

การศึกษาการนำไอน้ำที่ความดันต่ำกลับมาใช้ใหม่
โดยสตีมีอีเจคเตอร์

นายไชยณรงค์ จักรธรานนท์



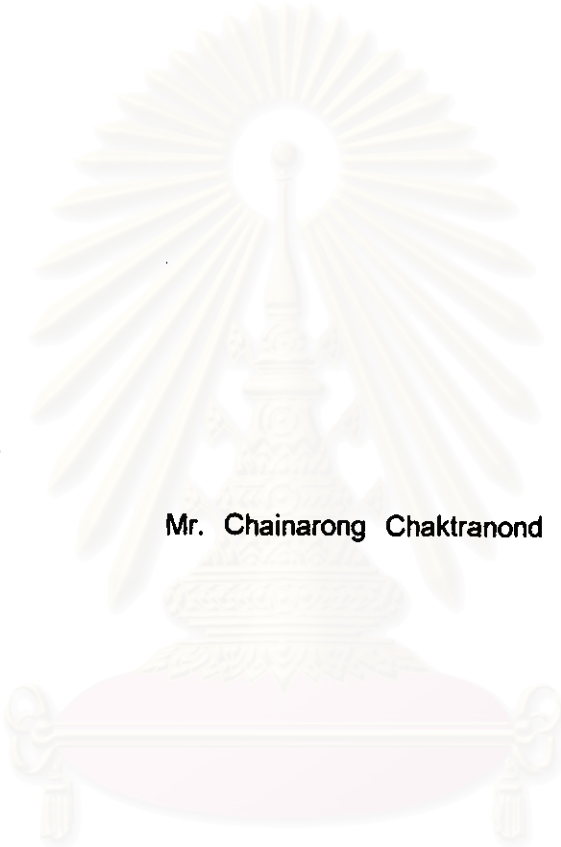
สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-754-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**STUDY ON LOW PRESSURE STEAM
RECOVERY BY THE STEAM EJECTOR**



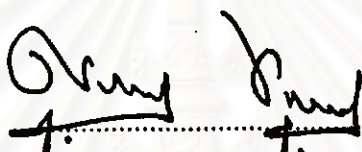
Mr. Chainarong Chaktranond

สถาบันวิทยบริการ
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering

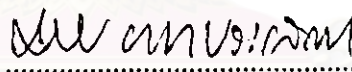
**Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1997
ISBN 974-638-754-5**

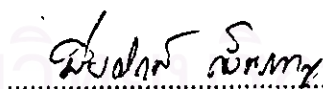
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการนำไอน้ำที่ความดันต่ำกลับมาใช้ใหม่โดยสเต็มอีเจคเตอร์
โดย นายไชยณรงค์ จักรธรานนท์
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

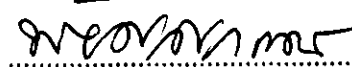
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์)

ไชยณรงค์ จักรธรรณท์ : การศึกษาการนำไอน้ำที่ความดันต่ำกลับมาใช้ใหม่โดยสตีม
อีเจกเตอร์ (STUDY ON LOW PRESSURE STEAM RECOVERY BY THE STEAM
EJECTOR) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 138 หน้า ISBN 974-638-754-5

สตีมอีเจกเตอร์ได้ถูกออกแบบเพื่อให้เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรูปจากพลังงานที่อยู่ในรูปของความดันให้เป็นพลังงานจลน์ในรูปของความเร็วเหนือเสียงเพื่อเหนี่ยวนำเอาไอน้ำความดันต่ำ ให้ผสมไปด้วยกัน โดยผ่านนอซเซิลที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสตีมอีเจกเตอร์ และสามารถนำไอน้ำความดันต่ำเพิ่มความดันให้สูงขึ้นแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน

การทดสอบจะทดสอบโดยใช้อัตราส่วนความดันไอน้ำปฐมภูมิต่อความดันไอน้ำทุติยภูมิ (P_{01}/P_{02}) ที่ระยะทดสอบของนอซเซิลปฐมภูมิจำนวนสี่ระยะและทดสอบกับความเร็วของไอน้ำปฐมภูมิที่เลขมัค 4 ค่าคือ 1.7, 1.9, 2.2 และ 2.4 เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนอัตราการใช้โดยมวล เพื่อหาประสิทธิภาพในแต่ละสภาวะ พบว่าถ้าอัตราส่วน P_{01}/P_{02} เหมาะสมแล้วจะได้ประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นการขจัดปัญหาอันเนื่องจากการเกิดคลื่นช็อก และที่ตำแหน่งของนอซเซิลปฐมภูมิที่เหมาะสมจะทำให้การผสมกันระหว่างไอน้ำทั้งสองกระแสจะได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ความดันที่เลือกใช้สัมพันธ์กับค่าความเร็วมัคที่นอซเซิลปฐมภูมิเพื่อให้ความดันที่เข้ากัน และงานวิจัยนี้ถือว่าเป็นการไหลแบบอะไดบาติคตลอดระยะทางของการผสม

