

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	9
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	9
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	9
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ความจำเป็นของการลดอุณหภูมิ	10
2.2 วิธีการลดอุณหภูมิ	11
2.3 การลดอุณหภูมิด้วยสูญญากาศ	12
2.4 หัวฉีดไอน้ำ	15
2.5 ประสิทธิภาพของหัวฉีดไอน้ำ	19
2.6 การออกแบบหัวฉีดไอน้ำ	20
2.7 การผสมกันของก๊าซสมบูรณ์	26
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	
3.1 การคำนวณและออกแบบ	27
3.1.1 ขนาดถังบรรจุผลิตภัณฑ์	27
3.1.2 ภาระทางด้านคูลของระบบ	28
3.1.3 การออกแบบชุดหัวฉีดไอน้ำ	29
3.1.3.1 การออกแบบหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 1	30
3.1.3.2 การออกแบบหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 2	33
3.1.3.3 การออกแบบหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 3	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สรุปผลการออกแบบและดำเนินการสร้าง	39
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	41
4.2 วิธีดำเนินการวิจัย	50
4.3 วิธีการทดสอบ	52
4.3.1 วิธีการทดสอบการลดความดันของหัวฉีดไอน้ำ	52
4.3.2 วิธีการทดสอบการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	54
4.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ	54
บทที่ 5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการลดความดันของหัวฉีดไอน้ำ	56
5.1.1 การลดความดันของหัวฉีดไอน้ำ	56
5.1.2 เส้นสมรรถนะของหัวฉีดไอน้ำ	61
5.1.3 ประสิทธิภาพของหัวฉีดไอน้ำ	62
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	62
5.2.1 การลดอุณหภูมิและปริมาณของไอน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์	63
5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของการลดอุณหภูมิ	64
บทที่ 6 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	
6.1 การทำความเย็นด้วยสูญญากาศโดยใช้หัวฉีดไอน้ำ	66
6.2 การทำความเย็นโดยใช้ห้องลดอุณหภูมิ	68
6.3 มูลค่าเพิ่มที่ได้จากการส่งผลิตภัณฑ์ไปขายที่ต่างประเทศ	69
6.4 เปรียบเทียบการลงทุนในแต่ละระบบ	69
6.5 วิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน	70
บทที่ 7 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุปผลการทดสอบ	71
7.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก เครื่องวัดอัตราการไหลแบบหัวฉีด และตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพหัวฉีดไอน้ำ	76
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	93
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบระบบทำความเย็นด้วยสูญญากาศโดยใช้หัวฉีดไอน้ำ	104
ภาคผนวก ง แบบการสร้างระบบทำความเย็นด้วยสูญญากาศโดยใช้หัวฉีดไอน้ำ	110
ประวัติผู้เขียน	122

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าความดันไออิ่มตัวเทียบกับอุณหภูมิ	14
3.1 แสดงขนาดต่าง ๆ ของหัวฉีดไอน้ำที่ออกแบบ	39
4.1 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไอน้ำ รุ่น FB 20	44
ก.1 แสดงอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านหัวฉีดกับระดับความแตกต่างของปรอทใน U – tube Manometer ที่ค่าต่าง ๆ ของการออกแบบ	82
ก.2 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวฉีดไอน้ำทางทฤษฎีกับการทดสอบ	90
ข.1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำและไอน้ำ	94
ข.2 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ	99
ข.3 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศ	101
ข.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์	102
ค.1 ข้อมูลการทดสอบการลดความดันของหัวฉีดไอน้ำ	105
ค.2 ข้อมูลการทดสอบการลดความดันของหัวฉีดไอน้ำ	106
ค.3 ข้อมูลการทดสอบการลดความดันของหัวฉีดไอน้ำพร้อมกันทั้งสามสแตจ ที่ภาระอากาศแห้ง ด้านจุดที่จุดออกแบบ 5 kg/h	107
ค.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ที่ออกแบบกับค่าที่ได้จากการทดสอบหัวฉีดไอน้ำ ที่ภาระอากาศแห้งของจุดออกแบบ	107
ค.5 ข้อมูลการทดสอบการลดอุณหภูมิของผักกาดหอม ที่เวลา 30 นาที	108
ค.6 ข้อมูลการทดสอบการลดอุณหภูมิของผักกระหล่ำปลี ที่เวลา 30 นาที	108
ค.7 ข้อมูลการทดสอบการลดอุณหภูมิของผักกาดขาวปลี ที่เวลา 30 นาที	109

