำเนิดไอ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 จากการศึกษาของพวกเขา พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะขึ้นอยู่กับอีเจ็คเตอร์อีเจ็คเตอร์ตัวที่ 1 และเมื่อใช้ R717 เป็นสารทำความเย็น จะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นมากกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 0.26



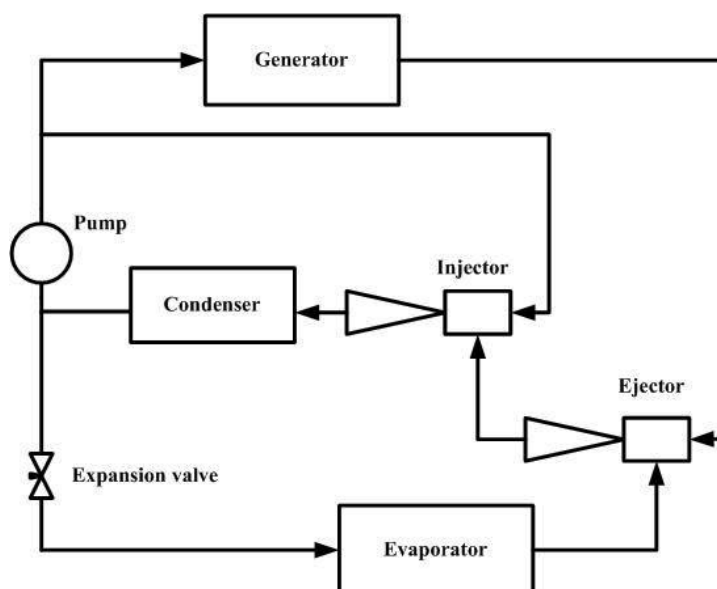
ภาพที่ 2.11 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์คู่

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ Multi-Function Generator (MFG) แทนการใช้ปั๊มหมุนวน (ดังแสดงในภาพที่ 2.12) ได้ถูกนำเสนอโดย Huang และคณะ (2006: 476 – 484) ทำหน้าที่เป็นทั้งปั๊มและเครื่องกำเนิดไอ ซึ่งระบบนี้จะมี MFG อยู่ 2 ตัว ทำหน้าที่สลับกันคือ เมื่อตัวหนึ่ง (Generator A) ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำ อีกตัว (Generator B) จะทำหน้าที่ดูดน้ำจากเครื่องควบแน่น พวกเขาพบว่า ระบบนี้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นต่ำเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ปั๊มหมุนวน แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีก เช่น เพิ่ม thermosyphon effect ให้แก่ของเหลวที่ไหลกลับเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโดยการเพิ่มความสูงระหว่างถังเก็บของเหลวกับเครื่องกำเนิดไอ เพื่อลดระยะเวลาในช่วง pressurizing และการสิ้นเปลืองพลังงาน หรือเปลี่ยนการทำความเย็นเพื่อเพิ่มระยะเวลาทำงานของช่วงกำเนิดไอ (Vapor discharge phase) เป็นต้น ซึ่งต่อมา Wang และคณะ (2009: 1904 - 1912) ได้ทำการปรับปรุงการทำงานของระบบให้สามารถทำงานได้ครบวัฏจักรโดยใช้สวิตช์อัตโนมัติควบคุมการทำงานของ MFG ซึ่งสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดของระบบเป็น 0.225 จากเดิม 0.218



ภาพที่ 2.12 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ Multi-Function Generator (Huang *et al.*, 2006: 476 – 484)

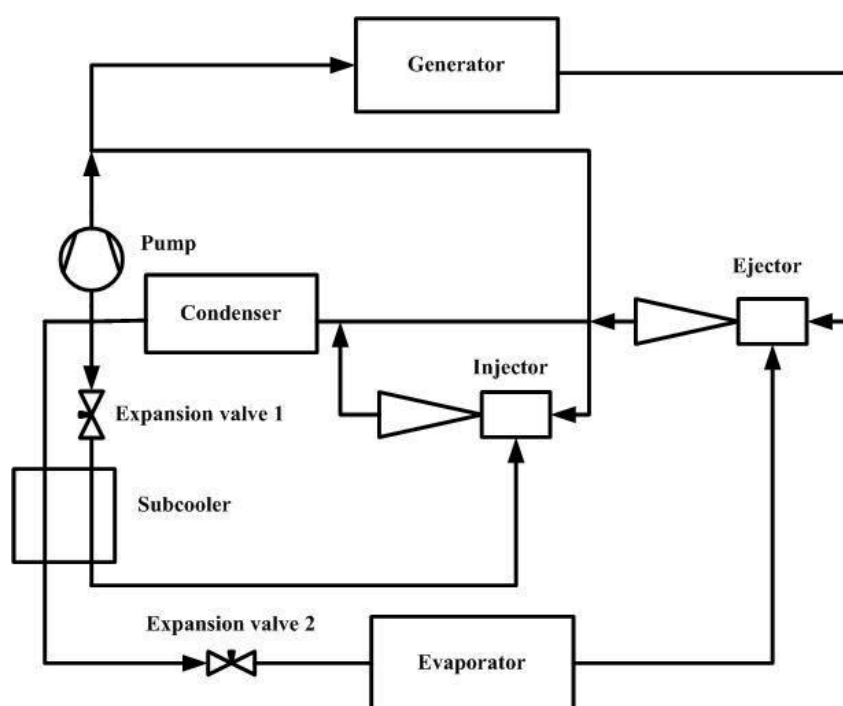
Yu และคณะ (2006: 312 - 319) ได้นำเสนอระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ที่เพิ่มเจ็ทปั๊มเข้าไปในระบบ (Ejector refrigeration system with an additional jet pump) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 สำหรับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลัก คือ ความดันปฐภูมิ, ความดันทุติยภูมิและความดันกลับ ถ้าสามารถลดค่าความดันกลับลง ในขณะที่ความดันปฐภูมิและทุติยภูมิมีค่าคงที่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเจ็ทปั๊มนี้อาจทำให้ค่าความดันกลับของอีเจ็คเตอร์ลดลง และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นได้ เพราะค่าอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของอีเจ็คเตอร์ลดลง ซึ่งจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าระบบทำความเย็นแบบใหม่นี้มีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ทั่วไปโดยเพิ่มขึ้นประมาณ 57% และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่เครื่องกำเนิดไอลดลง 52-64%



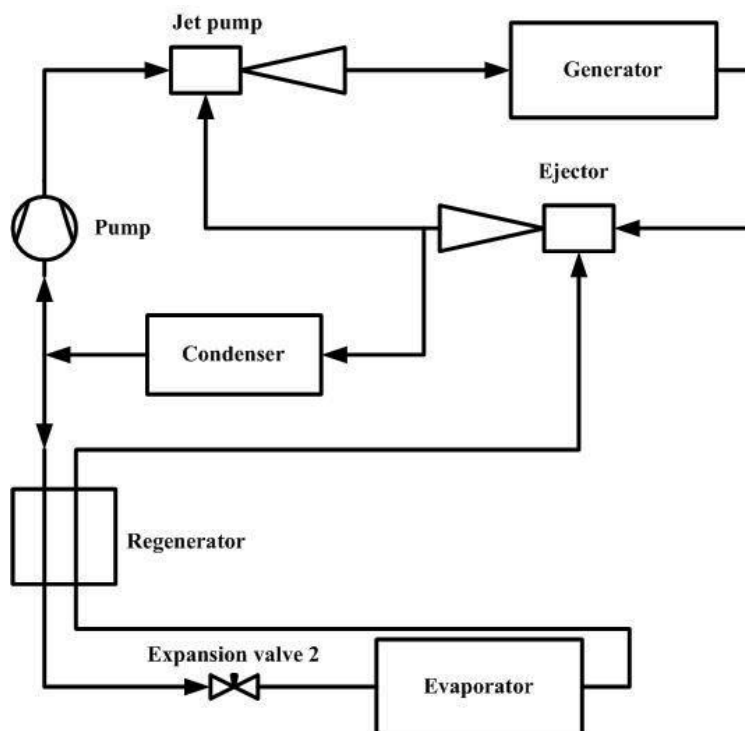
ภาพที่ 2.13 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับเจ็ทปั๊ม

อีกหนึ่งปีต่อมา Yu และคณะ (2007: 1193 - 1199) ได้ออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ที่ใช้ซับคูลเลอร์ (Subcooler) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยซับคูลเลอร์นี้สามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิลดลงจนมีสถานะเย็นยิ่งยวด (Subcooling) ก่อนที่จะเข้าเครื่องระเหยได้ ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้นได้ โดยระบบนี้สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบได้ 10% เมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ทั่วไป นอกจากนี้ในปีเดียวกันนั้นเอง Yu และ Li (2007: 464 - 470) ก็ได้นำเสนอระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้เจ็ทปั๊มในการให้ความร้อน

ล่วงหน้า (Preheating) แก่สารทำความเย็นก่อนที่จะกลับเข้าเครื่องกำเนิดไอ ซึ่งระบบนี้เรียกว่า ระบบทำความเย็นแบบรีเจนเนอเรทีฟ-อีเจ็คเตอร์ (Regenerative ejector refrigeration cycle) ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ของเหลวแรงดันสูงที่มาจากปั๊มหมุนวนจะถูกใช้เป็นของไหลปฐมภูมิของอีเจ็คเตอร์ เพื่อเหนี่ยวนำส่วนหนึ่งของสารทำงานในสถานะก๊าซที่ออกจากอีเจ็คเตอร์ (อุณหภูมิสูง) ที่ถูกใช้เป็นของไหลทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์ เมื่อของไหลทั้งสองผสมกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ของไหลปฐมภูมิมีอุณหภูมิสูงขึ้นและของไหลทุติยภูมิกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวก่อนที่จะของไหลทั้งสองจะไหลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอ ซึ่งเมื่อมีการให้ความร้อนล่วงหน้าแก่สารทำงานก่อนที่จะเข้าเครื่องกำเนิดไอจะส่งผลให้การใช้พลังงานของเครื่องกำเนิดไอลดลง นอกจากนี้ระบบนี้ยังมีรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานที่ออกจากเครื่องควบแน่นกับสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหย (ของไหลทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์) ซึ่งมีผลทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งพวกเขาพบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่มีอีเจ็คเตอร์จะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 9.3-12.1% และถ้าเพิ่มรีเจนเนอเรเตอร์เข้าไปในระบบจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 17.8% เมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ทั่วไป ตามลำดับ

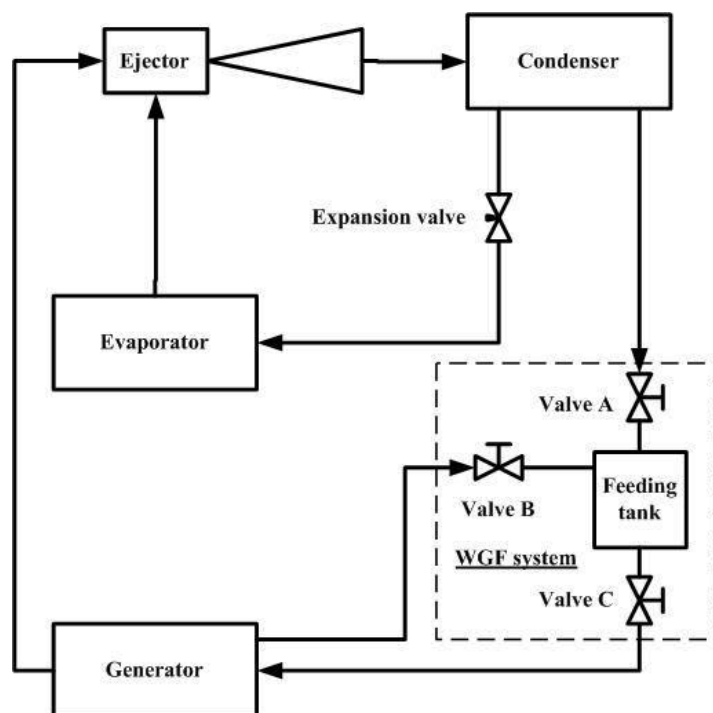


ภาพที่ 2.14 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์-ซับคูลเลอร์



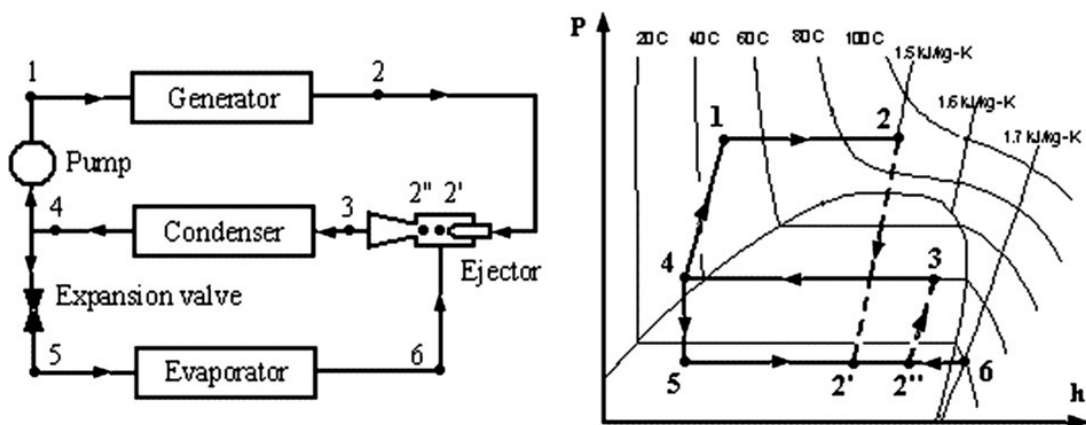
ภาพที่ 2.15 ระบบทำความเย็นแบบบริเจนเนอร์ทีฟ-อีเจ็คเตอร์

ต่อมา Srisastra และคณะ (2008: 921 - 929) ได้นำเสนอระบบ Workless-Generator-Feeding (WGF) สำหรับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งระบบนี้อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงดันจากเครื่องกำเนิดไอในการส่งของเหลวที่ได้จากเครื่องควบแน่นไปยังเครื่องกำเนิดไอ โดยระบบนี้แบ่งการทำงานเป็นสองจังหวะ คือ จังหวะเติม (Filling phase) และจังหวะจ่าย (Feeding phase) ในจังหวะเติม วาล์ว A จะเปิดในขณะที่วาล์ว B และ C ปิด ของเหลวจากเครื่องควบแน่นจะไหลเข้าสู่ถังเก็บ (Feeding tank) เมื่อระดับของเหลวถึงระดับที่ต้องการแล้ว วาล์ว A จะปิด ต่อมาในจังหวะจ่าย วาล์ว A จะปิด วาล์ว B จะเปิดทำให้ก๊าซแรงดันสูงจากเครื่องกำเนิดไอไหลเข้าสู่ถังเก็บแล้วจึงผลักดันของเหลวให้เข้าสู่เครื่องกำเนิดไอผ่านวาล์ว C ที่เปิดอยู่ เมื่อของเหลวในถังเก็บหมดไป วาล์ว B และ C จะปิดตัวลง จากนั้นจึงเริ่มจังหวะเติมอีกครั้ง โดยระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ระบบ WGF นี้จะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ทั่วไปเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 2.16 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ระบบ WGF

Yu และ Du (2010: 2034 - 2039) ได้นำเสนอระบบทำความเย็นแบบทรานส์คริติคอลอีเจ็คเตอร์ (Transcritical ejector refrigeration cycle) ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งข้อแตกต่างของระบบนี้จากระบบดั้งเดิม คือ สารทำความเย็นของระบบนี้จะทำงานภายใต้กระบวนการทรานส์คริติคอล (Transcritical process) ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับระบบแบบดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังเป็นเพียงแค่ทฤษฎีและยังเป็นการศึกษาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เท่านั้น ยังไม่มีผลการทดลองรองรับกับทฤษฎีนี้แต่อย่างใด

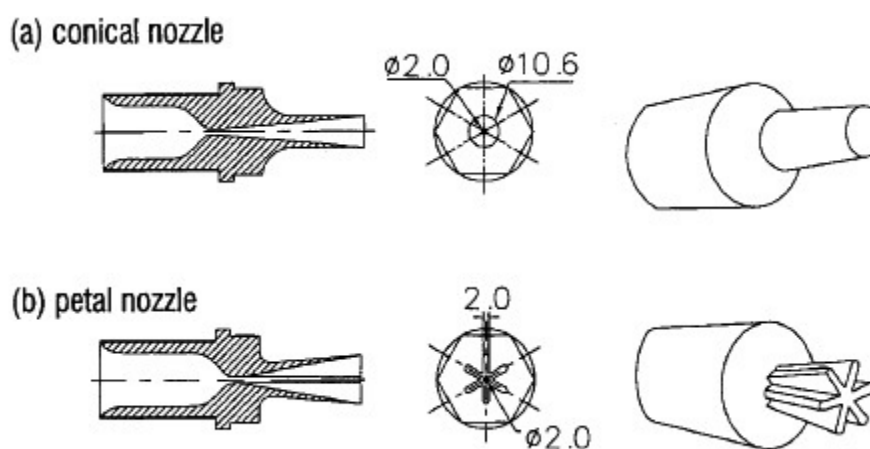


ภาพที่ 2.17 ระบบทำความเย็นแบบทรานส์คริติคอลอีเจ็คเตอร์ (Yu and Du, 2010: 2034 - 2039)

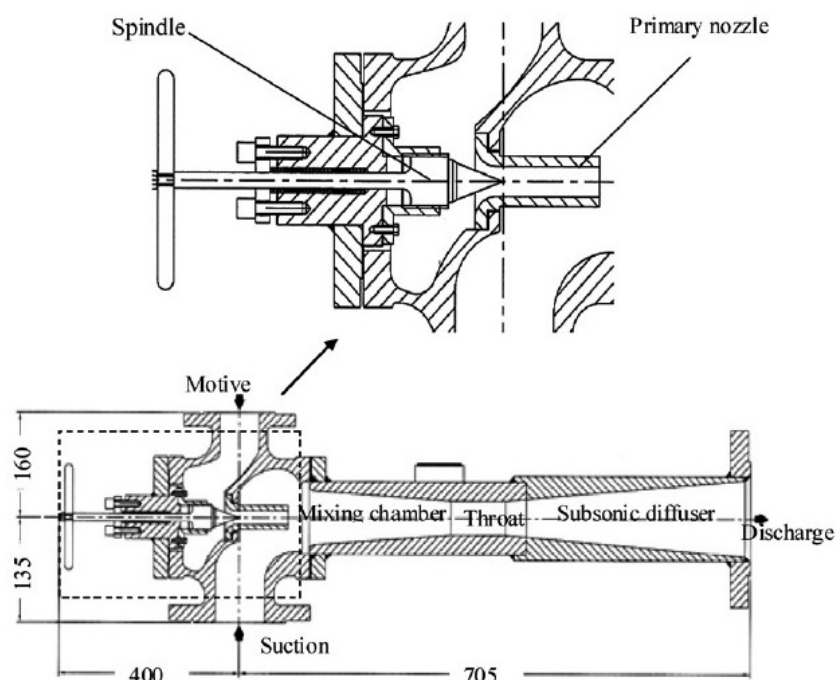
หัวใจของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์คืออีเจ็คเตอร์ ซึ่งสมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ จึงเป็นเหตุผลให้มีความพยายามคิดค้นอีเจ็คเตอร์รูปแบบใหม่ที่มีสมรรถนะการทำงานมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบเดิม

Chang และ Chen (2000: 203 - 211) ได้ประยุกต์ใช้หัวฉีดแบบกลีบ (Petal nozzle) เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ภาพที่ 2.18 แสดงขนาดของหัวฉีดแบบกลีบและหัวฉีดแบบทั่วไปที่ใช้ในการทดลองนี้ จากการทดลองพวกเขา พบว่า สำหรับอีเจ็คเตอร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่สูง อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบกลีบจะมีสมรรถนะการทำงานสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเดิม อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะของการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ที่เกิดจากหัวฉีดแบบกลีบยังคงซับซ้อนยากที่จะทำความเข้าใจ ด้วยเหตุนี้รายละเอียดในการออกแบบหัวฉีดชนิดนี้ยังต้องการการศึกษาอีกมาก

อีก 10 ปีต่อมา Ma และคณะ (2010: 1320 - 1325) ได้ออกแบบและสร้างอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ที่สามารถปรับอัตราส่วนพื้นที่ได้ โดยใช้แกนหมุน (Spindle) ที่มีลักษณะปลายแหลมและสามารถเคลื่อนที่เข้าออกหัวฉีดได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.19 การเคลื่อนที่เข้าออกของแกนหมุนจะเป็นการปรับอัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์ซึ่งจะทำให้สามารถหาอัตราส่วนพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ได้ จากการศึกษาของพวกเขาพบว่า เมื่อเคลื่อนแกนหมุนเข้าไปยังหัวฉีด วิสัยสามารถการทำความเย็นของระบบจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิลดลง แต่ความดันวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น สมรรถนะการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเครื่องระเหยจะทำให้ความดันวิกฤตเพิ่มขึ้นทีละน้อยตามไปด้วย อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น แต่สมรรถนะการทำงานของระบบไม่ได้เพิ่มขึ้นเสมอไป



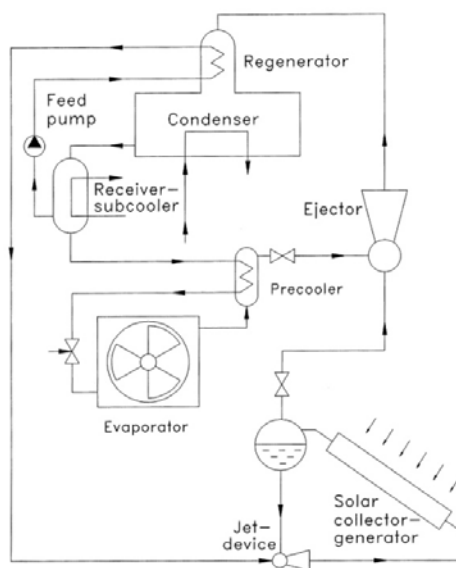
ภาพที่ 2.18 ลักษณะของหัวฉีดแบบทั่วไปและแบบกลีบ (Chang and Chen, 2000: 203 - 211)



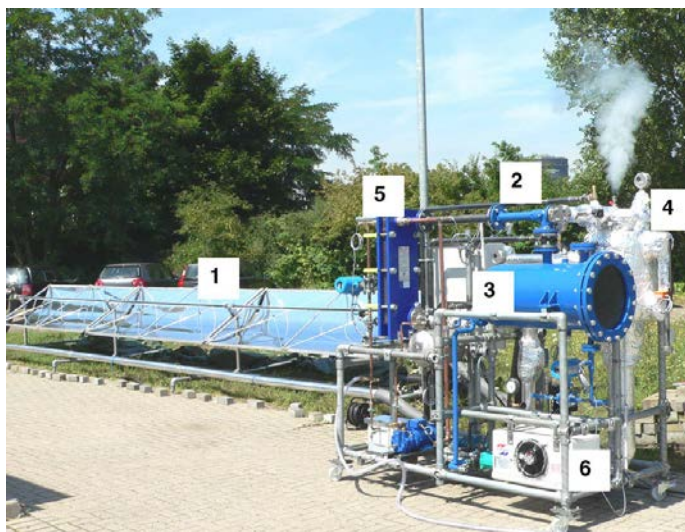
ภาพที่ 2.19 อีเจ็คเตอร์ที่ปรับอัตราส่วนพื้นที่ได้ (Ma *et al.*, 2010: 1320 - 1325))

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยมีเป้าหมายหลักคือการเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของระบบ รวมถึงการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะทำให้ระบบนี้เป็นระบบที่ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้อีเจ็คเตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นกันอย่างกว้างขวาง

ในปี 1998 Huang และคณะ (1998: 223 - 226) ได้พัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์โดยใช้เครื่องกำเนิดไอจากแสงอาทิตย์ (Solar collector generator) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน และใช้ R141b เป็นสารทำความเย็น โดยระบบนี้ประกอบด้วย 4 อุปกรณ์หลักได้แก่ โซลาร์คอลเล็กเตอร์ (Solar collector), อีเจ็คเตอร์, เครื่องควบแน่น/รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) และเครื่องระเหย ดังแสดงในภาพที่ 2.20 โดยโซลาร์คอลเล็กเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไอของระบบ โดยระบบของเขามีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดเท่ากับ 0.22 อย่างไรก็ตามการศึกษาของเขาก็เป็นเพียงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำการศึกษเท่านั้น ยังไม่ได้ทำการทดลองจริงแต่อย่างใด ต่อมาในปี 2009 Pollerberg, Hamza และ Dötsch (2009: 1245 - 1252) ได้สร้างชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งชุดทดลองของพวกเขาสามารถทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.62 ยูโรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และ 0.15 ยูโรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ในเยอรมันนีและอียิปต์ ตามลำดับ



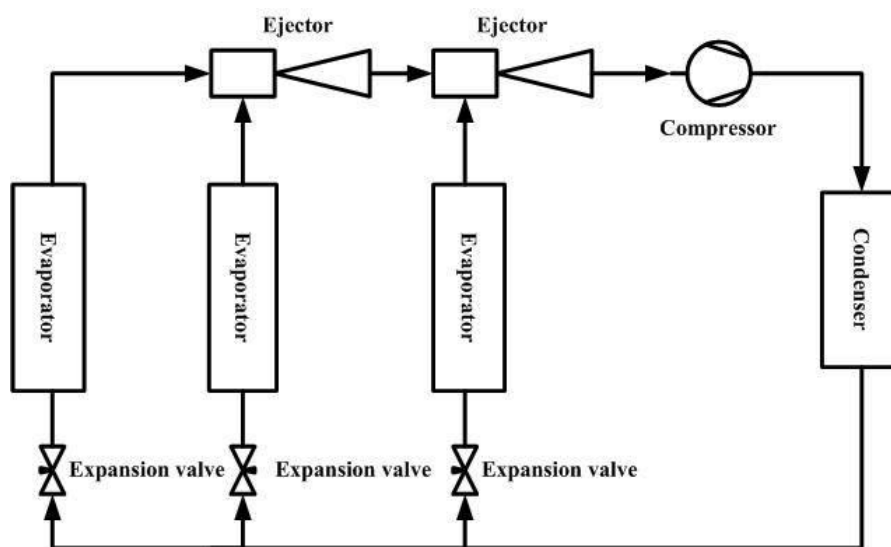
ภาพที่ 2.20 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์พลังงานแสงอาทิตย์ (Huang *et al.*, 1998: 223 - 226)



ภาพที่ 2.21 ชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Pollerberg, Hamza and Dötsth, 2009: 1245 - 1252)

L. Kairouani และคณะ (2009: 1173 - 1185) ได้นำอีเจ็คเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับระบบทำความเย็นชนิดเครื่องระเหยหลายชุด (Multi-evaporator refrigeration system) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบแบบเดิม สำหรับระบบแบบใหม่นี้ อีเจ็คเตอร์ได้ถูกติดตั้งไว้ที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์เหล่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.22 ซึ่งอีเจ็คเตอร์จะสามารถเพิ่มแรงดันด้านดูดของระบบได้ ในขณะเดียวกันก็เป็นการลดงานที่เกิดขึ้นที่คอมเพรสเซอร์ ด้วยเหตุนี้ระบบทำความเย็นแบบใหม่นี้ จึงมีสมรรถนะการทำความเย็นสูงกว่าแบบเดิม นอกจากนี้พวกเขายังพบว่า การใช้ R141b เป็นสาร

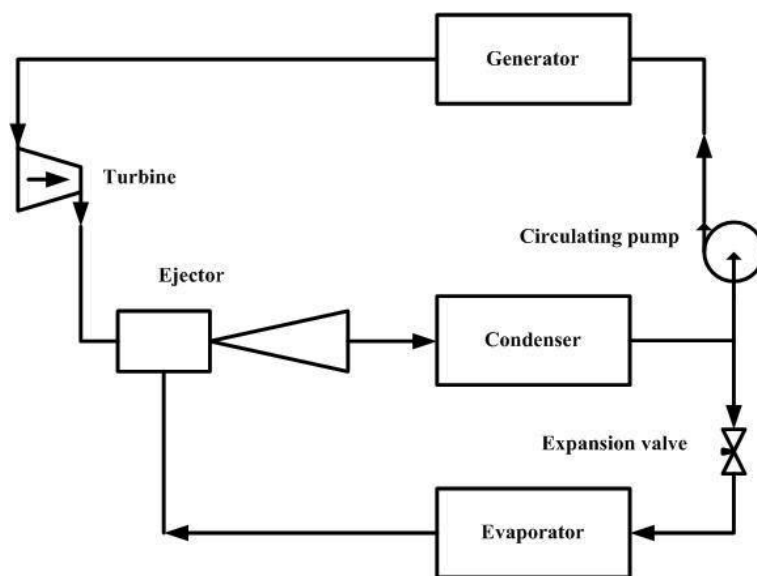
ทำความเย็นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงกว่าการใช้สารทำความเย็นชนิดอื่น (R290, R600a, R717, R134a และ R152a)



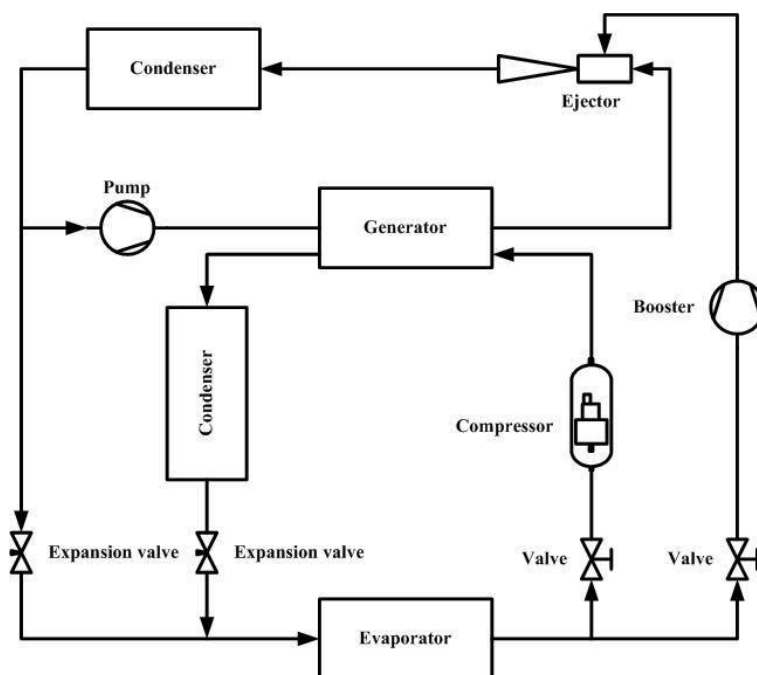
ภาพที่ 2.22 ระบบทำความเย็นแบบเครื่องระเหยหลายชุดแบบใหม่

ต่อมาในปี 2010 Zheng และ Weng (2010: 784 - 791) ได้นำเสนอระบบกำเนิดพลังงาน ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 โดยเป็นการทำงานร่วมกันของ ระบบต้นกำลังแรนกิน (Rankine cycle) และระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ จากผลการจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า ระบบนี้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 34.1 %, ประสิทธิภาพเชิง ประสิทธิภาพ (Effective efficiency) 18.7% และเอ็กเซอร์จี 56.8% โดยระบบนี้จะมีการสูญเสียเอ็กเซอร์จีส่วนใหญ่อยู่ที่อีเจ็คเตอร์

นอกจากนี้ยังมีการนำเอาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ไปใช้ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบแบบอัดไอ ซึ่งระบบนี้ได้ถูกนำเสนอ โดย Zhu และ Jiang (2012: 68 - 78) ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะถูกติดตั้งเข้าไปยังระบบทำความเย็นแบบอัดไอดังแสดงในภาพที่ 2.24 และใช้ความร้อนจากเครื่องควบแน่นของระบบอัดไอ เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนระบบ วิสัยความสามารถการทำความเย็นที่ได้จากระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะเพิ่มวิสัยความสามารถการทำความเย็นของระบบแบบอัดไอโดยตรง เนื่องจากทั้งสองระบบใช้เครื่องระเหยเดียวกัน จากผลการจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบร่วมเพิ่มขึ้น 5.5% (ใช้ R152a เป็นสารทำความเย็น) และ 8.6% (ใช้ R22 เป็นสารทำความเย็น) เมื่อเทียบกับระบบแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังไม่ได้ทำการทดลองจริง



ภาพที่ 2.23 ระบบกำเนิดพลังงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



ภาพที่ 2.24 ระบบทำความเย็นร่วม