แบบจำลองการสูญเสียของสตีมอีเจกเตอร์สามารถช่วยทำนายประสิทธิภาพและปรับปรุงสตีมอีเจกเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ถ้าเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือน (c_c) ให้เหมาะสมกับแบบจำลองแล้ว จะสามารถทำนายผลการเกิดการสูญเสียได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิติกรไชยณรงค์ จักรธรรณท์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษามิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C816010 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: *Steam ejector*

CHAINARONG CHAKTRANOND : STUDY ON LOW PRESSURE STEAM
RECOVERY BY THE STEAM EJECTOR. THESIS ADVISOR : MINGSAK
TANGTAKUL, 138 pp. ISBN 974-638-754-5

A steam ejector is designed for converting energy in a form of pressure into kinetic energy in a form of supersonic velocity for entrainment the low pressure steam and mixed them together. By flowing pass through the nozzle that is changed in each cross section area. The objectives of this research are studying to find the parameter that concern with designing steam ejector and able to recovery the low pressure steam and bring it into process again for saving energy.

Test will be done by using pressure ratio P_{01}/P_{02} at 4 locations of primary nozzle with 4 Mach numbers, these are 1.7, 1.9, 2.2 and 2.4 by compare with variation of entrainment ratio for knowing the available efficiency in each case. If the static pressure at exit nozzle match to secondary pressure, can give the higher efficiency of system that can neglect the effect from shock wave that maybe happen. And also optimize length of distance from primary nozzle to mixing throat will give the higher efficiency. The pressure that is chosen will relate with Mach No. at exit primary nozzle for matching pressure. By this research hold that the flow is adiabatic flow in all mixing length.

Model loss of steam ejector can predict the available efficiency and give idea to develop steam ejector efficiency is higher. Adjustment the value of c_r is appropriate with any model will can predict the result of loss is more accuracy.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต *Chainarong Chaktranond*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Mingsak Tangtakul*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่าน ดังนี้ อาจารย์มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นในแง่มุมต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนช่วยกรุณาจัดหาเงินทุนสำหรับจัดซื้ออุปกรณ์การทดสอบและค่าใช้จ่ายต่างๆ ในงานวิจัยนี้ทุกอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ และโดยเฉพาะ อาจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่างๆ และช่วยสืบค้นเอกสารทางวิชาการต่างๆ มา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่เบญจมาศ ศรีพิกุลทองดี ที่ช่วยจัดพิมพ์เอกสารต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย และกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ไชยณรงค์ จักรธรานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
3. ทฤษฎี.....	5
3.1 สมการทั่วไปสำหรับอีเจคเตอร์.....	6
3.2 ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์.....	17
3.3 การวิเคราะห์ความดันสูญเสีย.....	20
3.4 แบบจำลองการสูญเสียของระบบ.....	24
4. อุปกรณ์การทดลอง.....	33
4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ทดลอง.....	33
4.2 สติมอีเจคเตอร์.....	35
4.3 อุปกรณ์ทดลองอื่นๆ.....	37
5. ผลการทดลอง.....	39
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	66
6.1 การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	66

บทที่ (ต่อ)	หน้า
6.2 การวิเคราะห์ความดันสูญเสีย.....	73
6.3 การวิเคราะห์โดยแบบจำลองการสูญเสียของระบบ.....	76
7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
7.1 ข้อสรุปของงานวิจัย.....	80
7.2 ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย.....	81
7.3 งานวิจัยต่อเนื่อง.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก.....	86
ภาคผนวก ข.....	88
ภาคผนวก ค.....	126
ภาคผนวก ง.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	138

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขนาดมิติของนอชเชิลปฐมภูมิ.....	35
5.2 สัญลักษณ์แทนค่าอัตราส่วนความดัน ของไอน้ำปฐมภูมิต่อไอน้ำทุติภูมิที่สภาวะ stagnation.....	40