สารบัญภาพประกอบ

รูป	หน้า
1.1 อุณหภูมิสุดท้ายของผักชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการทำความเย็นด้วยสูญญากาศ	3
1.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวฉีดไอน้ำ	3
1.3 ระดับของการสร้างสูญญากาศที่ได้ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของอุปกรณ์	6
1.4 ระบบการทำความเย็นด้วยสูญญากาศโดยใช้หัวฉีดไอน้ำต่ออนุกรมร่วมกับหัวฉีดน้ำ	7
1.5 ลักษณะการจัดวางหัวฉีดไอน้ำแบบ 2 สเตจ ที่ไม่มีการควบแน่น	8
1.6 เส้นสมรรถนะการทำงานของหัวฉีดไอน้ำแบบ 2 สเตจ ที่ไม่มีการควบแน่น	8
2.1 การทำงานของหัวฉีดไอน้ำ	15
2.2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างความดันและความเร็วของของไหลที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดไอน้ำ	16
2.3 รูปร่างหัวฉีดแบบลู่เข้า – บานออก	16
2.4 รูปแบบการวิเคราะห์การผสมของกระแสการไหลแบบ 1 มิติ ที่ความดันคงที่	18
2.5 แผนภาพมอดลีสร์การทำงานของหัวฉีดไอน้ำ	19
2.6 กราฟแสดงอัตราส่วนน้ำหนักโมเลกุลที่ด้านดูดของหัวฉีดไอน้ำ	22
2.7 กราฟแสดงอัตราส่วนอุณหภูมิที่ด้านดูดของหัวฉีดไอน้ำ	23
2.8 ตัวแปรต่าง ๆ ของหัวฉีดไอน้ำที่ใช้ประกอบการคำนวณ	23
2.9 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่ออากาศแห้งที่ต้องการของหัวฉีดไอน้ำแต่ละสเตจ สำหรับไอน้ำความดันแกจ 10 bar	24
2.10 กราฟแสดงตัวคูณแก้ไขความดันไอน้ำที่ใช้	24
2.11 กราฟแสดงตัวคูณแก้ไขความดันสมบูรณ์ระหว่างความดันไอน้ำที่ใช้ต่อความดันด้านดูด	25
3.1 ขนาดและการจัดวางถังบรรจุผลิตผลภายในถังสูญญากาศ	27
3.2 แสดงขนาดถังสูญญากาศที่ออกแบบ	28
3.3 สภาพะการทำงานของหัวฉีดไอน้ำแบบ 3 สเตจ ที่ไม่มีการควบแน่น	30
4.1 ชุดทดสอบระบบทำความเย็นด้วยสูญญากาศโดยใช้หัวฉีดไอน้ำ	41
4.2 ถังบรรจุหรือถังสูญญากาศ	42
4.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 1	43
4.4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 2	43
4.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดหัวฉีดไอน้ำสเตจที่ 3	44
4.6 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้ในการทดสอบ	45

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.7 ผลิตผลจำพวกผักใบที่ใช้ในการทดสอบ	45
4.8 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศแห้งแบบหัวฉีด	46
4.9 เครื่องวัดอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล	47
4.10 เกจวัดความดันสูญญากาศแบบบูร์ดอง	47
4.11 เครื่องชั่งน้ำหนัก	48
4.12 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์	49
4.13 สายเซนเซอร์ของเทอร์โมคัปเปิลแบบวัดที่ผิว	49
4.14 นาฬิกาเวลาและใช้วัดความดันบรรยากาศ	50
4.15 แสดงการจัดวางหัวฉีดไอน้ำของชุดทดสอบ	53
5.1 แสดงไอน้ำเกาะที่เวนจูรีของหัวฉีดไอน้ำแสดงที่ 1 และ 2	57
5.2 แสดงค่าความดันสูญญากาศที่เกจวัดความดันด้านดูด - 0.996	58
5.3 แสดงค่าความดันสูญญากาศที่เกจวัดความดันด้านดูด - 0.991 bar	58
5.4 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความดันด้านดูดและด้านจ่ายสมบูรณ์ที่จุดออกแบบ กับค่าที่ได้จากการทดสอบ	59
5.5 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัดที่จุดออกแบบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ	59
5.6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ต้องการที่จุดออกแบบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ	60
5.7 กราฟแสดงเส้นสมรรถนะการทำงานของหัวฉีดไอน้ำ	61
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิผลิตผล ที่เวลาของการออกแบบ 30 นาที	64
ก.1 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบหัวฉีด ตามมาตรฐานของ ASME Power Test Code	77
ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Expansion Factor (Y) กับอัตราส่วนระหว่าง P_2/P_1 ที่เปลี่ยนแปลงในตัววัดแบบออริฟิส เวนจูรี และหัวฉีด	79
ก.3 แสดงสภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดไอน้ำบน h-s Diagram	84
ก.4 แสดงสภาวะต่าง ๆ ของการออกแบบหัวฉีดไอน้ำทางทฤษฎี	85
ก.5 แสดงสภาวะต่าง ๆ ที่ได้จากทดสอบหัวฉีดไอน้ำ	88
ก.6 แสดงการหาประสิทธิภาพของหัวฉีดไอน้ำแบบ 3 แสดงต่อกันบน h-s Diagram	91
ข.1 แผนภาพมอลเลียร์สำหรับไอน้ำ	103

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_c	พื้นที่หน้าตัดที่ทางออกหัวฉีด	mm^2
A_t	พื้นที่หน้าตัดที่คอขวดหัวฉีด	mm^2
A_2	พื้นที่หน้าตัดของเครื่องวัดอัตราการไหล	m^2
C	ค่าความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ส	-
c_p	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของผลิตภัณฑ์	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_{pm}	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหลผสม	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_{pp}	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหลปฐมภูมิ	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_{ps}	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหลทุติยภูมิ	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องวัดอัตราการไหล	mm
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านเข้าเครื่องวัดอัตราการไหล	mm
D_d	เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดตัวกระจาย	mm
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของกรวยหัวฉีด	mm
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางข้อต่อด้านดูด	mm
D_t	เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดหัวฉีด	mm
E	ค่าคงที่ของเครื่องวัดอัตราการไหล	-
h	ระดับความสูงของปรอทใน U - tube Manometer	mm
h_a	เอนทัลปีสำหรับอากาศแห้ง	kJ/kg
h_f	เอนทัลปีที่สภาวะของเหลว	kJ/kg
h_{fg}	เอนทัลปีที่สภาวะของผสม	kJ/kg
h_i	เอนทัลปีของไอน้ำที่เข้าหัวฉีด	kJ/kg
h_m	เอนทัลปีของของไหลผสม	kJ/kg
h_o	เอนทัลปีทางด้านดูด	kJ/kg
h_p	เอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิ	kJ/kg
h_s	เอนทัลปีของของไหลทุติยภูมิ	kJ/kg
h_s	เอนทัลปีของการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก	kJ/kg
h_3	เอนทัลปีทางด้านจ่าย	kJ/kg
k	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ	-

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
l	ความยาวของกรวย	mm
L	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	kJ/kg
m	มวลของผลิตภัณฑ์	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวลของเครื่องวัดอัตราการไหล	kg/s
$\dot{m}_a$	มวลของอากาศแห้ง	kg
$\dot{m}_a$	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง	kg _{dry air} /h
$\dot{m}_d$	อัตราการไหลเชิงมวลสุทธิของของไหลผสมที่ด้านจ่าย	kg/h
$\dot{m}_m$	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลผสม	kg/s (kg/h)
$\dot{m}_p$	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ	kg/s (kg/h)
$\dot{m}_s$	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ	kg/s (kg/h)
$\dot{m}_{steam}$	อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำแห้งอิ่มตัว	kg/h
$\dot{m}_v$	มวลของไอน้ำ หรือมวลของไอน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์	kg
$\dot{m}_v$	อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำทางด้านดูด	kg _{steam} /h
M_{pi}	ตัวคูณแก้ไขความดันสมบูรณ์ของไอน้ำที่ใช้	-
$M_{pi/po}$	ตัวคูณแก้ไขความดันสมบูรณ์ของไอน้ำที่ใช้ต่อความดันด้านดูด	-
M_{p3-o}	ตัวคูณแก้ไขความดันที่ไม่มีภาระทางด้านดูด	-
M_{stab}	ตัวคูณแก้ไขความเสถียรของภาระทางด้านดูด	-
P	ความดันรวมที่บรรยากาศ	kPa
ΔP	ความดันแตกต่างของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล	kPa
P_a	ความดันย่อยของอากาศแห้ง	kPa
pph	หน่วยวัดอัตราการไหลของไอน้ำเป็น ปอนด์ต่อชั่วโมง	pph
P_e	ความดันของไอน้ำที่ทางออกหัวฉีด	torr (kPa)
P_i	ความดันของไอน้ำที่ทางเข้าหัวฉีด	torr (kPa)
P_o	ความดันสมบูรณ์ทางด้านดูด	torr (kPa)
$P_{sat}@T$	ความดันไออิ่มตัว	kPa
P_t	ความดันของไอน้ำที่คอคอดหัวฉีด	torr (kPa)
P_v	ความดันย่อยของอากาศ	kPa

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_3	ความดันสมบูรณ์ทางด้านจ่าย	torr (kPa)
Q	ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากผลิตภัณฑ์	kJ
Q_i	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล	m^3/s
$\dot{R}$	ปริมาณไอน้ำที่ต้องการ	kg_{steam}/h
R_a	ค่าคงที่ของอากาศแห้ง	kJ/kg - K
$\dot{R}_a$	อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่ออากาศแห้งที่จุดออกแบบ	$kg_{steam}/kg_{dry\ air}$
R_d	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์	-
$\dot{R}_{da}$	ปริมาณอากาศแห้ง	$kg_{dry\ air}/h$
R_v	ค่าคงที่ของไอน้ำ	kJ/kg - K
r_c	อัตราส่วนความดันวิกฤต	-
s	เอนโทรปี	kJ/kg - K
s_f	เอนโทรปีที่สภาวะของเหลว	kJ/kg - K
s_{fg}	เอนโทรปีที่สภาวะของผสม	kJ/kg - K
T	อุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศ	K
T_{amb}	อุณหภูมิสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์	K
T_{sat}	อุณหภูมิสมบูรณ์ที่ความดันไออิ่มตัว	K
T_m	อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลผสม	K
T_p	อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลปฐมภูมิ (ไอน้ำ)	K
T_s	อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลทุติยภูมิ (อากาศแห้ง)	K
t	อุณหภูมิผสมของของไหล	$^{\circ}C$
V	ปริมาตรถึงบรรจ	m^3
V_a	ปริมาตรของอากาศแห้ง	m^3
V_v	ปริมาตรของไอน้ำ	m^3
v_m	ความเร็วของของไหลผสม	m/s
v_p	ความเร็วของของไหลปฐมภูมิ	m/s
v_s	ความเร็วของของไหลทุติยภูมิ	m/s
x	ความแห้งของไอ	-

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Y	ตัวแปรของการขยายตัวของเครื่องวัดอัตราการไหล	-
θ	มุมรวมของกรวยหัวฉีด	องศา
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	%
ω	ความชื้นจำเพาะของอากาศ	$\text{kg}_{\text{steam}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ρ_{Hg}	ความหนาแน่นของปรอท	kg/m^3
μ_1	ความหนืดสมบูรณ์ของอากาศ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
β	อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเครื่องวัดอัตราการไหล (d/D)	-
η_E	ประสิทธิภาพของหัวฉีดไอน้ำ	%

สัญลักษณ์ตัวห้อย (Subscript)

a	อากาศ หรืออากาศแห้ง	-
d	คอคอดตัวกระจาย	-
e	ด้านออก	-
i	ด้านเข้า	-
o	ด้านสุด	-
m	ของไหลผสม	-
p	ของไหลปฐมภูมิ	-
s	ของไหลทุติยภูมิ	-
t	คอคอดหัวฉีด	-
v	ไอน้ำ	-
1	จุดผสมทางเข้าตัวกระจาย	-
3	ด้านจ่าย	-