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงส่วนประกอบหลักและระนาบหน้าตัดของอีเจคเตอร์.....	7
3.2 รูปปริมาตรควบคุม (Control volume) ของอีเจคเตอร์ซึ่งแสดงเส้นทางการไหลของพลังงาน.....	9
3.3 แสดงการวิเคราะห์การไหลแบบคงตัว (Steady flow) สำหรับการผสมกันของของของไหลที่สภาวะที่แตกต่างกัน เข้าปริมาตรควบคุม (Control volume) ที่ความเร็วที่เท่ากัน.....	11
3.4 รูปปริมาตรควบคุมที่ถูกจำกัดขอบเขตโดยระนาบทางเข้าและทางออกซึ่งแสดงตัวแปรที่เพิ่มขึ้นเพื่อเขียนอยู่ในรูปสมการทั่วไป.....	12
3.5 รูปปริมาตรควบคุมที่ถูกจำกัดขอบเขตโดยระนาบทางเข้า ทางออก และรูปร่างของดีฟิวเซอร์ แสดงตำแหน่งของแรงรูน (Thrust) และเพิ่มตัวแปร $P(x)$, $T(x)$ และองค์ประกอบในแนวแกน.....	14
3.6 รูปจำลองการไหลแบบอุดมคติของของไหลที่ไม่ผสมกัน ซึ่งแสดงตัวแปรของระนาบทางเข้าและระนาบทั่วไป, ระยะ x , ระนาบของ down stream.....	15
3.7 องค์ประกอบของการไหลและโปรไฟล์ความเร็ว.....	21
3.8 สัญลักษณ์แทนแต่ละหน้าตัดของอุปกรณ์ Steam Ejector.....	25
3.9 ขนาดมิติของ Diffuser ที่ใช้ทดสอบ.....	31
4.1 แสดงไดอะแกรมตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดสอบ Steam ejector.....	34
4.2 แสดงมิติของ Primary nozzle.....	36
4.3 แสดงมิติรูปร่างของ Mixing tube.....	36
4.4 แสดง Steam flow meter.....	38
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์กับอัตราส่วนการไหลของมวล เมื่อ Mach No. 1.7 และระยะทดสอบ Primary nozzle $x = 0$	41
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์กับอัตราส่วนการไหลของมวล เมื่อ Mach No. 1.7 และระยะทดสอบ Primary nozzle $x = 13$	41
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์กับอัตราส่วนการไหลของมวลเมื่อ Mach No. 1.7 และระยะทดสอบ Primary nozzle $x = 29$	42

รูปที่(ต่อ)	หน้า
No. = 2.4.....	57
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับอัตราส่วนการไหลของมวล โดย Mixing Tube เป็นท่อตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่ Mach No.= 2.4.....	57
5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 1.7 PR1.....	58
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 1.9 PR1.....	58
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 2.2 PR1.....	59
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 2.4 PR1.....	59
5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 1.7 PR2.....	60
5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 1.9 PR2.....	60
5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 2.2 PR2.....	61
5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ Mach No. = 2.4 PR2.....	61
5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 0$ PR1.....	62
5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 13$ PR1.....	62
5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 29$ PR1.....	63
5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 55$ PR1.....	63
5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 0$ PR2.....	64

5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 13$ PR2.....	64
5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 29$ PR2.....	65
5.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับค่าอัตราส่วนการไหลโดยมวล เมื่อ $x = 55$ PR2.....	65
6.1 ภาพขอบเขตของการผสมของของไหลทั้งสอง.....	67
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอีเจกเตอร์กับอัตราส่วนการไหลของมวลที่ ระยะอัตราส่วน Primary nozzle distance $x/d = 0, 2, 5$ และ 10 โดย Mach No. 2.4 และ $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$	69
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันสูญเสียกับอัตราส่วนการไหลของมวลที่ ระยะอัตราส่วน Primary nozzle distance $x/d = 0, 2, 5$ และ 10 โดย Mach No. 2.4 และ $P_{o1}/P_{o2} = 7.1$	70
6.4 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความดันสูญเสียของอีเจกเตอร์โดยใช้ท่อผสมเป็นท่อ ตรง (SP) กับท่อผสมที่เปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดที่อัตราส่วนของอัตราส่วนการไหล โดยมวลต่างๆ ที่ระยะห่างจาก mixing throat ของ Primary nozzle $x = 0$ สำหรับ ท่อผสมแบบเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัด โดย Mach No. 2.4 และ $P_{o1}/P_{o2} = 2.4$ (PR5).....	72
6.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีเจกเตอร์โดยใช้ท่อผสมเป็นท่อตรง (SP) กับท่อผสมที่เปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดที่อัตราส่วนของอัตราส่วนการไหลโดยมวล ต่างๆ ที่ระยะห่างจาก mixing throat ของ Primary nozzle $x = 0$ สำหรับท่อผสม แบบเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัด โดย Mach No. 2.4 และ $P_{o1}/P_{o2} = 2.4$ (PR5).....	73
6.6 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความดันที่หน้า Shock และหลัง Shock เมื่อเกิด คลื่นช็อคแบบตั้งฉากภายในท่อผสมที่ค่าเลขมัคต่างๆ.....	74
6.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความดันทางออกจากสตีมีอีเจกเตอร์ที่ได้จาก การคำนวณทางอุดมคติกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยเทียบกับค่าความดันทาง เข้าของ Secondary steam ที่อัตราส่วนการไหลของมวลเมื่อ Mach No. 1.9 และระยะ Primary nozzle $s = 55$	75

- 6.8 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความดันที่ทางออกต่อความดันที่ทางเข้าของไอน้ำ
 ทฤษฎีของสตีมีเอเจคเตอร์ โดยใช้แบบจำลองการสูญเสียที่ c_f มีค่า 0.013
 (Wysananski and Fielder, 1980) กับ 0.12 (ได้จากการ fit curve กับผลการ
 ทดลองที่ $Mp = 1.7$, $x/d = 3$ และ PR2..... 77
- 6.9 กราฟเปรียบเทียบค่า $Po/Po2$ ระหว่างค่าที่หาได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จาก
 บริษัท Korting..... 78
- 6.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย ที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของ steam ejector.... 79



รายการสัญลักษณ์

a	ความเร็วเสียง
A	พื้นที่
c_p	ความจุความร้อนที่ค่าความดันคงที่
c	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนระหว่างเลเยอร์
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง
d	เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของนอซเซิลปฐมภูมิ
Em	อัตราส่วนอัตราการใช้โดยมวลของของไหลปฐมภูมิต่อของไหลทุติยภูมิ
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
h	เอนทาลปี
L	ความยาวของคอ
m	อัตราการใช้โดยมวล
M	เลขมัค
Mc	เลขมัคคอนเวกทีฟ
P	ความดัน
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
s	เอนโทรปี
T	อุณหภูมิ
U	ความเร็วของของไหล

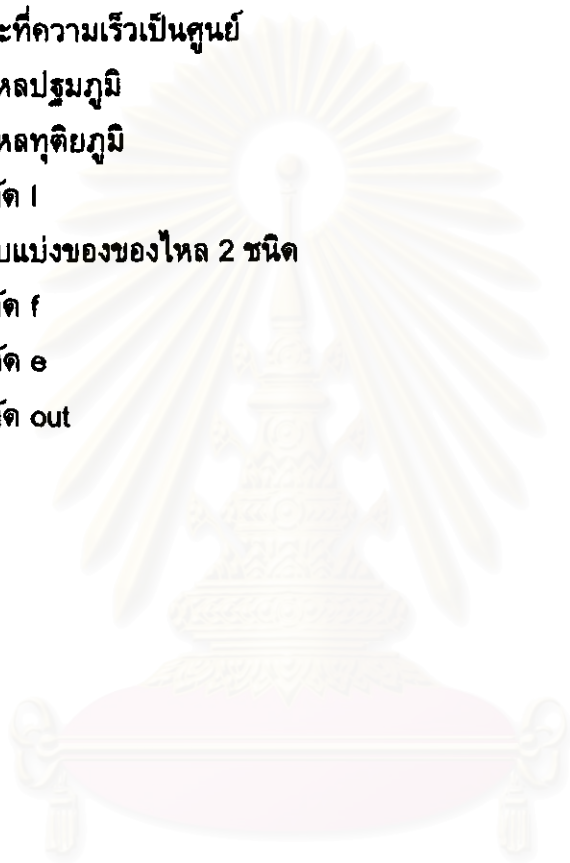
อักษรกรีก

β	มุมเอียงคลื่นออบบลิค
ρ	ความหนาแน่น
τ	ความเค้นเฉือน
φ	อัตราส่วนความดันรวมสมมูล
δ	ความหนาของเลเยอร์เฉือน
μ	ความหนืด

γ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

ตัวห้อย

avg	ค่าเฉลี่ย
0	สภาวะที่ความเร็วเป็นศูนย์
1	ของไหลปฐมภูมิ
2	ของไหลทุติยภูมิ
l	หน้าตัด l
dsl	ระนาบแบ่งของของไหล 2 ชนิด
f	หน้าตัด f
e	หน้าตัด e
out	หน้าตัด out
w	ผนัง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย