วิศวกรรมโรงไฟฟ้า (Power Plant Engineering) ฉบับแก้ไขและปรับปรุงปี พ.ศ. 2563

ศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ ฉันทศิริวรรณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2563 โดย นายสมชาติ ฉันทศิริวรรณ ห้ามการลอกเลียนส่วนหนึ่งส่วนใดของ หนังสือเล่มนี้ นอกจากจะได้รับอนุญาต

ii

คำนำ

ผมเผยแพร่หนังสือเรื่อง วิชาวิศวกรรมโรงไฟฟ้า (Power Plant Engineering) ในรูปแบบของ Ebook ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2554 และเผยแพร่ฉบับแก้ไขและปรับปรุงเมื่อปี พ.ศ. 2558 แต่ก็ยังคงมีข้อ ผิดพลาดอยู่ นอกจากนี้การที่เทคโนโลยีโรงไฟฟ้ามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจะทำให้เนื้อหาบางส่วน ในหนังสือเล่มนี้ล้าสมัยเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นผมจึงคิดว่าจะปรับปรุงแก้ไขตำราเล่มนี้ไปเรื่อย ๆ โดย จะระบุปี พ.ศ. ล่าสุดที่มีการแก้ไขตำราในชื่อตำรา เมื่อปรับปรุงแก้ไขเสร็จแล้ว ผมก็จะอัพโหลดไฟล์ ของหนังสือที่แก้ไขแล้วเข้าระบบอินเทอร์เน็ตโดยทันที ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคุณภาพของตำราจะดี ขึ้นอย่างต่อเนื่องและผู้อ่านทุกท่านจะได้รับจะเป็นประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้

> สมชาติ ฉันทศิริวรรณ e-mail: somchart@engr.tu.ac.th

iv

บทนำ		1
1.1	ระบบพลังงานไฟฟ้า	1
1.2	ประเภทของโรงไฟฟ้า	3
1.3	โรงไฟฟ้าในประเทศไทย	1
1.4	รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม	5
วัฦจักร	งไอน้ำ	9
2 1	สาเว้ติของไอบ้ำ	c
2.1	กักลักๆแขงโดง	, ,
2.2	หมู่ เป็นของประสิทธิภาพของวัฦจักรแรงคิน	5
	2.3.1 การลดความดันในเครื่องควบแน่น	5
	2.3.2 การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน	3
	2.3.3 การเพิ่มความดันในหม้อไอน้ำ	3
	2.3.4 การให้ความร้อนซ้ำ	7
	2.3.5 การอุ่นน้ำป้อน)
2.4	ผลกระทบของคว่ามผวนกลับไม่ได้ในวัฏจักร	1
2.5	ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนี้	2
เสื้อเพ	ຈີ.	7
3 1	เพื่อเพลิงแต้ง เศื้อเพลิงแต้ง ว	7
5.1	3.1.1 ก่างเห็ง ว	7
	3.1.1 มาเหตุน	2
2.2	มี เสื้อเพลิมเรื่อง เสื้อเพลิมเรื่อง	ŕ c
5.2	นอเทสงหมดา	י ג
	3.2.1 ผางหมา	1
	3.2.2 ผางหารแก่	+
	ม 	+
33	IM @ IM @, 10.0 M	_
3.3	เชอเพลงกาซ	3
3.3	เซอเพลงกาซ	5
	บทนำ 1.1 1.2 1.3 1.4 วัฏจัก 2.1 2.2 2.3 2.3 2.4 2.5 เชื้อเพ 3.1 3.2	บทน้ำ 1.1 ระบบพลังงานไฟฟ้า 1.2 1.2 ประเภทของโรงไฟฟ้า 1.3 โรงไฟฟ้าในประเทศไทย 1.4 1.4 รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 1.4 วัฏจักรไอน้ำ 2.1 สมบัติของไอน้ำ 2.2 2.1 สมบัติของไอน้ำ 1.2 2.2 วัฏจักรแรงคิน 12 2.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน 12 2.3 การท่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน 12 2.3.1 การลดความดันในเครื่องควบแน่น 16 2.3.2 การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน 16 2.3.3 การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน 16 2.3.4 การให้ความร้อนข้า 17 2.3.5 การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน 16 2.3.4 การให้ความร้อนข้า 17 2.5 ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน 20 2.4 ผลกระทบของความผวนกลับไม่ได้ในวัฏจักร 37 3.1 เชื้อเพลิงแข็ง 37 3.1.1 ถ่านหิน 33 3.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวล 44 3.2.1 น้ำมันดีเซล <

	3.4	การใช้เชื้อ	อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย		48			
4	การเผาไหม้							
	4.1	ปฏิกิริยาก	าารเผาใหม้		51			
	4.2	อัตราส่วน	เอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทถษฎี		53			
	4.3	ค่าความร้	به ۱ ۳۵۷		56			
	4.4	อัตราส่วน	เอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง		59			
		4.4.1	วิธีที่หนึ่ง		59			
		4.4.2	วิธีที่สอง		61			
	4.5	อากาศส่ว	วนเกิน		63			
	4.6	อุณหภูมิจ	งุดน้ำค้าง		66			
	4.7	อุ่ปกรณ์เเ	มาใหม้		67			
		4.7.1	อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลว		68			
		4.7.2	้ อปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง		69			
			9					
5	หม้อไ	อน้ำ			77			
	5.1	ประเภทข	เองหม้อไอน้ำ		77			
	5.2	ประสิทธิภ	าาพของหม้อไอน้ำ		78			
	5.3	หลักการข	กำงานของหม้อไอน้ำ		83			
	5.4	เตาเผาและเครื่องระเหย						
	5.5	ถังพักไอน้ำ						
	5.6	การถ่ายนี้	เกออก		89			
	5.7	เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำ						
	5.8	การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำ						
	5.9	เครื่องประหยัดเสื้อเพลิง						
	5.10	เครื่องอุ่นอากาศ						
	5.11	เครื่องเป่า	าฝ่น		99			
	5.12	การไหลเวิ	้ง วียนของอากาศและก๊าซเสีย		100			
		5.12.1	ดราฟต์ธรรมชาติ		101			
		5.12.2	ดราฟต์เชิงกล		102			
		5.12.3	พัดลม		103			
_								
6	การค'	การควบคุมมลภาวะทางอากาศ						
	6.1	มลภาวะเ	ทางอากาศ	• •	111			
	6.2	คุบถุครถาร	ามผุนตะของ	• •	111			
		6.2.1	ขุบการเนแยกผุนตวยเพพาตรเต	• •	112			
		6.2.2	ส่ ๛ ။ ๛ ท ง ส่ ๛ ။ ๛ ท ง	• •	114			
		6.2.3	เครองดกฝุ่นด้วยเซเคลน	• •	115			
	6.3	การควบคุ	วุมออกเซดของในไตรเจน		116			

vi

6.4	6.3.1 การควบคุมการเผาไหม้ 1 6.3.2 ระบบกำจัด NOx แบบ SCR 1 6.3.3 ระบบกำจัด NOx แบบ SNCR 1 ระบบกำจัดก็าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1 6.4.1 การกำจัด SO2 ด้วยหินปูน 1 6.4.2 การกำจัด SO2 ด้วยน้ำทะเล 1	17 18 19 20 21 22
เครื่อง	กังหันไอน้ำ 1:	25
7.1	หูลักการทำงาน	25
7.2	ขั้นทำงาน	26
	7.2.1 ขั้นทำงานแรงดล	27
	7.2.2 ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา	28
7.3	ใบพัดของกังหันไอน้้ำ	29
7.4	ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สด	33
	7 4 1 ขึ้บทำงาบแรงดด 11	34
	7.4.2 ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 1:	37
7 5	1/2	20 20
7.5	ມາວເທງແມ່ງ ເທດ ແລະ	J9 ∕11
7.0	แรงดังแบบแกน	4 I ΛΛ
7.8	การควบคมเครื่องกังหัน	45
ຈະນນ 8.1 8.2	น้ำป้อนและน้ำหล่อเย็น 1 4 อุปกรณ์หลักในระบบน้ำป้อนและน้ำหล่อเย็น	49 49
8.3 8.4 8.5	 เศรียงครับแนน	49 53 53 54 55 56 60
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ	เศรียงครีบแนน	 49 53 53 54 55 56 60 65
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ 9.1	เศรียงครีบแนน	49 53 53 54 55 56 60 65
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ 9.1 9.2	เศรียงครีบแนน	 49 53 53 54 55 56 60 65 73
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ 9.1 9.2 9.3	เศรียงครับแนน	 49 53 53 54 55 56 60 65 73 82
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ 9.1 9.2 9.3	เศรียงครีบแนน	 49 53 53 54 55 56 60 65 73 82 83
8.3 8.4 8.5 โรงไฟ 9.1 9.2 9.3	เศรียงครับแนน	49 53 54 55 56 60 65 65 73 82 83 87
	6.4 เครื่อง 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 ระบบ 8.1 0.0	0.3.1 การมายุลการผลายผล 6.3.2 ระบบกำจัด NOx แบบ SCR

	9.4	เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน	189			
10	โรงไฟา	รงไฟฟ้าพลังน้ำ				
	10.1	ลักษณะทั่วไป	195			
	10.2	เขื่อน	196			
	10.3	ท่อส่งน้ำ	198			
	10.4	กังหันน้ำ	200			
		10.4.1 ประเภทของกังหันน้ำ	200			
		10.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหัน	204			
		10.4.3 ระบบควบคุมเครื่องกังหัน	205			
	10.5	อโมงค์ท้ายน้ำ	206			
	10.6	้ โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ	208			
	โองไม่เ	Notes and	044			
1.1	11 1	สัญลักษณ์มีการอื่อเล่นจะไอโซโซงไ	211			
	11.1	สญสกาษณนาเคลยาและเขเขเทบ	211			
	11.2	านอี้ต่อของแล้ว เชื้อก่ออี้ตอ์ การการการการการการการการการการการการการก	212			
	11.3	เสแบรม I MN IN ผมเศตบร	213			
	11.4	ค.ศ. นยาย พายาสา	210			
	11.5	พบแน่	217			
	11.0	บฏกรบาลูกระ	213			
	11.7	งระบระกายของตา ปฏากระหรังต่อย ประเภทของเตาปกิกรกโบิกเคลียร์	220			
	11.0	11.8.1 เตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสง	222			
		11.8.2 เตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด	223			
		11.8.3 เตาปกิกรกโบบบบ้ำบาดหมักความดับสง	224			
		11.8.4 เตาปกิกรก์แบบบหล่อเย็บด้ายก๊าซ	224			
		11.8.5 เตาปฏิกรณ์แบบ RBMK	225			
	11.0		226			
	11.9	เบยเพลงผงเกลยง	220			
	11.10	ถ้าเตรา เขต. หวับเว้า แต่ ภาพรังสีต่องบบนะเ	220			
	11 12	อวามปลุลดภัยพลงโรงไฟฟ้าบิวเคลียร์	231			
	11112		201			
12	เศรษฐ	ศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า	235			
	12.1	มูลค่าปัจจุบัน	235			
	12.2	เส้นโค้งภาระ	239			
	12.3	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า	243			
		12.3.1 ค่าเชื้อเพลิง	244			
		12.3.2 ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา	245			
		12.3.3 ค่าก่อสร้าง	246			

viii

12.3.4	การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้า	248
12.3.5	อัตราค่าไฟฟ้า	250

Х

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ระบบพลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบสามประการเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานรูปอื่น ๆ พลังงานไฟฟ้า ปลอดภัยต่อการใช้งาน สะดวกที่การส่งจากสถานที่หนึ่งไปยังอีกสถานที่หนึ่ง และสามารถผลิตได้ หลายวิธี พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้าง ขวางว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าบ่งบอกถึงอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศได้ ตาราง ที่ 1.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนประชากรในปี พ.ศ. 2560 ของบาง ประเทศรวมทั้งประเทศไทย (ข้อมูลมาจาก https://www.indexmundi.com/map/?v=81000) จะเห็น ว่าประเทศที่พัฒนาแล้วมีอัตราส่วนการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึง มีความเจริญของประเทศอย่างคร่าว ๆ ได้ เนื่องจากประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึง ให้เห็นถึงความสำคัญของระบบพลังงานไฟฟ้าต่อการพัฒนาประเทศไทย

การนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้นั้นเริ่มต้นจากการสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้า จาก นั้นจึงส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปยังระบบจำหน่ายเพื่อขายให้ผู้ใช้ไฟฟ้า รายละเอียด ของระบบต่าง ๆ มีดังนี้

- ระบบผลิต (power generation system) หมายถึงระบบที่แปลงพลังงานที่อยู่ในรูปอื่นเป็น พลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าปริมาณมากสามารถผลิตได้โดยใช้พลังงานกลขับ เคลื่อนเครื่องกังหันที่มีแกนหมุนร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานกลได้จากการแปลง พลังงานรูปอื่นเช่น พลังงานศักย์ของน้ำ พลังงานเคมีในเชื้อเพลิงฟอสซิล และพลังงานนิว-เคลียร์ในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- ระบบส่ง (power transmission system) หมายถึงระบบเสาส่งและสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ถ้า ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเปรียบเสมือนหัวใจ ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าก็เปรียบเสมือนเส้นเลือด ที่น้ำเลือดไปหล่อเลี้ยงร่างกาย ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าจะน้ำพลังงานไฟฟ้าไปสู่สถานีไฟฟ้า ย่อย (substation) เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้การไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และจำ-

ประเทศ	อัตราส่วนการใช้ไฟฟ้า (kW.h/คน)
สหรัฐอเมริกา	11974
ออสเตรเลีย	9624
ญี่ปุ่น	7383
ฝรั่งเศส	6499
อิตาลี	4764
สหราชอาณาจักร	4657
จีน	4292
มาเลเซีย	4238
อาร์เจนตินา	2766
ไทย	2460
เม็กซิโก	1968
อียิปต์	1550
ฟิลิปปินส์	711
ลาว	595
ศรีลังกา	523
บังคลาเทศ	310

. ตารางที่ 1.1: อัตราส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนประชากรเมื่อปี พ.ศ. 2560

หน่ายให้ผู้ใช้รายใหญ่โดยตรงต่อไป การใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงก็เพื่อให้สามารถส่งพลังงาน ไฟฟ้าได้ไกลโดยมีความสูญเสียน้อย ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีแรงดันไฟฟ้ายิ่งมาก พลังไฟฟ้า สูญเสียจะยิ่งน้อย แต่ในทางปฏิบัติมีปัจจัยอื่นที่จำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินไป โดย ทั่วไประดับแรงดันของระบบสายส่งมีขนาด 69 kV, 115 kV, 132 kV, 230 kV, 300 kV และ 500 kV แรงดันในสายส่งจะลดลงตามระยะทางจากโรงไฟฟ้าจนถึงระดับที่จ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้า โดยทำการลดในสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งมักตั้งอยู่ใกล้แหล่งใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเป็นเมือง หรือนิคมอุตสาหกรรม

 ระบบจำหน่าย (power distribution system) หมายถึงระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบ ส่งพลังงานไฟฟ้าเพื่อขายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในบริเวณต่าง ๆ โดยทั่วไประดับแรงดัน ในระบบจำหน่ายจะไม่สูงเท่าในระบบส่ง ทั้งนี้เพราะระยะทางจากสถานีไฟฟ้าย่อยไปสู่ผู้ใช้ ไฟฟ้าไม่มากนัก จึงไม่จำเป็นต้องใช้ระดับแรงดันสูงซึ่งมีราคาวัสดุและอุปกรณ์สูง โดยทั่วไป แรงดันของระบบจำหน่ายมีหลายระดับ เช่น 11 kV, 12 kV, 22 kV, 24 kV และ 33 kV เมื่อ เดินสายส่งมาถึงบริเวณที่มีผู้ใช้ไฟฟ้ามาก ๆ ก็ลดระดับแรงดันของระบบจำหน่ายให้ต่ำลงอยู่ ในระดับที่ใช้งานกันคือ 380 หรือ 220 V อุปกรณ์ที่ใช้ลดระดับแรงดันคือหม้อแปลงไฟฟ้า

หน่วยงานของรัฐในประเทศไทยที่รับผิดชอบเรื่องการผลิต การส่งและการจำหน่ายไฟฟ้า 3

1.2. ประเภทของโรงไฟฟ้า

หน่วย งาน คือ (1) การ ไฟฟ้า ฝ่าย ผลิต แห่ง ประเทศไทย (กฟผ.) รับ ผิด ชอบ งาน เกี่ยว กับ การ ผลิต พลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศซึ่งรวมถึงการสร้างโรงไฟฟ้าและการ เดินเครื่องโรงไฟฟ้า การรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กและผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ และการส่งพลัง งานไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งแรงสูงไปสู่แหล่งผู้ใช้ไฟฟ้าและสถานีย่อยต่างๆ (2) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) รับผิดชอบงานเกี่ยวกับการรับพลังงานไฟฟ้าจาก กฟผ. เพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในเขต กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ (3) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) รับผิดชอบงานเกี่ยว กับการรับพลังงานไฟฟ้าจาก กฟผ. เพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในจังหวัดอื่นทั่วประเทศ นอกจากนี้ กฟภ. ยังมีโรงไฟฟ้าขนาดเล็กของตัวเองในบริเวณที่สายส่งแรงสูงของ กฟผ. ไปไม่ถึง

1.2 ประเภทของโรงไฟฟ้า

มีโรงไฟฟ้าจำนวนหลายโรง หลายขนาด และหลายประเภทกระจายอยู่ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โรงไฟฟ้าสามารถแบ่งประเภทตามเชื้อเพลิงที่ใช้และกระบวนการผลิตไฟฟ้า ดังนี้

- โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (thermal power plant) เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงชีว มวลในการทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงเพื่อใช้เดินเครื่องกังหันไอ น้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้เวลาก่อสร้างนาน มีค่าก่อสร้างสูง แต่มีค่า เชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำ
- โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (gas turbine power plant) เผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในการผลิตก๊าซเสีย ที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงเพื่อใช้เดินเครื่องกังหันก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้า ประเภทนี้ใช้เวลาก่อสร้างสั้น มีค่าก่อสร้างต่ำ แต่มีค่าเชื้อเพลิงสูง
- โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (combined-cycle power plant) เผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในการ ผลิตก๊าซเสียที่ได้มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ก๊าซเสียที่ได้ใช้เดินเครื่อง กังหันก๊าซ ก๊าซเสียที่ออกจากเครื่องกังหันก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูง จึงใช้เดินเครื่องกังหันไอน้ำ ได้ด้วย โรงไฟฟ้าประเภทนี้มีค่าก่อสร้างต่ำกว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแต่ค่าเชื้อเพลิงสูงกว่า
- โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (nuclear power plant) ใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ สูงและความดันสูงเพื่อใช้เดินเครื่องกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้าประเภทนี้ มีค่าก่อสร้างสูงแต่มีค่าเชื้อเพลิงต่ำเนื่องจากใช้เชื้อเพลิงในปริมาณน้อยเพื่อผลิตไฟฟ้าใน ปริมาณมากได้
- โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (hydroelectric power plant) แปลงความพลังงานศักย์จากน้ำในเขื่อนเป็น พลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกังหันน้ำ โรงไฟฟ้าประเภทนี้จึงต้องตั้งอยู่ใกล้เขื่อนและขนาดของ โรงไฟฟ้าขึ้นกับขนาดของเขื่อน โรงไฟฟ้าประเภทนี้มีค่าก่อสร้างสูงและไม่มีค่าเชื้อเพลิง

- โรงไฟฟ้าดีเซล (diesel power plant) ประกอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ซึ่งใช้น้ำมัน ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้เวลาก่อสร้างสั้น มีค่าก่อสร้างต่ำ แต่มีค่าเชื้อเพลิง สูงมาก โรงไฟฟ้าประเภทนี้มักมีขนาดเล็กและเดินเครื่องเท่าที่จำเป็น
- โรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์และโรงไฟฟ้าพลังลม (solar and wind power plants) ใช้พลังงาน หมุนเวียนในรูปของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในการผลิตไฟฟ้า ถึงแม้ว่าโรงไฟฟ้า ประเภทนี้จะไม่มีค่าเชื้อเพลิงแต่ก็มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นมาก และมีขนาดเล็กมาก โรงไฟฟ้าประเภทนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนักซึ่งเป็นข้อได้ เปรียบที่สำคัญที่ทำให้โรงไฟฟ้าประเภทนี้กำลังได้รับนิยมมากขึ้น

1.3 โรงไฟฟ้าในประเทศไทย

ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าหลายโรงกระจายไปทั่วประเทศ ขนาดของโรงไฟฟ้ามีตั้งแต่ไม่กี่ MW ถึง สองพันกว่า MW ตารางที่ 1.2 แสดงให้เห็นสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 จะเห็นว่าไฟฟ้าในประเทศไทยผลิตโดยโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในสัดส่วนที่สูงมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้คือ ประเทศไทยมีก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม และโรงไฟฟ้าประเภทนี้ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศค่อนข้างน้อย จึงได้รับการยอมรับจากชุมชน มากกว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

โรงไฟฟ้า	ก้ำลังการผลิต (MW)	สัดส่วน (%)
พลังความร้อนร่วม	23313	53.5
พลังความร้อน	8176	18.7
พลังน้ำ	3406	7.8
อื่น ๆ	8741	20.0

ตารางที่ 1.2: สัดส่วนกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558

โรงไฟฟ้าอาจแบ่งตามหน่วยงานที่ดูแลหรือเป็นเจ้าของอันได้แก่ (1) กฟผ. (2) ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (independent power producer) หรือ IPP (3) ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (small power producer) หรือ SPP และ (4) ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (very small power producer) หรือ VSPP

- กฟผ. เป็นรัฐวิสาหกิจที่มีโรงไฟฟ้าในความรับผิดชอบหลายโรง ส่วนใหญ่จะเป็นโรงไฟฟ้า ขนาดใหญ่ซึ่งต้องการการลงทุนสูง โรงไฟฟ้าพลังน้ำทั้งหมดอยู่ในความดูแลของ กฟผ. แต่ โรงไฟฟ้าประเภทอื่นอาจอยู่ในความดูแลของภาคเอกชนซึ่งก็คือ IPP, SPP และ VSPP
- IPP คือ เอกชนที่สร้างโรงไฟฟ้าและผลิตไฟฟ้าเอง แต่ต้องขายไฟฟ้าให้แก่ กฟผ. โดย กฟผ. จะกำหนดปริมาณไฟฟ้าที่รับซื้อเพื่อควบคุมจำนวนของ IPP เงื่อนไขของการรับซื้อไฟฟ้าคือ

4

(1) โรงไฟฟ้าจะต้องใช้เชื้อเพลิงที่สะอาดเป็นที่ยอมรับของประชาชน (2) โรงไฟฟ้าจะต้องตั้ง อยู่ในบริเวณที่ กฟผ. กำหนด (3) กฟผ. จะเป็นผู้สั่งให้เดินเครื่องโรงไฟฟ้า และจ่ายไฟฟ้าเข้า ระบบไฟฟ้า และ (4) โรงไฟฟ้าจะต้องปฏิบัติตามมาตรฐานทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ทางราชการ กำหนด

- SPP คือ เอกชนที่สร้างโรงไฟฟ้าและผลิตไฟฟ้าในปริมาณน้อย โดยจะจำหน่ายให้ กฟผ. ไม่ เกิน 90 MW แต่อาจขายไฟฟ้าให้ผู้บริโภคที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้ SPP ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ พลังงานทดแทนเช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ ขยะ พลังงานแสง อาทิตย์ หรือพลังงานลม แต่ถ้าใช้เชื้อเพลิงอื่นเช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน หรือถ่านหิน การผลิต ไฟฟ้าจะต้องเป็นระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (cogeneration) ซึ่ง หมายถึงระบบที่พลังงานความร้อนที่ผลิตได้จะไม่ปล่อยทิ้งแต่จะนำไปใช้ประโยชน์
- VSPP คล้ายกับ SPP แต่กำลังผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW นอกจากนี้ VSPP ที่อยู่ในกรุงเทพ มหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการจะต้องขายไฟให้ กฟน. และ VSPP ที่อยู่ในจังหวัดอื่น ๆ ต้องขายไฟให้ กฟภ.

ตารางที่ 1.3 แสดงให้เห็นสัดส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยโดยหน่วยงานต่าง ๆ ในปี พ.ศ. 2557 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าโดย IPP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามนโยบายของรัฐบาลที่จะเพิ่ม บทบาทในการผลิตไฟฟ้าโดยภาคเอกชนซึ่งจะนำไปสู่การแข่งขันโดยเสรีและต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ที่ต่ำ

ผู้ผลิต	กำลังการผลิต (MW)	สัดส่วน (%)
กฟผ.	15482	45
ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ	13167	38
ผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อย	3615	10
น้ำเข้า (จากลาวและมาเลเซีย)	2404	7

ตารางที่ 1.3: สัดส่วนกำลังการผลิตของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2557

1.4 รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

โรงไฟฟ้ามีค่าก่อสร้างสูงมาก การลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้ามักพิจารณาปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ เป็นหลัก ปัจจัยที่สำคัญคือ ที่ตั้งของโรงไฟฟ้า ซึ่งควรอยู่ใกล้แหล่งเชื้อเพลิง แหล่งน้ำ และสายส่ง ไฟฟ้าแรงดันสูง อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผลกระทบด้านสิ่ง แวดล้อมเป็นสิ่งที่สำคัญที่ควรพิจารณาในการเลือกที่ตั้งของโรงไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่ประเทศไทยเริ่ม มีการก่อสร้างโรงไฟฟ้า สังคมไทยยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้า

บทที่ 1. บทนำ

เท่าที่ควร แต่เมื่อประเทศไทยเติบโตทางเศรษฐกิจมากขึ้นและประชาชนมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น สังคม เริ่มต้องการให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ควบคุมกระบวนการผลิตให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โรง ไฟฟ้าเป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่สังคมจับตามองเป็นพิเศษเนื่องจากมีความเชื่อในประชาชนบางกลุ่ม ว่า โรงไฟฟ้าเป็นแหล่งปล่อยมลภาวะทางอากาศและทางน้ำแหล่งใหญ่ จึงมีความต้องการให้รัฐบาล ควบคุมการดำเนินการของโรงไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ให้เข้มงวดขึ้น ความต้องการนี้นำไปสู่ การก่อตั้งหน่วยงานภาครัฐหลายหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำกับดูแลให้โรงงานอุตสาหกรรมปฏิบัติตาม กฎหมายสิ่งแวดล้อมอย่างเคร่งครัด

กฏหมายที่สำคัญฉบับหนึ่งคือ ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำ-หนดหลักเกณฑ์ วิธีการ ระเบียบปฏิบัติและแนวทางในการจัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบ สิ่งแวดล้อมสำหรับโครงการและกิจการที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อชุมชนอย่างรุนแรงทั้งทางด้าน คุณภาพสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรรมชาติ และสุขภาพกฏหมายที่สำคัญฉบับนี้กำหนดให้กิจการหลาย ประเภทต้องส่งรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (environmental impact assessment หรือ EIA) ให้สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (สผ.) ก่อนเริ่มดำเนิน โครงการหรือกิจการ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีกำลังการผลิต 10 MW ขึ้นไปต้องส่งรายงาน EIA ให้ สผ. ในกรณีของโรงไฟฟ้าที่ไม่มีลักษณะข้างต้น แต่มีการร้องเรียนต่อคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติว่า โรงไฟฟ้าแห่งนี้อาจส่งผลกระทบต่อชุมชนอย่างรุนแรงทั้งทางด้านคุณภาพสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรรมชาติและสุขภาพ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติจะแต่งตั้งคณะอนุกรรมการเพื่อ ทำหน้าที่วินิจฉัยข้อร้องเรียนดังกล่าว ถ้าคณะอนุกรรมการเห็นด้วยกับข้อร้องเรียน โรงไฟฟ้าก็จะต้อง ส่งรายงาน EIA ให้ สผ.

กฎหมายได้กำหนดรูปแบบของรายงาน EIA สาระที่สำคัญที่สุดของรายงานคือ มาตรการป้องกัน และแก้ไขผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในกรณีที่ความเสียหายไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ รายงาน EIA ต้อง เสนอแผนการชดเซยความเสียหายดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ รายงานต้องเสนอมาตรการและแผนการ ดำเนินการ ในการติดตามตรวจ สอบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม รายงานที่จะผ่านการ ประเมินจะต้องมีมาตรการเหล่านี้ที่ยอมรับได้โดย คณะกรรมการผู้ชำนาญการ ประชาชนและผู้มี ส่วนได้เสีย องค์การอิสระ และคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 1.4. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

คำถามท้ายบท

- 1. ประเทศใดมีอัตราส่วนการใช้ไฟฟ้าต่อจำนวนประชากรมากที่สุดในโลก
- 2. ทำไมสายส่งไฟฟ้าจึงส่งไฟฟ้าแรงดันสูง
- 3. หน่วยงานใดทำหน้าที่ดูแลสายส่งไฟฟ้า
- 4. โรงไฟฟ้าประเภทใดใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง
- 5. โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมใช้เชื้อเพลิงชนิดใด
- 6. ระบุข้อได้เปรียบและเสียเปรียบระหว่างโรงไฟฟ้าพลังความร้อนกับโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ
- 7. อะไรคือข้อได้เปรียบที่สำคัญของโรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์และโรงไฟฟ้าพลังลม
- 8. โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นโรงไฟฟ้าประเภทใด
- 9. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (IPP) กับผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อย (SPP)
- 10. ตามกฎหมาย โรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีกำลังการผลิตเท่าไรต้องส่งรายงาน EIA

บทที่ 1. บทนำ

8

บทที่ 2 วัฏจักรไอน้ำ

2.1 สมบัติของไอน้ำ

ในสภาวะปกติสถานะของน้ำคือของเหลว ถ้าน้ำได้รับความร้อนโดยมีความดันคงที่ น้ำจะมี อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำจะไม่เพิ่มแต่น้ำจะเปลี่ยนสถานะจาก ของเหลวเป็นไอน้ำ ปริมาณไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตราบใดที่น้ำยังได้รับความร้อน ในที่สุดน้ำจะ กลายเป็นไอน้ำทั้งหมด ไอน้ำจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถ้าไอน้ำยังคงได้รับความร้อน รูปที่ 2.1 แสดงให้ เห็นการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำและไอน้ำเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องโดยมีความดันคงที่ น้ำที่มี อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดเรียกว่า ของเหลวอัดตัว (compressed liquid หรือ subcooled liquid) น้ำที่ มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดแต่ยังคงมีสถานะเป็นของเหลวเรียกว่า ของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) ไอน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดโดยไม่มีของเหลวปะปนเรียกว่า ไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor) ไอ น้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดเรียกว่า ไอน้ำยวดยิ่ง (superheated vapor) ช่วงระหว่างของเหลวอิ่ม ตัวกับไอน้ำอิ่มตัวเป็นช่วงที่เป็นของผสมระหว่างน้ำอิ่มตัวกับไอน้ำอิ่มตัว

รูปที่ 2.1 เป็นกราฟที่ความดันหนึ่ง ถ้าเขียนกราฟที่ความดันอื่น ๆ ก็จะได้กราฟคล้ายกับรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าตำแหน่งของของเหลวอิ่มตัวก่อให้เกิดเส้นโค้งที่เรียกว่า เส้นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid line) และตำแหน่งของไอน้ำอิ่มตัวก่อให้เกิดเส้นโค้งที่เรียกว่า เส้นใอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor line) เส้นโค้งสองเส้นนี้บรรจบกันที่จุดวิกฤตซึ่งมีอุณหภูมิ 374°C และความดัน 22.1 MPa กลายเป็นโดมครอบพื้นที่ที่เป็นของผสมระหว่างน้ำอิ่มตัวกับไอน้ำอิ่มตัว พื้นที่นี้เรียกว่าโดมไอ (vapor dome) พื้นที่เหนือโดมไอเป็นบริเวณที่น้ำอยู่ในสถานะที่ไม่ใช่ของเหลวหรือไอน้ำอย่างชัดเจน ในการ เปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวเป็นที่ไม่ผ่านเข้าไปในโดมไอตามเส้นโค้งบนสุดของรูปที่ 2.2 จะ พบว่ามีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไออย่างค่อยเป็นค่อยไป

ในการวิเคราะห์วัฏจักรไอน้ำ มีความจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติเชิงปริมาณของน้ำหรือไอน้ำ สมบัติที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ (T) ความดัน (p) ปริมาตรจำเพาะ (v) เอนทัลปี (h) และเอนโทรปี (s) ใน บรรดาสมบัติเหล่านี้ อุณหภูมิและความดันเป็นตัวแปรที่สะดวกต่อการวัด ในขณะที่ปริมาตรจำเพาะ เอนทัลปีและเอนโทรปีจะหาจากอุณหภูมิและความดันโดยใช้ สูตรคำนวณ โปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.2: โดมไอ

ตารางไอน้ำ (steam table) หรือ แผนภูมิไอน้ำ (steam chart) นอกจากนี้การหาสมบัติไอน้ำใน ปัจจุบันมีความสะดวกมากขึ้นเนื่องจากมีแอปพลิเคชัน (application) ชื่อ Steam Calculator สำหรับ ระบบปฏิบัติการ Android และ Steam Tables Lite สำหรับระบบปฏิบัติการ iOS ที่ใช้หาสมบัติไอน้ำ ได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย

รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิ h-p ของไอน้ำ แผนภูมินี้แสดงให้เห็นเส้นน้ำอิ่มตัว เส้นไอน้ำอิ่มตัว เส้น เอนโทรปีคงที่ เส้นอุณหภูมิคงที่ และเส้นคุณภาพไอน้ำ (steam quality) คงที่ภายในโดมไอ อย่างไร ก็ตามแผนภูมินี้ไม่ได้แสดงเส้นปริมาตรจำเพาะคงที่เนื่องจากจะทำให้มีจำนวนเส้นมากเกินไปและ การคำนวณในบทนี้ไม่จำเป็นต้องทราบปริมาตรจำเพาะของไอน้ำ

ในพื้นที่ด้านขวาของโดมไอเป็นพื้นที่ของไอน้ำยวดยิ่ง การหาสมบัติของไอน้ำยวดยิ่งกระทำได้ ถ้าทราบสมบัติของไอน้ำสองตัว เช่น ถ้าทราบความดันและอุณหภูมิ ก็จะหาเอนทัลปีและเอนโทรปีได้

10



รูปที่ 2.3: แผนภูมิ h-p ของไอน้ำ

หรือถ้าทราบอุณหภูมิและเอนโทรปี ก็จะหาความดัน และเอนทัลปีได้ แต่ภายในโดมไอ อุณหภูมิและ ความดันไม่เป็นอิสระต่อกัน อุณหภูมิหรือความดันจึงนับเป็นหนึ่งตัวแปร การหาสมบัติไอน้ำภายใน โดมไอจึงต้องการสมบัติอีกหนึ่งประการนอกเหนือจากอุณหภูมิหรือความดัน สมบัติหนึ่งซึ่งนิยมใช้

บทที่ 2. วัฏจักรไอน้ำ

คือ คุณภาพไอน้ำซึ่งหมายถึงอัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำในของผสมระหว่างน้ำกับไอน้ำ สัญลักษณ์ ของคุณภาพไอคือ x ดังนั้น x = 1 จึงหมายถึงไอน้ำอิ่มตัวและ x = 0 จึงหมายถึงของเหลวอิ่มตัว

ในพื้นที่ด้านซ้ายของโดมไอซึ่งเป็นพื้นที่ของของเหลวอัดตัว การหาสมบัติของของเหลวใช้วิธี การเดียวกับพื้นที่ด้านขวาของโดมไอ อย่างไรก็ตามการใช้แผนภูมิหาค่าสมบัติในบริเวณนี้อาจไม่ สะดวกเพราะรูปที่ 2.3 ไม่ได้ให้ข้อมูลเพียงพอ อย่างไรก็ตามสมบัติของของเหลวอัดตัวขึ้นกับอุณหภูมิ มากกว่าความดัน วิธีที่นิยมใช้หาสมบัติของของเหลวอัดตัวคือ สมมุติว่าของเหลวอัดตัวคือของเหลว อิ่มตัวที่มีอุณหภูมิเท่ากันและใช้ตารางไอน้ำหาค่าสมบัติของข้าอิ่มตัว วิธีนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนเพียง เล็กน้อยในการวิเคราะห์วัฏจักรไอน้ำเพราะเอนทัลปีของของเหลวมีค่าน้อยมากเมื่อทียบกับเอนทัลปี ของไอน้ำ

2.2 วัฏจักรแรงคิน

เป็นที่ทราบกันดีว่าถ้ากำหนดอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดมาให้ วัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ซึ่งมีน้ำเป็นสารทำงานและมีแผนภาพตามรูปที่ 2.4 กระบวนการของ วัฏจักรนี้ประกอบด้วย



รูปที่ 2.4: วัฏจักรคาร์โนต์

- กระบวนการ 1-2 ความร้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ (B) โดยความดันมีค่าคงที่
- กระบวนการ 2-3 ไอน้ำขยายตัวในเครื่องกังหัน (T) โดยเอนโทรปีมีค่าคงที่
- กระบวนการ 3-4 ความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น (C) โดยความดันมีค่าคงที่
- กระบวนการ 4-1 น้ำอัดตัวในเครื่องอัดก๊าซ (Comp) โดยเอนโทรปีมีค่าคงที่

2.2. วัฏจักรแรงคิน

เป็นที่น่าสังเกตว่ากระบวนการ 1-2 และกระบวนการ 3-4 มีอุณหภูมิคงที่ การวิเคราะห์วัฏจักรคาร์-โนต์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ขึ้นกับอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรในกระบวนการ 1-2 และอุณหภูมิต่ำสุดในกระบวนการ 3-4 ดังนี้

$$\eta = 1 - \frac{T_4}{T_1}$$
(2.1)

ถ้าหากโรงไฟฟ้าถูกออกแบบให้ทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ได้ก็จะทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ สูงเช่นกัน แต่ปัญหาในทางปฏิบัติที่สำคัญของวัฏจักรคาร์โนต์คือ เครื่องอัดไอจะต้องทำหน้าที่เพิ่ม ความดันให้ของผสมระหว่างของเหลวกับไอน้ำที่สภาวะ 4 ให้กลายเป็นน้ำอิ่มตัวที่สภาวะ 1 โดย ทั่วไปเครื่องอัดไอได้รับการออกแบบให้อัดก๊าซอย่างมีประสิทธิภาพ ถ้ามีของเหลวปะปนไปกับก๊าซก็ จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง นอกจากนี้เครื่องอัดไออาจได้รับความเสียหาย ผลของการดัดแปลงวัฏจักรคาร์โนต์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพของวัฏจักรแรงคินซึ่งประกอบด้วยกระบวนการต่อไปนี้



รูปที่ 2.5: วัฏจักรแรงคิน

- กระบวนการ 1-2 ความร้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ (B) โดยความดันมีค่าคงที่
- กระบวนการ 2-3 ไอน้ำขยายตัวในเครื่องกังหัน (T) โดยเอนโทรปีมีค่าคงที่
- กระบวนการ 3-4 ความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น (C) โดยความดันมีค่าคงที่
- กระบวนการ 4-1 น้ำอัดตัวในเครื่องสูบ (P) โดยเอนโทรปีมีค่าคงที่

จากการเปรียบเทียบแผนภาพ T-s ในรูปที่ 2.4 และ 2.5 พบว่าวัฏจักรแรงคินแตกต่างกับวัฏจักร คาร์โนต์ตรงที่กระบวนการ 4-1 และ 1-2 กระบวนการ 4-1 ของวัฏจักรแรงคินเกิดขึ้นนอกโดมไอและ เป็นการอัดของเหลวแทนที่การอัดของผสมระหว่างของเหลวกับไอน้ำเหมือนในวัฏจักรคาร์โนต์ ดังนั้น จึงทำให้ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์จากเครื่องอัดไอเป็นเครื่องสูบ ข้อได้เปรียบของเครื่องสูบเทียบกับเครื่อง อัดไอคือ เครื่องสูบต้องการงานน้อยกว่าเครื่องอัดไอมากในการทำให้ของไหลมีความดันเพิ่มเท่ากัน นอกจากนี้กระบวนการ 1-2 ในวัฏจักรแรงคินเป็นกระบวนการที่อุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นวัฏจักรแรงคิน จึงมีประสิทธิภาพด้อยกว่าวัฏจักรคาร์โนต์ที่มีอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเหมือนกัน ประสิทธิภาพของ วัฏจักรแรงคินสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}} \tag{2.2}$$

$$w_{net} = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)$$
(2.3)

$$q_{in} = h_2 - h_1 \tag{2.4}$$

ตัวอย่าง] อุณหภูมิและความดันไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหันในวัฏจักรแรงคินเท่ากับ 550°C และ 15 MPa ความดันน้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้และเปรียบ เทียบกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับวัฏจักรแรงคิน

วิธีทำ

ไอน้ำในสภาวะ 2 ซึ่งโจทย์ระบุค่าอุณหภูมิและความดันมีค่า h_2 = 3449 kJ/kg และ s_2 = 6.52 kJ/kg.K ไอน้ำในสภาวะ 3 มีความดัน 0.01 MPa และ $s_3 = s_2$ ดังนั้น h_3 = 2064 kJ/kg สภาวะ 4 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 0.01 MPa ดังนั้น h_4 = 191.8 kJ/kg และ v_4 = 0.001 m³/kg เอนทัล-ปีที่สภาวะ 1 คำนวณจาก

$$h_1 = h_4 + v_4(p_1 - p_4) \\= 206.8 \text{ kJ/kg}$$

หลังจากทราบค่าเอนทัลปีของทุกสภาวะแล้วประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} w_{net} &= (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) \\ &= 1369 \text{ kJ/kg} \\ q_{in} &= h_2 - h_1 \\ &= 3242 \text{ kJ/kg} \\ \eta &= \frac{1369}{3242} = 42.2\% \end{split}$$

วัฏจักรแรงคินนี้มีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 319 K และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 823 K ประสิทธิภาพ ของวัฏจักรคาร์โนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับวัฏจักรแรงคินคือ

$$\eta = 1 - \frac{319}{823} = 61.2\%$$

2.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน

วัฏจักรแรงคินเป็นวัฏจักรผลิตไฟฟ้าในในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน แต่วัฏจักรแรงคินในรูปที่ 2.5 มีประสิทธิภาพต่ำเกินไป แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินคล้ายกับการเพิ่มประสิทธิ ภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ในสมการ (2.1) กล่าวคือ ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิ เฉลี่ยในการถ่ายเทความร้อนออกจากวัฏจักรลดลงและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการให้ความร้อน แก่วัฏจักรเพิ่มขึ้น แนวคิดนี้นำไปสู่วิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินที่ใช้ในโรงไฟฟ้า 5 วิธีคือ (1) การลดความดันในเครื่องควบแน่น (2) การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน (3) การ เพิ่มความดันในเครื่องกำเนิดไอน้ำ (4) การให้ความร้อนซ้ำ และ (5) การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

2.3.1 การลดความดันในเครื่องควบแน่น

การลดความดันการควบแน่นทำให้อุณหภูมิของการควบแน่นลดลงตามไปด้วยเนื่องจากการ ควบแน่นเกิดขึ้นในโดมไอ รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพ T-s ที่เปลี่ยนแปลงจากการลดความดันการ ควบแน่น ผลที่ได้คือ งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักรเพิ่มขึ้น (พื้นที่แรงาในรูปที่ 2.6) โดยความร้อนเข้า วัฏจักรก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เพิ่มในสัดส่วนที่น้อยกว่างานสุทธิ ดังนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรจึงเพิ่ม ขึ้น แต่การลดอุณหภูมิการควบแน่นทำให้ต้องอาศัยแหล่งรับความร้อน (heat sink) หรือแหล่งน้ำใกล้ โรงไฟฟ้ามีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้ นอกจากนี้การลดความดันควบแน่นมีข้อเสียคือ ไอ น้ำที่ออกมาจากเครื่องกังหันมีความชื้นสูง ละอองน้ำในเครื่องกังหันเป็นอันตรายต่อใบพัดของเครื่อง กังหัน และทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันลดลง โดยทั่วไปเครื่องกังหันถูกออกแบบให้ทำงานใน สภาวะที่ไอน้ำมีความชื้นไม่เกิน 15%



รูปที่ 2.6: การลดอุณหภูมิเครื่องควบแน่นในวัฏจักรแรงคิน

2.3.2 การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหันจะเพิ่มทั้งงานที่ได้จากเครื่อง กังหันและความร้อนที่ให้กับหม้อไอน้ำ อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของงานที่เพิ่มขึ้นมากกว่าความร้อนที่ ต้องให้หม้อไอน้ำ ผลลัพธ์จึงเป็นประสิทธิภาพของวัฏจักรที่สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเป็น ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของการให้ความร้อนแก่วัฏจักรที่สูงขึ้น นอกจากนี้ผลดีอีกหนึ่งข้อของการผลิต ไอน้ำยวดยิ่งคือ การลดลงของปริมาณความชื้นในของไหลที่ออกจากเครื่องกังหัน แต่ในทางปฏิบัติ อุณหภูมิของไอน้ำถูกจำกัดให้ไม่เกิน 650°C โดยประมาณเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะส่งผลเสีย ต่อใบพัดของเครื่องกังหันซึ่งทำด้วยโลหะ



รูปที่ 2.7: การเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำที่เข้าเครื่องกังหัน

2.3.3 การเพิ่มความดันในหม้อไอน้ำ

ถ้าต้องการจำกัดอุณหภูมิสูงสุดของของไอน้ำแต่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของการให้ความร้อน แก่วัฏจักรก็ต้องใช้วิธีเพิ่มความดันในหม้อไอน้ำ รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพ T-s ของวิธีนี้ จะเห็นว่า วิธีนี้ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของการให้ความร้อนแก่วัฏจักรสูงขึ้นได้ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรสูง ขึ้นเนื่องจากงานที่ได้จากเครื่องกังหันไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (พื้นที่แรเงาสองพื้นที่มีขนาดใกล้เคียง กัน) ในขณะที่ความร้อนที่ให้กับหม้อไอน้ำจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่การกระทำเช่นนี้หมายถึงการ ออกแบบหม้อไอน้ำที่ซับซ้อนขึ้นและต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่อง ปริมาณความชื้นในของไหลที่ออกจากเครื่องกังหันที่จะเพิ่มขึ้นตามความดันของหม้อไอน้ำ

ถ้าความดันในหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นจนเกินความดันวิกฤต (22.1 MPa) และอุณหภูมิสูงสุดชอง วัฏจักรมีค่ามากพอ กระบวนการให้ความร้อนวัฏจักรจะไม่ผ่านโดมไอ วัฏจักรจะกลายเป็นรูปที่ 2.9 ซึ่งมีชื่อเรียกใหม่ว่าวัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤต (supercritical Rankine cycle) วัฏจักรนี้มีประสิทธิภาพ สูงกว่าวัฏจักรแรงคินแบบธรรมดาแต่ก็มีต้นทุนสูงกว่าเช่นกัน หม้อไอน้ำที่ทำงานในวัฏจักรนี้ได้ต้อง ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ทำงานที่ความดันสูง นอกจากนี้น้ำป้อนที่ไหลเข้าหม้อไอน้ำจะต้องมีความ บริสุทธิ์ซึ่งจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในปรับสภาพน้ำ



รูปที่ 2.8: การเพิ่มความดันไอน้ำที่เข้าเครื่องกังหันโดยควบคุมให้อุณหภูมิสูงสุดคงที่



รูปที่ 2.9: วัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤต

2.3.4 การให้ความร้อนซ้ำ

รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพของวัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความร้อนซ้ำ (reheating) ไอน้ำจากหม้อ ไอน้ำจะไหลผ่านเครื่องกังหันความดันสูง (HT) ก่อนที่จะไหลเข้าสู่เครื่องให้ความร้อนซ้ำ (RH) ซึ่ง เป็นส่วนประกอบของหม้อไอน้ำ (B) เครื่องให้ความร้อนซ้ำทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำให้สูงขึ้น เท่ากับก่อนเข้า HT หลังจากนั้นไอน้ำจะไหลเข้าสู่เครื่องกังหันความดันต่ำ (LT) ก่อนไหลออกไปเข้า เครื่องควบแน่น การให้ความร้อนซ้ำทำให้งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักรเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้งานจากเครื่อง กังหันสองเครื่อง

$$w_{net} = (h_2 - h_3) + (h_4 - h_5) - (h_1 - h_6)$$
(2.5)

แต่ความร้อนเข้าวัฏจักรก็เพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากมีความร้อนเข้าสองครั้ง

$$q_{in} = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) \tag{2.6}$$

บทที่ 2. วัฏจักรไอน้ำ



รูปที่ 2.10: วัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความร้อนซ้ำ

้อย่างไรก็ตามงานสทุธิเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าความร้อนเข้า ประสิทธิภาพของวัฏจักรจึงเพิ่มขึ้น

ตัวอย่าง วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีการให้ความร้อนซ้ำ อุณหภูมิและความดันของไอน้ำก่อนเข้า เครื่องกังหันเครื่องแรก (HT) เท่ากับ 550°C และ 15 MPa อุณหภูมิและความดันของไอน้ำก่อนเข้า เครื่องกังหันเครื่องที่สอง (LT) เท่ากับ 550°C และ 2 MPa ความดันน้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้

วิธีทำ

ตัวอย่างที่แล้วแสดงให้เห็นว่า h_2 = 3449 kJ/kg, s_2 = 6.52 kJ/kg.K, h_6 = 191.8 kJ/kg และ h_1 = 206.8 kJ/kg ไอน้ำในสภาวะ 3 มีความดัน 2 MPa และ $s_3 = s_2$ ดังนั้น h_3 = 2889 kJ/kg สภาวะ 4 มีค่า h_4 = 3578 kJ/kg และ s_4 = 7.57 kJ/kg.K ไอน้ำในสภาวะ 5 มีความดัน 0.01 MPa และ $s_5 = s_4$ ดังนั้น h_5 = 2400 kJ/kg

หลังจากทราบค่าเอนทัลปีของทุกสภาวะแล้วประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความ ร้อนซ้ำคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} w_{net} &= (h_2 - h_3) + (h_4 - h_5) - (h_1 - h_6) \\ &= 1723 \text{ kJ/kg} \\ q_{in} &= (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) \\ &= 3931 \text{ kJ/kg} \\ \eta &= \frac{1723}{3931} = 43.8\% \end{split}$$

ตัวอย่างที่แล้วแสดงให้เห็นว่า ถ้าไม่มีการให้ความร้อนซ้ำไอน้ำ ประสิทธิภาพของวัฏจักรเท่ากับ 42% ดังนั้นการให้ความร้อนซ้ำจึงเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักร 4% ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของวัฏจักรที่มีการให้ความร้อนซ้ำคือความดันในการให้ ความร้อนซ้ำ ถ้าความดันสูงเกินไป ประสิทธิภาพจะไม่เพิ่มมากนัก แต่ถ้าความดันต่ำเกินไป ประสิทธิ ภาพจะลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้น ถ้าความดันของการให้ความร้อนซ้ำ (*p*₃) ในตัวอย่างที่แล้วมีค่า เปลี่ยนแปลงระหว่าง 1 MPa ถึง 10 MPa โดยที่พารามิเตอร์อื่นของวัฏจักรไม่เปลี่ยนแปลง ประสิทธิ ภาพของวัฏจักรจะเปลี่ยนแปลงตาม *p*₃ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าความดันที่เหมาะสมมีค่า ประมาณ 3 MPa หรือ 20% ของความดันสูงสุดของวัฏจักร (15 MPa)



รูปที่ 2.11: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ (η) ของวัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความร้อนซ้ำตามความ ดัน (p₃) ของการให้ความร้อนซ้ำ

การให้ความร้อนซ้ำเหมาะกับกรณีที่ความดันของหม้อไอน้ำมีค่าสูงเพียงพอ ถ้าหม้อไอน้ำมี ความดันต่ำเกินไปจะทำให้สภาวะ 5 อยู่นอกโดมไอซึ่งจะส่งผลเสียต่อการทำงานของเครื่องควบแน่น เนื่องจากเครื่องควบแน่นไม่ได้ออกแบบให้ลดอุณหภูมิไอน้ำยวดยิ่งก่อนควบแน่นไอน้ำอิ่มตัว การให้ ความร้อนซ้ำสองครั้งจะเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรได้ไม่มากเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนซ้ำหนึ่ง ครั้งซึ่งอาจจะไม่คุ้มค่าต่อการติดตั้งเครื่องให้ความร้อนซ้ำ อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนซ้ำสองครั้ง อาจมีความคุ้มค่าในกรณีของวัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤต

์ <u>ตัวอย่าง</u> วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีการให้ความร้อนซ้ำสองครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.12 กำหนดให้ T₂ = 550°C, p₂ = 15 MPa, T₄ = 550°C, p₄ = 2 MPa, T₆ = 550°C และ p₆ = 0.262 MPa ความดัน น้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

วิธีทำ

เอนทัลปีที่สภาวะต่าง ๆ มีค่าดังนี้ h₁ = 206.8 kJ/kg, h₂ = 3449 kJ/kg, h₃ = 2889 kJ/kg, h₄ = 3578 kJ/kg, h₅ = 2959 kJ/kg, h₆ = 3594 kJ/kg, h₇ = 2719 kJ/kg และ h₈ = 191.8 kJ/kg ประสิทธิภาพของวัฏจักรคำนวณได้ดังนี้

$$w_{net} = (h_2 - h_3) + (h_4 - h_5) + (h_6 - h_7) - (h_1 - h_8)$$



รูปที่ 2.12: วัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความร้อนซ้ำสองครั้ง

= 2039 kJ/kg

$$q_{in} = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5)$$

= 4566 kJ/kg
 $\eta = \frac{2039}{4566} = 44.7\%$

ตัวอย่างที่แล้วแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรที่มีการให้ความร้อนซ้ำหนึ่งครั้งเท่ากับ 43.8% ดังนั้นการให้ความร้อนซ้ำสองครั้งจึงเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักร 2%

2.3.5 การอุ่นน้ำป้อน

สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินด้อยกว่าวัฏจักรคาร์โนต์คืออุณหภูมิเฉลี่ยของการ ให้ความร้อนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรเพราะความร้อนส่วนหนึ่งถูกใช้ในการอุ่นน้ำป้อน (feed water) ในหม้อไอน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดเดือด ถ้ามีวิธีเพิ่มอุณหภูมิของน้ำป้อนก่อนเข้า หม้อไอน้ำ ความร้อนที่ใช้อุ่นน้ำป้อนในหม้อไอน้ำก็จะลดลงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรเพิ่ม ขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำสามารถกระทำได้โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำบาง ส่วนที่ดึงมาจากเครื่องกังหันไอน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้เรียกว่า เครื่องอุ่นน้ำป้อน (feed water heater) เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบ่งออกเป็น เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด (open feed water heater) และ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด (closed feed water heater)

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด

รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด ไอน้ำที่ดึงมาจากเครื่องกังหันจะผสม กับน้ำป้อนที่มาจากเครื่องควบแน่น ผลที่ได้เป็นน้ำที่มีอัตราการไหลเท่ากับผลรวมของอัตราการไหล ของไอน้ำและน้ำป้อน ไอน้ำและน้ำป้อนจะต้องมีความดันเท่ากัน ดังนั้นน้ำป้อนจึงต้องไหลผ่านเครื่อง สูบเพื่อเพิ่มความดันก่อนไหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด น้ำที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด จะไหลผ่านเครื่องสูบอีกเครื่องเพื่อเพิ่มความดันก่อนไหลเข้าหม้อไอน้ำ รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพ อุปกรณ์และแผนภาพ T-s ของวัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด ไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหัน 1 kg/ s จะแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกซึ่งมีอัตราการไหล y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p₂ ไปที่ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด (OFH) ส่วนที่สองซึ่งมีอัตราการไหล 1 – y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ ความดัน p₃ ไปที่เครื่องควบแน่น



รูปที่ 2.14: วัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด

ในการหาประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด สมการ (2.2) ไม่สามารถ ใช้ได้เนื่องจากสมการนั้นมีเงื่อนไขว่าอัตราการไหลในทุกกระบวนการของวัฏจักรต้องเท่ากัน รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลในวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดไม่เท่ากันในทุก กระบวนการ ดังนั้นประสิทธิภาพจึงต้องคำนวณโดยใช้กำลังงานสุทธิ (\dot{w}_{net}) และอัตราการถ่ายเท ความร้อนเข้าวัฏจักร (\dot{q}_{in})

$$\eta = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{q}_{in}} \tag{2.7}$$

บทที่ 2. วัฏจักรไอน้ำ

$$\dot{w}_{net} = h_1 - h_2 + (1 - y)(h_2 - h_3) - (1 - y)(h_5 - h_4) - (h_7 - h_6)$$
(2.8)
$$\dot{q}_{in} = h_1 - h_7$$
(2.9)

เอนทัลปีที่สภาวะ 6 คำนวณจากการอนุรักษ์พลังงานในเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$h_6 = yh_2 + (1 - y)h_5 \tag{2.10}$$

สภาวะ 6 ต้องมีเอนทัลปีไม่มากกว่าเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัว (h_{sat}) ที่ความดัน _{P2} ไม่เช่นนั้นของไหลที่ ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดจะเป็นของผสมของน้ำกับไอน้ำซึ่งจะส่งผลเสียต่อการทำงานของ เครื่องสูบ ดังนั้นสัดส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากเครื่องกังหันต้องไม่เกินค่าสูงสุดดังนี้

$$y = \frac{h_{sat} - h_5}{h_2 - h_5} \tag{2.11}$$

ตัวอย่าง] วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด อุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหล เข้าเครื่องกังหันเท่ากับ 550°C และ 15 MPa ความดันไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเท่ากับ 1 MPa ความดันน้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa ถ้าน้ำที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนเป็นน้ำอิ่มตัว จง หาประสิทธิภาพของวัฏจักร

วิธีทำ

สภาวะ 1 ซึ่งโจทย์ระบุค่าอุณหภูมิและความดันมีค่า h_1 = 3449 kJ/kg และ s_1 = 6.52 kJ/kg.K สภาวะ 2 มีความดัน 1 MPa และ $s_2 = s_1$ ดังนั้น h_2 = 2748 kJ/kg สภาวะ 3 มีความดัน 0.01 MPa และ $s_3 = s_1$ ดังนั้น h_3 = 2064 kJ/kg สภาวะ 4 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 0.01 MPa ดังนั้น h_4 = 191.8 kJ/kg และ v_4 = 0.001 m³/kg เอนทัลปีที่สภาวะ 5 คำนวณจาก

$$\begin{split} h_5 &= h_4 + v_4 (p_5 - p_4) \\ &= 192.9 \; \text{kJ/kg} \end{split}$$

สภาวะ 6 เป็นน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 1 MPa ดังนั้น *h*₆ = 762.9 kJ/kg และ *v*₆ = 0.0011 m³/kg เอนทัล-ปีที่สภาวะ 7 คำนวณจาก

$$h_7 = h_6 + v_6(p_7 - p_6)$$

= 778.7 kJ/kg

ถ้าอัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำเท่ากับ 1 kg/s อัตราการไหลของไอน้ำที่ดึงจาก กังหันไอน้ำเพื่อใช้อุ่นน้ำป้อนคำนวณได้ดังนี้

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} = 0.223$$

22

หลังจากทราบค่าเอนทัลปีของทุกสภาวะแล้วประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} \dot{w}_{net} &= h_1 - h_2 + (1-y)(h_2 - h_3) - (1-y)(h_5 - h_4) - (h_7 - h_6) \\ &= 1215 \text{ kW} \\ \dot{q}_{in} &= h_1 - h_7 \\ &= 2670 \text{ kW} \\ \eta &= \frac{1215}{2670} = 45.5\% \end{split}$$

ค่า y ที่ลดลงส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำป้อนที่ไหลเข้าหม้อไอน้ำลดลงซึ่งทำให้ต้องเพิ่มความร้อน ที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหัน นอกจากนี้ค่า y ที่ลดลงยังทำให้งานสุทธิของ วัฏจักรเพิ่มขึ้นด้วย แต่สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของงานสุทธิจะน้อยกว่าความร้อนเข้า ดังนั้นประสิทธิภาพ ของวัฏจักรจึงลดลงเมื่อ y ลดลง วัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดจะกลายเป็นวัฏจักรแรง-คินแบบธรรมดาถ้า y = 0

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ (shell-and-tube heat exchanger) ไอน้ำจากเครื่องกังหันจะไหลนอกท่อและน้ำป้อนจากเครื่องควบแน่นจะไหลในท่อ ไอน้ำกับน้ำป้อนจึงอาจมีความดันต่างกันได้เนื่องจากไม่มีการผสมกัน รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพของ อุปกรณ์นี้ จะเห็นว่าไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดจะเปลี่ยนเป็นน้ำควบแน่น (condensate) เมื่อออกจากเครื่อง ในขณะที่น้ำป้อนที่ไหลเข้าจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อ ไหลออก



รูปที่ 2.16 แสดงโพรไฟล์อุณหภูมิไอน้ำและน้ำป้อนในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ไอน้ำที่ไหลเข้า อาจเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่มีคุณภาพต่ำกว่า 1 ถ้าความดันไอน้ำต่ำ หรือเป็นไอน้ำยวดยิ่งถ้าความดันไอ น้ำสูง เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดความดันต่ำประกอบด้วยสองส่วนคือ เครื่องควบแน่น (condenser) ซึ่งทำหน้าที่ควบแน่นไอน้ำอิ่มตัวให้กลายเป็นน้ำอิ่มตัวโดยไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ และเครื่องลดอุณหภูมิ น้ำควบแน่น (DC) ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำอิ่มตัว เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดความดันสูงมีส่วน ประกอบเพิ่มเติมคือ เครื่องลดความยวดยิ่งของไอน้ำ (DS) ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของไอน้ำลงไปที่ อุณหภูมิอิ่มตัว น้ำป้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในการไหลผ่านเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด อุณหภูมิของ น้ำป้อนที่ไหลออกจะต้องน้อยกว่าอุณหภูมิไอน้ำที่ไหลเข้าและจะขึ้นกับการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำ ป้อน พารามิเตอร์ที่กำหนดอุณหภูมิน้ำป้อนที่ไหลออกจากเครื่องคือ TTD (terminal temperature difference) ซึ่งหมายถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิไอน้้ำควบแน่นกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่ไหลออก



รูปที่ 2.16: โพรไฟล์อุณหภูมิใน (ก) เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดความดันต่ำและ (ข) เครื่องอุ่นน้ำป้อน แบบปิดความดันสูง

น้ำควบแน่นที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดจะไม่ถูกปล่อยทิ้งเพราะสามารถนำไปใช้ได้ รูป ที่ 2.17 แสดงให้เห็นการนำน้ำควบแน่นไปใช้สองวิธีคือ เพิ่มความดันก่อนที่จะผสมกับน้ำป้อนที่ความ ดันสูงกว่าและลดความดันก่อนที่จะผสมกับน้ำป้อนที่ความดันต่ำกว่า

รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพอุปกรณ์และแผนภาพ T-s ของวัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่น ไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหัน 1 kg/s จะแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกซึ่งมี อัตราการไหล y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p_2 ไปที่เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ส่วนที่สอง ซึ่งมีอัตราการไหล 1 - y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p_2 ไปที่เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ส่วนที่สอง ซึ่งมีอัตราการไหล 1 - y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p_3 ไปที่เครื่องควบแน่น ไอน้ำที่ไหล เข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ส่วนที่สอง ซึ่งมีอัตราการไหล 1 - y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p_3 ไปที่เครื่องควบแน่น ไอน้ำที่ไหล เข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ส่วนที่สอง ซึ่งมีอัตราการไหล 1 - y จะไหลออกจากเครื่องกังหันที่ความดัน p_3 ไปที่เครื่องควบแน่น ไอน้ำที่ไหล เข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะควบแน่นและกลายเป็นน้ำโดยที่ความดันไม่เปลี่ยน ($p_6 = p_2$) น้ำที่ได้จะไหล ผ่านเครื่องสูบซึ่งทำให้ความดันเพิ่มขึ้นจาก p_6 ไปที่ p_7 น้ำป้อนที่ออกจากเครื่องสูบ อุณหภูมิน้ำป้อนจะ เพิ่มขึ้นจาก p_4 ไปที่ p_5 เมื่อไหลผ่านเครื่องสูบ อุณหภูมิน้ำป้อนจะ เพิ่มขึ้นจาก p_4 ไปที่ p_5 เมื่อไหลผ่านเครื่องสูบ อุณหภูมิน้ำป้อนจะ เพิ่มขึ้นจาก p_4 ไปที่ p_5 เมื่อไหลผ่านเครื่องสูบ อุณหภูมิน้ำป้อนจะ เพิ่มจาก T_5 ไปที่ T_8 ที่ทางออกของเครื่องอุ่นน้ำป้อน โดยที่ความดันไม่เปลี่ยน ($p_8 = p_5$) น้ำป้อน ที่สภาวะ 8 และน้ำควบแน่นที่สภาวะ 7 จะผสมกันในถังผสม (M) ก่อนไหลเข้าหมือไอน้ำ กำลังงาน



รูปที่ 2.17: วิธีนำน้ำควบแน่นไปใช้โดย (ก) เพิ่มความดันขึ้นไปผสมกับน้ำป้อนที่ความดันสูงกว่า (ข) ลดความดันลงไปผสมกับน้ำป้อนที่ความดันต่ำกว่า

สุทธิ (\dot{w}_{net}) ของวัฏจักรและอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าวัฏจักร (\dot{q}_{in}) คำนวณได้ดังนี้

$$\dot{w}_{net} = h_1 - h_2 + (1 - y)(h_2 - h_3) - (1 - y)(h_5 - h_4) - y(h_7 - h_6)$$

$$\dot{a}_{in} = h_1 - h_0$$
(2.12)
(2.13)

เป็นที่น่าสังเกตว่าวัฏจักรนี้มีจำนวนเครื่องสูบสองเครื่องซึ่งเท่ากับวัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบ เปิดในรูปที่ 2.14 อย่างไรก็ตามเครื่องสูบน้ำป้อน (feed water pump) ในรูปที่ 2.18 ที่เพิ่มความดัน น้ำป้อนจาก p₄ ไป p₅ มีอัตราการไหลของน้ำ 1 – y ซึ่งต่ำกว่าอัตราการไหล 1 kg/s ในเครื่องสูบน้ำ ป้อนในรูปที่ 2.14 ดังนั้น เครื่องสูบน้ำป้อนของวัฏจักรนี้จึงมีขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 2.18: วัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่น

การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดจะกำหนดค่า TTD ในกรณีนี้ TTD เท่ากับผลต่างระหว่าง อุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัว (T_{sat}) ที่ความดัน p₂ กับอุณหภูมิน้ำป้อนที่ไหลออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T₈)

$$\mathsf{TTD} = T_{sat} - T_8 \tag{2.14}$$

บทที่ 2. วัฏจักรไอน้ำ

้อุณหภูมิน้ำป้อนที่ไหลออก (T₈) จึงสามารถหาค่าได้ถ้าทราบค่า TTD เอนทัลปีของน้ำควบแน่นที่ออก จากเครื่องอุ่นน้ำป้อนคำนวณจากการอนุรักษ์พลังงานในเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$h_6 = h_2 - \frac{(1-y)(h_8 - h_5)}{y} \tag{2.15}$$

เอนทัลปีที่สภาวะ 9 หาค่าได้ถ้าสมมุติว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานในถังผสม (mixing chamber)

$$h_9 = yh_7 + (1 - y)h_8 \tag{2.16}$$

สภาวะ 6 ต้องมีเอนทัลปีไม่มากกว่าเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัว (h_{sat}) ที่ความดัน p₂ ไม่เช่นนั้น ของไหลที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดจะเป็นของผสมของน้ำกับไอน้ำซึ่งจะส่งผลเสียต่อการ ทำงานของเครื่องสูบ ดังนั้นสัดส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากเครื่องกังหันต้องไม่เกินค่าสูงสุดดังนี้

$$y = \frac{(h_8 - h_5)}{h_2 - h_{sat} + h_8 - h_5}$$
(2.17)

นอกจากนี้ค่าของ y ยังถูกจำกัดโดยค่าต่ำสุดของ T₆ ซึ่งเท่ากับ T₅ เนื่องจากอุณหภูมิของไอน้ำและ น้ำควบแน่นจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำป้อนทุกจุดในเครื่องอุ่นน้ำป้อน ข้อจำกัดนี้ทำให้ y ต้องมี ค่าไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุด

(ตัวอย่าง) วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดโดยเครื่องสูบจะเพิ่มความดันน้ำควบ แน่นส่งไปผสมกับน้ำป้อนในถังผสม อุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหันเท่ากับ 550°C และ 15 MPa ความดันไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเท่ากับ 1 MPa ความดันน้ำใน เครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa กำหนดให้ TTD เท่ากับ 5°C ถ้าน้ำควบแน่นที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำ ป้อนเป็นน้ำอิ่มตัว จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

วิธีทำ

ค่าเอนทัลปีในสภาวะ 1 ถึง 4, 6 และ 7 เหมือนกับตัวอย่างที่แล้ว (*h*₁ = 3449 kJ/kg, *h*₂ = 2748 kJ/kg, *h*₃ = 2064 kJ/kg, *h*₄ = 191.8 kJ/kg, *h*₆ = 762.9 kJ/kg และ *h*₇ = 778.7 kJ/kg) ปริมาตร จำเพาะที่สภาวะ 4 คือ 0.001 m³/kg เอนทัลปีที่สภาวะ 5 คำนวณจาก

$$h_5 = h_4 + v_4(p_5 - p_4)$$

= 206.8 kJ/kg

 T_8 คำนวณจากค่า TTD และอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 1 MPa ซึ่งเท่ากับ 180°C

$$T_8 = T_{sat} - \mathsf{TTD}$$
$$= 173^{\circ}\mathsf{C}$$

สภาวะ 8 มีค่า h_8 = 740.2 kJ/kg
ถ้าอัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำเท่ากับ 1 kg/s อัตราการไหลของไอน้ำที่ดึงจาก กังหันไอน้ำเพื่อใช้อุ่นน้ำป้อนคำนวณได้ดังนี้

$$y = \frac{(h_8 - h_5)}{h_2 - h_6 + h_8 - h_5}$$

= 0.212

 h_9 หาได้จากสมการ (2.17)

$$h_9 = yh_7 + (1 - y)h_8$$

= 748.5 kJ/kg

ประสิทธิภาพของวัฏจักรคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} \dot{w}_{net} &= h_1 - h_2 + (1-y)(h_2 - h_3) - (1-y)(h_5 - h_4) - y(h_7 - h_6) \\ &= 1224 \text{ kg/s} \\ \dot{q}_{in} &= h_1 - h_9 \\ &= 2700 \text{ kg/s} \\ \eta &= 45.3\% \end{split}$$

ค่า y ที่ลดลงส่งผลให้อุณหภูมิ T₇ ลดลงและทำให้อุณหภูมิ T₉ ของน้ำป้อนที่ไหลเข้าหม้อไอ น้ำลดลงตามไปด้วย ดังนั้นความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหันจึงต้อง เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า y ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้งานสุทธิของวัฏจักรเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของ งานสุทธิจะน้อยกว่าความร้อนเข้า ดังนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรจึงลดลงเมื่อ y ลดลง วัฏจักรแรง-คินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่นจึงควรมีค่า y สูงสุดเพื่อให้วัฏจักรมี ประสิทธิภาพสูงสุด

$$\dot{w}_{net} = h_1 - h_2 + (1 - m)(h_2 - h_3) - (h_7 - h_4)$$
 (2.18)

$$\dot{q}_{in} = h_1 - h_8 \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.19: วัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีลดความดันน้ำควบแน่น

การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดจะกำหนดค่า TTD เช่นเดียวกับวัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำ ป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่น อุณหภูมิน้ำป้อนที่ไหลออก (T₈) จึงสามารถหาค่าได้ ถ้าทราบค่า TTD โดยใช้สมการ (2.14) เอนทัลปีของน้ำควบแน่นที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนคำนวณ จากการอนุรักษ์พลังงานในเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$h_5 = h_2 - \frac{h_8 - h_7}{y} \tag{2.20}$$

สัดส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากเครื่องกังหัน (y) จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ค่าสูงสุด ทำให้น้ำควบแน่นเป็นน้ำอิ่มตัวที่ความดัน p2 ค่าต่ำสุดทำให้ T5 เท่ากับ T7

ตัวอย่าง วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดโดยน้ำควบแน่นถูกลดความดันและส่ง ไปที่เครื่องควบแน่น อุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหันเท่ากับ 550°C และ 15 MPa ความดันไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเท่ากับ 1 MPa ความดันน้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa กำหนดให้ TTD เท่ากับ 5°C และ y เท่ากับ 0.22 จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

วิธีทำ

ค่าเอนทัลปีในสภาวะ 1 ถึง 4, 7 และ 8 เหมือนกับตัวอย่างที่แล้ว (h_1 = 3449 kJ/kg, h_2 = 2748 kJ/kg, h_3 = 2064 kJ/kg, h_4 = 191.8 kJ/kg, h_7 = 207.0 kJ/kg และ h_8 = 740.2 kJ/kg) เอนทัลปี ที่สภาวะ 5 คำนวณจาก

$$h_5 = h_2 - \frac{h_8 - h_7}{y}$$

= 323.9 kJ/kg

หลังจากทราบค่าเอนทัลปีของทุกสภาวะแล้วประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} \dot{w}_{net} &= h_1 - h_2 + (1-m)(h_2 - h_3) - (h_7 - h_4) \\ &= 1219 \text{ kW} \\ \dot{q}_{in} &= h_1 - h_8 \\ &= 2708 \text{ kW} \\ \eta &= \frac{1219}{2708} = 45.0\% \end{split}$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้จะเปลี่ยนแปลงตาม y กำลังงานสุทธิที่ได้จากวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นเมื่อ y ลดลง ในขณะที่ความร้อนเข้าวัฏจักรไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นประสิทธิภาพจึงเพิ่มขึ้นเมื่อ y ลดลง ดัง นั้นวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีลดความดันน้ำควบแน่นจึงควรมีค่า y ต่ำสุด อย่างไรก็ตาม ค่า y ที่น้อยลงทำให้ผลต่างเชิงล็อกของอุณหภูมิ (log-mean temperature difference) ลดลงซึ่งหมายความว่าพื้นที่ผิวของเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะต้องเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการ ลงทุนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพิ่มขึ้น

การเปรียบเทียบวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนสามแบบ

การออกแบบวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนมาสามทางเลือกคือ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่น และเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธี ลดความดันน้ำควบแน่น ทางเลือกที่ดีที่สุดคือ ทางเลือกที่ทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรสูงสุดเมื่อ เปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์สมรรถนะของวัฏจักรสูงสุดเมื่อ เปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์สมรรถนะของวัฏจักรสูงสุดเมื่อ เปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์สมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสาม วัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนทั้งสามแบบโดยกำหนดให้ความดันสูงสุด (*p_{max}*) อุณหภูมิสูงสุด (*T_{max}*) ความดันไอน้ำที่ดึงออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดเท่ากับ 5°C นอกจากนี้ค่า *y* ในแต่ละวัฏจักรเป็น ค่าที่ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด กล่าวคือ *y* มีค่าสูงสุดในวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบ เปิดและเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีเพิ่มความดันน้ำควบแน่น และ *y* มีค่าต่ำสุดในวัฏจักรแรง-คินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดที่ใช้วิธีลดความดันน้ำควบแน่น และ *y* มีค่าต่ำสุดในวัฏจักรแรง อุ่นน้ำป้อนแบบเปิดมีประสิทธิภาพมากกว่าอีกสองวัฏจักรที่เหลือเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ผลของการ เปรียบเทียบนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า เครื่องสูบมีประสิทธิภาพ 100% ถ้าประสิทธิภาพของเครื่อง สูบน้อยกว่านี้ก็มีความเป็นไปได้ที่ กำลังงานของเครื่องสูบ (*w*_{in}) ของวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำ ป้อนแบบเปิดจะเพิ่มขึ้นจนทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้ต่ำกว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินที่ มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด

	۲ ۲	<u>۷</u>		
พารามิเตอร์	เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด	เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด		
		เพิ่มความดันน้ำควบแน่น	ลดความดันน้ำควบแน่น	
p_{max} (MPa)	15	15	15	
T_{max} (°C)	550	550	550	
p_{ext} (MPa)	1	1	1	
$p_{min}~({ m kPa})$	10	10	10	
y	0.223	0.212	0.209	
\dot{w}_{out} (kW)	1232	1239	1241	
\dot{w}_{in} (kW)	16.5	15.3	15.1	
\dot{q}_{in} (kW)	2670	2700	2708	
η (%)	45.5	45.3	45.3	

ตารางที่ 2.1: การเปรียบเทียบวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนสามแบบโดยที่อัตราการไหลของไอ น้ำในหม้อไอน้ำเท่ากับ 1 kg/s

ความดันไอน้ำในเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่เหมาะสมที่สุด

การกำหนดความดันที่ไอน้ำควรจะดึงจากกังหันไอน้ำหรือความดันไอน้ำควบแน่นในเครื่องอุ่น น้ำป้อนมีผลต่อประสิทธิภาพของวัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อน ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์หาความดันที่ เหมาะสมที่สุดสามารถกระทำได้ในทางทฤษฏี แต่ในทางปฏิบัติมักใช้หลักการง่าย ๆ ในการหาความ ดันดังกล่าว รูปที่ 2.14, 2.18 และ 2.19 แสดงให้เห็นว่า วัฏจักรที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนหนึ่งเครื่องมี อุณหภูมิที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากไอน้ำเป็นของเหลวสามอุณหภูมิ อุณหภูมิตรงกลางเป็นอุณหภูมิไอ น้ำควบแน่นในเครื่องอุ่นน้ำป้อน ในกรณีนี้ความดันที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นความดันที่ทำให้อุณหภูมิ ของไอน้ำควบแน่นในเครื่องอุ่นน้ำป้อน ในกรณีนี้ความดันที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นความดันที่ทำให้อุณหภูมิ ของไอน้ำควบแน่นในเครื่องอุ่นน้ำป้อนเท่ากับค่าเฉลี่ยของอีกสองอุณหภูมิ ในกรณีที่มีเครื่องอุ่นน้ำ ป้อน n เครื่อง ความดันที่เหมาะสมที่สุดของการควบแน่นในแต่ละเครื่องสามารถหาได้โดยใช้วิธี คล้ายกัน กล่าวคือการพิจารณาให้ระยะห่างระหว่างอุณหภูมิของการควบแน่นในวัฏจักรมีค่าเท่า ๆ กัน สมมุติว่า T_B เป็นอุณหภูมิของไอน้ำในหม้อไอน้้า และ T_C เป็นอุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่น ระยะห่างระหว่างอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเท่ากับ

$$\Delta T = \frac{T_B - T_C}{n+1} \tag{2.21}$$

ดังนั้นอุณหภูมิไอน้ำควบแน่นในเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 1 ซึ่งอยู่ใกล้เครื่องควบแน่นเท่ากับ $T_C+\Delta T$ และอุณหภูมิไอน้ำควบแน่นในเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ n ซึ่งอยู่ใกล้หม้อไอน้ำเท่ากับ $T_B-\Delta T$

2.4 ผลกระทบของความผวนกลับไม่ได้ในวัฏจักร

การวิเคราะห์วัฏจักรแรงคินที่ผ่านมาอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่ากระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรผวน กลับได้ (reversible) แต่กระบวนการที่เกิดขึ้นจริงผวนกลับไม่ได้ (irreversible) ซึ่งจะส่งผลให้เอนโทร ปีของน้ำเพิ่มในกระบวนการไหลผ่านเครื่องสูบและเครื่องกังหันและทำให้ความดันของไอน้ำลดลง ในกระบวนการไหลผ่านหม้อไอน้ำและเครื่องควบแน่น ผลกระทบที่สำคัญของการผวนกลับไม่ได้มา จากเครื่องสูบและเครื่องกังหัน ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ (pump efficiency, η_p) และประสิทธิภาพ ของเครื่องกังหัน (turbine efficiency, η_t) มีสูตรดังนี้

$$\eta_p = \frac{\Delta w_{ps}}{\Delta w_p}$$
$$\eta_t = \frac{\Delta w_t}{\Delta w_{ts}}$$

โดยที่ w_{ps} และ w_p เป็นงานที่ให้เครื่องสูบเพื่อเพิ่มความดันของน้ำเหมือนกัน ต่างกันตรงที่ w_{ps} เป็นงานที่ให้เครื่องสูบในกระบวนการไอเซนโทรปิก (isentropic process) ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่ เอนโทรปีไม่เปลี่ยนแปลง ส่วน w_p เป็นงานที่ให้เครื่องสูบจริง ในทำนองเดียวกัน w_t และ w_{ts} เป็นงาน ที่ได้จากเครื่องกังหันจริง และเครื่องกังหันในกระบวนการไอเซนโทรปิก โดยต่างก็ทำงานที่อัตราส่วน ความดันที่เท่ากัน รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบแผนภาพ T-s ของกระบวนการไอเซนโทรปิกกับกระบวนการ จริงในเครื่องสูบและเครื่องกังหัน



รูปที่ 2.20: กระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องสูบและเครื่องกังหัน (4-1 และ 2-3) เปรียบเทียบกับ กระบวนการไอเซนโทรปิก (4-1s และ 2-3s)

ในกรณีของเครื่องสูบและเครื่องกังหันดังแสดงในรูปที่ 2.20 สูตรคำนวณประสิทธิภาพคือ

$$\eta_p = \frac{h_{1s} - h_4}{h_1 - h_4}$$
$$\eta_t = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}}$$

ตัวอย่าง] อุณหภูมิและความดันไอน้ำก่อนเข้าเครื่องกังหันในวัฏจักรแรงคินเท่ากับ 550°C และ 15 MPa ความดันน้ำในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้ถ้าเครื่อง กังหันมีประสิทธิภาพ 90% และเครื่องสูบมีประสิทธิภาพ 80%

วิธีทำ

ตัวอย่างที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า h_2 = 3449 kJ/kg, h_{3s} = 2064 kJ/kg, h_4 = 191.8 kJ/kg และ h_{1s} = 206.8 kJ/kg เอนทัลปีที่สภาวะ 3 คำนวณจากประสิทธิภาพของเครื่องกังหัน

$$h_3 = h_2 - \eta_t (h_2 - h_{3s})$$

= 2203 kJ/kg

เอนทัลปีที่สภาวะ 1 คำนวณจากประสิทธิภาพของเครื่องสูบ

$$h_1 = \frac{h_{1s} - h_4}{\eta_p} + h_4$$
$$= 210.8 \text{ kJ/kg}$$

หลังจากทราบค่าเอนทัลปีของทุกสภาวะแล้วประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{split} w_{net} &= (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) \\ &= 1227 \text{ kJ/kg} \\ q_{in} &= h_2 - h_1 \\ &= 3238 \text{ kJ/kg} \\ \eta &= \frac{1227}{3238} = 37.9\% \end{split}$$

2.5 ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ วัฏจักรกำลังงาน ระบบหล่อเย็นและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อไอน้ำ (B) ทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมี ในเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนที่ขับเคลื่อนวัฏจักรกำลังงาน ระบบหล่อเย็นทำหน้าที่ระบายความ ร้อนจากวัฏจักรแรงคิน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงพลังงานกลที่ได้จากวัฏจักรกำลังงาน เป็นพลังงานไฟฟ้า ถ้ามองโดยภาพรวมจะเห็นว่าส่วนเข้าของโรงไฟฟ้าคือ พลังงานเคมีของเชื้อเพลิง และส่วนออกคือ พลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า (ŋ_o) จึงเท่ากับอัตราส่วนของพลังงาน ไฟฟ้าต่อพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง

$$\eta_o = \frac{P_e}{\dot{m}_f.HV} \tag{2.22}$$

โดยที่ P_e คือพลังไฟฟ้า, \dot{m}_f คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าและ HV (heating value) คือ ค่า ความร้อนของเชื้อเพลิง HV อาจเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) หรือค่าความร้อนต่ำ (LHV) การ คำนวณประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าควรระบุให้ชัดเจนว่าจะใช้ค่าความร้อนใด ในตำราเล่มนี้สมมุติว่า ค่าความร้อนคือ HHV



รูปที่ 2.21: โรงไฟฟ้าพลังความร้อน

η_o สามารถเขียนเป็นผลคูณของประสิทธิภาพสามค่าดังนี้

$$\eta_o = \eta_b . \eta_. \eta_g \tag{2.23}$$

ประสิทธิภาพทั้งสามค่าคือ

 η_b คือ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (boiler efficiency) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของเอนทัลปีที่เพิ่ม ขึ้นเมื่อน้ำกลายเป็นไอน้ำยวดยิ่งจากการไหลผ่านหม้อไอน้ำต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_s(h_{out} - h_{in})}{\dot{m}_f . HHV} \tag{2.24}$$

โดยที่ m_s คือ อัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ, h_{in} คือ เอนทัลปีของน้ำป้อนที่ไหลเข้าหม้อ ไอน้ำ และ h_{out} คือ เอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งที่ไหลออกจากหม้อไอน้ำ

 η คือ ประสิทธิภาพของวัฏจักรกำลังงานซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของกำลังงานสุทธิที่ได้จากวัฏจักร (w_{net}) ต่อกำลังงานความร้อนที่เข้าหม้อไอน้ำ (q_{in})

$$\eta = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{q}_{in}} \tag{2.25}$$

เป็นที่น่าสังเกตว่า \dot{q}_{in} มีค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีเมื่อน้ำกลายเป็นไอน้ำใน สมการ (2.24)

 η_g คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator efficiency) ซึ่งเท่ากับ อัตราส่วนของ พลังไฟฟ้า (P_e) ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกำลังงานกลที่เข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta_g = \frac{P_e}{\dot{w}_{net}} \tag{2.26}$$

ในทางปฏิบัติวิศวกรโรงไฟฟ้าสนใจอยากทราบว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้า 1 kW.h ต้องใช้พลังงาน ความร้อนเท่าไร ตัวเลขนี้คือ อัตราความร้อน (heat rate)

$$HR = \frac{m_f.HHV}{P_e\Delta t} \tag{2.27}$$

โดยที่ Δt คือ ช่วงเวลาที่ผลิตไฟฟ้าและ m_f คือ มวลเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าว หน่วยของ HR คือ kJ/kW.h HR สามารถคำนวณได้จาก η_o ดังนี้

$$HR = \frac{3600}{\eta_o} \tag{2.28}$$

34

2.5. ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

คำถามท้ายบท

- 1. ถ้าไอน้ำที่ออกจากเครื่องกังหันมีความชื้นมากเกินไปจะเกิดผลเสียอย่างไร
- ทำไมน้ำในเครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินจึงไม่สามารถมีความดันที่ต่ำมาก ๆ ได้ทั้ง ๆ ที่ ประสิทธิภาพของวัฏจักรเพิ่มขึ้นเมื่อความดันนี้ลดลง
- ทำไมการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำเข้ากังหันจึงเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน
- 4. จงเขียนแผนภูมิ T-s ของวัฏจักรแรงคินที่มีการให้ความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง
- 5. การอุ่นน้ำป้อนเพิ่มประสิทธิภาพให้วัฏจักรแรงคินได้อย่างไร
- จงเขียนแผนภาพของวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดหนึ่งเครื่อง โดยแสดงอุป-กรณ์สำคัญและทิศทางการไหลในแผนภาพด้วย
- นอกจากทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำป้อนแล้ว เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดยังทำหน้าที่อะไรอีก
- 8. เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดแบ่งออกเป็นกี่แบบ อะไรบ้าง
- ทำไมการให้ความร้อนซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้งจึงไม่ควรกระทำในกรณีที่วัฏจักรแรงคินมีความดัน หม้อไอน้ำต่ำ
- 10. จงเขียนแผนภูมิ T-s ของวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดหนึ่งเครื่อง
- จงเขียนแผนภาพของวัฏจักรแรงคินที่มีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดหนึ่งเครื่อง โดยน้ำควบแน่น ไหลกลับไปที่เครื่องควบแน่น แสดงอุปกรณ์ทุกอุปกรณ์และทิศทางการไหลในแผนภาพด้วย
- 12. ไอน้ำที่มีความดัน 6 MPa และอุณหภูมิ 850 K มีเอนทัลปีประมาณเท่าไร
- 13. ไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 900 K และความดัน 12 MPa ใหลเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดซึ่งออกแบบ ให้มีค่า TTD เท่ากับ 5 K อยากทราบว่าน้ำป้อนที่ไหลออกจากเครื่องจะมีอุณหภูมิเท่าไร
- 14. วัฏจักรแรงคินมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำที่เข้าเครื่องกังหัน ไอน้ำเท่ากับ 10 MPa และ 700 K ไอน้ำที่ดึงจากเครื่องกังหันมีความดัน 3 MPa และความดัน ในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 0.01 MPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร
- 15. วัฏจักรแรงคินหนึ่งมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดโดยที่น้ำควบแน่นถูกสูบและส่งไปผสมกับน้ำ ป้อนที่จะไหลเข้าหม้อไอน้ำ ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำที่เข้าเครื่องกังหันเท่ากับ 8 MPa และ 850 K ไอน้ำที่ดึงจากเครื่องกังหันมีความดัน 0.8 MPa และความดันในเครื่องควบแน่น เท่ากับ 0.01 MPa เครื่องอุ่นน้ำป้อนไม่มีเครื่องลดอุณหภูมิน้ำควบแน่น (drain cooler) ค่า TTD ของเครื่องเท่ากับ 5°C จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

16. โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งมีอัตราความร้อนเท่ากับ 9000 kJ/kW.h จงหาประสิทธิภาพรวมของโรง ไฟฟ้าแห่งนี้

36

บทที่ 3 เชื้อเพลิง

3.1 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงหลักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เชื้อเพลิงแข็งมีข้อดีคือ มีราคาถูก เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ แต่มีข้อเสียคือ ต้องการระบบเผาไหม้ที่ค่อนข้างซับซ้อน และก่อให้เกิดมลภาวะมากกว่า เชื้อเพลิงแข็งเกือบทั้งหมดที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนคือ ถ่านหิน (coal) อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ถ่านหินทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศและส่งผลเสียต่อสภาวะโลก ร้อน ในปัจจุบันจึงมีความพยายามใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) เพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลัง ความร้อน แต่เชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสมมีปริมาณไม่มากนัก การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจึงมีแนวโน้ม จะจำกัดอยู่ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดกลาง

3.1.1 ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลาหลายล้านปีของซากพืชภาย ใต้ภาวะความดันและอุณหภูมิสูง อายุของถ่านหินเป็นตัวกำหนดสมบัติของถ่านหิน ถ่านหินตาม แหล่งต่าง ๆ ในโลกจึงมีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืช อายุ และสภาพแวดล้อมของแหล่ง ที่เกิดถ่านหิน ถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทตามอายุจากมากไปน้อยคือ แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) ถ่านหินที่พบ ในประเทศไทยคือ ลิกไนต์ซึ่งเป็นถ่านหินเกรดต่ำที่สุด

การวิเคราะห์ถ่านหิน

คุณภาพและราคาของถ่านหินถูกกำหนดโดยส่วนประกอบของถ่านหิน การวิเคราะห์ถ่านหินคือ การหาส่วนประกอบของถ่านหินและสัดส่วนของส่วนประกอบเหล่านั้น การวิเคราะห์มีสองวิธีคือ การ วิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) การวิเคราะห์โดยประมาณคือ การหาสัดส่วนโดยมวลของส่วนประกอบ 4 อย่างของถ่านหิน

ได้แก่ ความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอน (free carbon) รูป

ที่ 3.1 แสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ ขั้นตอนแรกคือ เลือกตัวอย่างถ่านหินในปริมาณ ที่พอเหมาะกับการทดสอบ ถ่านหินนี้จะถูกนำไปหามวลเริ่มต้น (m_{ar}) หลังจากนั้นถ่านหินจะถูกอบ แห้งแล้วจึงหามวลที่เหลือของถ่านหินแห้ง มวลที่หายไปคือ มวลของความชื้น (m_M) ถ่านหินแห้ง จะถูกนำไปอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและปราศจากอากาศเพื่อไล่สาระเหยออกไป ผลที่ได้คือ ถ่านโค้ก (coke) ผลต่างระหว่างมวลของถ่านหินแห้งกับถ่านโค้กคือ มวลของสารระเหย (m_{VM}) เมื่อ นำถ่านโค้กไปเผาไหม้โดยสมบูรณ์ก็จะเหลือเพียงเถ้าซึ่งมีมวล m_A ขั้นตอนสุดท้ายคือ คำนวณมวล ของคาร์บอน (m_C) จากผลต่างระหว่างมวลของถ่านหินเริ่มต้นกับผลรวมของมวลของความชื้น สาร ระเหยและเถ้า สัดส่วนโดยมวลของส่วนประกอบของถ่านหินคือ มวลของส่วนประกอบหารด้วยมวล ของถ่านหิน ดังนี้



$$x_C = \frac{m_C}{m_{ar}}; \ x_{VM} = \frac{m_{VM}}{m_{ar}}; \ x_M = \frac{m_M}{m_{ar}}; \ x_A = \frac{m_A}{m_{ar}}$$
 (3.1)

รูปที่ 3.1: ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกอายุของถ่านหินได้ดีเพราะความชื้นลดลงตามอายุถ่านหิน ดังนั้น แอนทราไซต์มีความชื้นต่ำมากในขณะที่ลิกไนต์อาจมีความชื้นสูงถึง 50% นอกจากความชื้นถ่านหิน ยังอาจมีน้ำที่มีพันธะทางเคมีกับสารอื่น (bound water) ซึ่งไม่นับเป็นความชื้นเพราะน้ำดังกล่าวไม่ ระเหยโดยง่ายเหมือนน้ำอิสระ (free water) แต่จะคงเหลือในถ่านหินแม้ว่าถ่านหินจะอยู่ในสภาพ แห้งสนิท การกำจัดน้ำที่มีพันธะทางเคมีกับสารอื่นต้องใช้ความร้อนที่มากกว่าการอบแห้งถ่านหิน ความชื้นเป็นสาเหตุหนึ่งของการสูญเสียพลังงานในหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากเมื่อ ถ่านหินถูกเผาไหม้ ความร้อนบางส่วนจะถูกใช้ไปในการทำให้ความชื้นกลายเป็นไอน้ำซึ่งจะเป็นส่วน หนึ่งของก๊าซเสีย

3.1. เชื้อเพลิงแข็ง

รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าสารระเหยคือ สารต่าง ๆ ที่ถูกกำจัดออกจากถ่านหินแห้งที่ได้รับความ ร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 954°C สารเหล่านี้ได้แก่ก๊าซนานาชนิดที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างภายในถ่านหิน ซึ่งมีทั้งก๊าซที่ติดไฟได้เช่น CH4 และที่ติดไฟไม่ได้เช่น CO2 นอกจากนี้น้ำที่มีพันธะกับสารอื่นก็นับ ว่าเป็นสารระเหยเช่นกันเพราะมันก็จะถูกกำจัดออกจากถ่านหินเช่นเดียวกับสารระเหยอื่น ถ่านหิน ที่มีสารระเหยมากคือถ่านหินที่มีความพรุนสูงซึ่งทำให้มีช่องว่างมากที่กักเก็บก๊าซ การมีสารระเหย มากนับว่าเป็นประโยชน์ถ้าสารระเหยติดไฟได้เนื่องจากมันจะช่วยให้ถ่านหินติดไฟง่ายขึ้น อย่างไร ก็ตามสารระเหยที่ติดไฟได้เป็นสาเหตุสำคัญของการเผาไหม้ขึ้นมาเอง (spontaneous combustion) ซึ่งอาจเกิดขึ้นกับถ่านหินที่อยู่ระหว่างการเก็บเพื่อรอการเผาไหม้ในเตาเผา ถ้าอากาศมากพอและ อุณหภูมิสูงพอสารระเหยในถ่านหินจะเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศได้ ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ ขึ้นมาเองได้แก่ ประเภทของถ่านหิน พื้นผิวของกองถ่านหินที่สัมผัสกับอากาศ อุณหภูมิแวดล้อมและ ลักษณะการกองถ่านหิน

เถ้าเป็นสารที่ไม่เผาไหม้และจะเหลือตกค้างจากการเผาไหม้ถ่านหิน ส่วนประกอบของเถ้าได้แก่ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, P₂O₅ เป็นต้น เถ้าจะเป็นตัวลดคุณภาพของถ่านหินเพราะมันเพียงแค่ทำให้ ถ่านหินมีน้ำหนักมากขึ้น นอกจากนี้เถ้ายังมีผลกระทบเชิงลบอื่น ๆ เถ้าที่มีอุณหภูมิเถ้าหลอมเหลว (ash fusion temperature) ต่ำจะหลอมเหลวระหว่างการเผาไหม้กลายเป็นสแลก (slag) ตกลงสู่ด้าน ล่างของเตาเผาหรือไปเกาะติดพื้นผิวของเตาเผา ส่วนเถ้าที่มีอุณหภูมิเถ้าหลอมเหลวสูงจะลอยไปกับ ก๊าซเสียที่ถูกระบายสู่บรรยากาศ และกลายเป็นมลภาวะทางอากาศ

คาร์บอนอิสระหมายถึงคาร์บอนที่ไม่ได้รวมกับธาตุอื่นอยู่ในรูปของสารประกอบ คาร์บอนอิสระ จึงอยู่ในสภาพที่พร้อมเผาไหม้ คาร์บอนอิสระเป็นส่วนประกอบสำคัญของถ่านหินเพราะค่าความ ร้อนส่วนใหญ่ของถ่านหินมาจากคาร์บอนอิสระ ถ่านหินที่มีอายุมากมีสัดส่วนของคาร์บอนอิสระสูง และจัดเป็นถ่านหินคุณภาพดี ในทางตรงข้ามถ่านหินคุณภาพต่ำมีสัดส่วนของคาร์บอนอิสระน้อย

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบส่วนประกอบของถ่านหนิทั้ง 4 ประเภทที่ได้จากการวิเคราะห์โดย ประมาณ จะเห็นว่าสัดส่วนของความชื้นลดลงตามอายุของถ่านหิน ในขณะที่สัดส่วนของคาร์บอน เพิ่มขึ้นตามอายุของถ่านหิน สัดส่วนของสารระเหยและเถ้าไม่ได้ขึ้นกับอายุของถ่านหินเพียงอย่าง เดียว

ชนิดของถ่านหิน	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	สารระเหย (%)	คาร์บอน (%)
แอนทราไซต์	4.3	9.6	5.1	81.0
บิทูมินัส	8.5	10.8	36.4	44.3
ซับบิทูมินัส	22.2	4.3	33.2	40.3
ลิกไนต์	36.8	5.9	27.8	29.5

ตารางที่ 3.1: ส่วนประกอบของถ่านหินจากการวิเคราะห์โดยประมาณ

การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายใช้หาสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ในโตรเจน (N) กำมะถัน (S) ในถ่านหิน ข้อมูลที่ได้จะมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์การเผาไหม้ ของถ่านหิน อย่างไรก็ตามวิธีนี้นับว่าซับซ้อนมากกว่าวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ ถ่านหินที่นำมา วิเคราะห์เป็นถ่านหินในสภาพแห้งและไม่มีเถ้า (dry ash-free coal) ดังนั้นมวลของถ่านหินที่นำมา วิเคราะห์จึงเป็นมวลของคาร์บอนอิสระรวมกับมวลของสารระเหย

$$m_{daf} = m_C + m_{VM} \tag{3.2}$$

ผลการวิเคราะห์จะให้มวลของธาตุทั้ง 5 ธาตุซึ่งใช้คำนวณสัดส่วนโดยมวลดังนี้

$$x_{C,daf} = \frac{m_C}{m_{daf}} ; \ x_{H,daf} = \frac{m_H}{m_{daf}} ; \ x_{O,daf} = \frac{m_O}{m_{daf}} ; \ x_{N,daf} = \frac{m_N}{m_{daf}} ; \ x_{S,daf} = \frac{m_S}{m_{daf}}$$
(3.3)

ดังนั้นผลรวมของสัดส่วนโดยมวลของธาตุทั้ง 5 ธาตุจึงเท่ากับ 1 นอกจากนี้การรายงานผลการ วิเคราะห์ขั้นสุดท้ายอาจระบุสัดส่วนโดยมวลของความชื้นและเถ้าในสมการ (3.1) ซึ่ง m_{ar} ในสมการ นั้นคือ มวลของถ่านหินในสภาพเดิม (as-received coal) ที่มีทั้งความชื้นและเถ้า ผลต่างระหว่าง m_{ar} กับ m_{daf} ซึ่งเป็นมวลถ่านหินในสภาพแห้งและไม่มีเถ้าเท่ากับมวลของความชื้นและมวลของ เถ้า

$$m_{ar} - m_{daf} = m_M + m_A \tag{3.4}$$

ซึ่งทำให้

$$m_{daf} = m_{ar}(1 - x_M - x_A) \tag{3.5}$$

สัดส่วนโดยมวลของ C, H, O, N และ S ในสมการ (3.3) ใช้ฐานที่แตกต่างกับสัดส่วนโดยมวลของ ความชื้นและเถ้าในสมการ (3.1) อย่างไรก็ตามสัดส่วนโดยมวลของ C, H, O, N และ S สามารถแปลง ให้อยู่ในฐานเดียวกับสัดส่วนโดยมวลของความชื้นและเถ้าดังนี้

$$x_{C,ar} = x_{C,daf}(1 - x_M - x_A)$$
(3.6)

โดยที่

$$x_{C,ar} = \frac{m_C}{m_{ar}} \tag{3.7}$$

สมการของ $x_{H,ar}$, $x_{O,ar}$, $x_{N,ar}$ และ $x_{S,ar}$ คล้ายกับสมการข้างต้น

์ ตัวอย่าง การวิเคราะห์ถ่านหินลิกไนต์ในสภาพเดิมให้ผลดังนี้ C 39.58%, H 2.57%, O 9.70%, N 0.67%, S 0.49%, ความชื้น 33.54% และเถ้า 13.46% จงหาสัดส่วนโดยมวลของ C, H, O, N และ S ของถ่านหินในสภาพแห้งและไม่มีเถ้า

.....

3.1. เชื้อเพลิงแข็ง

โจทย์กำหนด $x_{H,ar}$, $x_{O,ar}$, $x_{N,ar}$ และ $x_{S,ar}$ มาให้ สมการ (3.6) ใช้สัดส่วนโดยมวลของ ถ่านหินในสภาพแห้งและไม่มีเถ้า

$$\begin{aligned} x_{C,daf} &= \frac{x_{C,ar}}{(1 - x_M - x_A)} \\ &= \frac{0.3958}{(1 - 0.3354 - 0.1346)} \\ &= 0.7468 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ $x_{H,daf}$ = 0.0485, $x_{O,daf}$ = 0.1830, $x_{N,daf}$ = 0.0126 และ $x_{S,daf}$ = 0.0092

สมบัติของถ่านหิน

ในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้า ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของถ่านหินมีความจำเป็น สำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์การเผาไหม้อย่างเหมาะสมกับ อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับถ่านหินประเภท หนึ่งอาจจะเกิดปัญหาในการทำงานได้ถ้าใช้งานกับถ่านหินอีกประเภทหนึ่ง การทดสอบถ่านหินจะ กระทำตามมาตรฐานสากลเพื่อกำหนดสมบัติที่สำคัญของถ่านหินซึ่งได้แก่

• ค่าความร้อน

การเผาใหม้ถ่านหินทำให้พลังงานเคมีที่สะสมในถ่านหินแปลงเป็นพลังงานความร้อน ค่า ความร้อนของถ่านหินหมายถึง พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินหนึ่งกิโลกรัม อุปกรณ์วัดค่าความร้อนคือ คาลอริมิเตอร์ (calorimeter) ค่าความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญของ ถ่านหินเพราะราคาถ่านหินขึ้นกับค่าความร้อน ส่วนประกอบของถ่านหินที่ทำให้ถ่านหินมีค่า ความร้อนมากคือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและกำมะถัน

• ความสามารถในการถูกบด

ถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนมักอยู่ในสภาพบดละเอียดเพื่อพ่นเข้าเตาเผาเพื่อเผา ใหม้กับอากาศเนื่องจากการเผาไหม้สมบูรณ์ของถ่านหินที่บดละเอียดเกิดขึ้นง่ายกว่าถ่านหิน ก้อนใหญ่ แต่ถ่านหินที่โรงไฟฟ้าได้รับเป็นถ่านหินก้อนใหญ่ซึ่งต้องผ่านการบดละเอียดก่อน นำไปเผาไหม้ได้ ดังนั้นจึงมีจำเป็นต้องทราบว่าถ่านหินบดละเอียดง่ายเพียงใด และต้องใช้ พลังงานเท่าไรในการบดถ่านหิน ความสามารถในการถูกบด (grindability) เป็นดรรชนีที่ บ่งบอกความยากง่ายของถ่านหิน ความสามารถในการถูกบด (grindability) เป็นดรรชนีที่ บ่งบอกความยากง่ายของถ่านหินในการถูกบดให้เป็นผง อุปกรณ์ทดสอบความสามารถใน การถูกบดที่นิยมใช้คือ เครื่องฮาร์ดโกรฟ (Hardgrove machine) ซึ่งเป็นเครื่องบดถ่านหิน ขนาดเล็ก ผลการทดสอบคือ ดรรชนีฮาร์ดโกรฟ (Hardgrove index) ตัวเลขดรรชนีสูงหมาย ถึงถ่านหินที่บดง่าย ปริมาณความชื้นและเถ้ามีผลต่อความสามารถในการถูกบดของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีความชื้นและเถ้ามากจะบดยาก

• ความสามารถในการทำให้สึกกร่อน

เครื่องบดถ่านหินอาจสึกกร่อนจากการเสียดสีของถ่านหินเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง ดรรชนี ฮาร์ดโกรฟบ่งบอกความง่ายในการบดถ่านหินแต่ไม่ได้บอกว่าถ่านหินจะทำให้เครื่องบด สึกกร่อนได้ยากหรือง่ายเพียงใด วิธีการทดสอบความสามารถในการทำให้สึกกร่อน (abrasiveness) ของถ่านหินคือ การใช้เครื่องบดซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) บด ถ่านหินในช่วงเวลาที่กำหนด มวลของเครื่องบดหลังการทดสอบจะน้อยกว่าก่อนการทดสอบ มวลที่ลดลงเกิดการสึกกร่อนโดยถ่านหินและมวลที่ลดลงนี้ใช้กำหนดดรรชนีการทำให้สึก กร่อนของถ่านหิน

การพองตัว

ถ่านหินบางชนิดจะรวมตัวกันเป็นก้อนขณะเผาไหม้ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ ทำให้ ต้องเขย่าถ่านหินให้มันแตกตัว ถ่านหินชนิดนี้จะมีดรรชนีการพองตัว (swelling index) สูง ในทางตรงข้ามถ่านหินที่มีดรรชนีการพองตัวต่ำจะเผาไหม้ง่ายกว่าเนื่องจากมันจะแตกตัว ขณะเผาไหม้ ถ่านหินชนิดนี้สามารถเผาไหม้บนตะแกรงนิ่ง (stationary grate) ได้ การหา ดรรชนีการพองตัวกระทำโดยให้ความร้อนในสภาวะไร้อากาศแก่ตัวอย่างถ่านหินที่ต้องการ ทดสอบจนมีอุณหภูมิประมาณ 800°C จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลง รูปทรงของถ่านโค้กที่ ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับรูปทรงมาตรฐานของถ่านหินที่มีดรรชนีการพองตัวระหว่าง 1 ถึง 9 เพื่อกำหนดค่าดรรชนีการพองตัวของถ่านหินที่ทดสอบ ในกรณีที่ถ่านโค้กไม่จับตัวกันเป็น ก้อนแต่แตกตัวเป็นผง ดรรชนีการพองตัวเท่ากับ 0 สมบัติการพองตัวของถ่านหินมีความ สำคัญในกรณีที่อุปกรณ์เผาไหม้ถ่านหินเป็นแบบที่เผาไหม้ถ่านหินบนตะแกรง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันอุปกรณ์เผาไหม้ถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นแบบที่พ่นผงถ่านหินเข้าใน เตาเผา สมบัติการพองตัวของถ่านหินจึงไม่มีความสำคัญในโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่

3.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลหมายถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือพืชพลังงานที่ปลูกขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ เป็นเชื้อเพลิง ในประเทศไทยเชื้อเพลิงชีวมวลเกือบทั้งหมดเป็นอย่างแรก พืชเศรษฐกิจหลายชนิดใน ประเทศไทยเช่น ข้าว อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง มีการเพาะปลูกในปริมาณมากจึงมีเศษวัสดุ เหลือทิ้งเป็น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด และเหง้ามันสำปะหลัง ในปริมาณมากเช่นกัน ในอดีตวัสดุ เหล่านี้นิยมนำไปผลิตปุ๋ยหรือนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า แต่ก็มีปริมาณไม่น้อยที่ถูกกำจัดโดยการ เผาทิ้ง ในปัจจุบันได้มีความตระหนักว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้มีศักยภาพที่จะเป็นเชื้อ เพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้ถ้ามูลค่าของวัสดุในฐานะเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าสูงเมื่อเทียบการ ใช้ประโยชน์ในด้านอื่น

เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีเมื่อเทียบกับถ่านหินคือ ราคาถูกและมีกำมะถันน้อย สมบัติที่สำคัญ ของเชื้อเพลิงชีวมวลคือ ค่าความร้อนซึ่งต่ำกว่าถ่านหินมาก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลมี ค่าความร้อนต่ำคือ ความชื้น ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่สำคัญใน ประเทศไทย

เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความร้อนต่ำจึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลปริมาณมากเพื่อ ผลิตไฟฟ้า ความยุ่งยากในการรวบรวมวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งของการ

	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอน	ค่าความร้อน
	(%)	(%)	(%)	(%)	(kJ/kg)
แกลบ	12.00	12.65	56.46	18.88	14,755
ฟางข้าว	10.00	10.39	60.70	18.90	13,650
ชานอ้อย	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243
ซังข้าวโพด	40.00	0.90	45.42	13.68	11,298

ตารางที่ 3.2: คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่สำคัญ

ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตไฟฟ้า นี่เป็นเหตุผลสำคัญที่โรงไฟฟ้าชีวมวลมักมีขนาดเล็กและ ตั้งอยู่ใกล้โรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ตัวอย่างโรงไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงมักอยู่ ภายในโรงสีข้าว และโรงไฟฟ้าที่ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงมักอยู่ภายในโรงงานน้ำตาล

3.2 เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในโรงไฟฟ้ามีที่มาจากน้ำมันดิบซึ่งเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดจากซากสัตว์ ทะเลโบราณ ส่วนประกอบโดยประมาณของน้ำมันดิบคือ C 84% ถึง 89%, H 12% ถึง 14%, O 2% ถึง 3%, N 0% ถึง 1% และ S 0% ถึง 3% โดยสัดส่วนจะเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่มาของ น้ำมันดิบ กระบวนการที่ใช้กลั่นน้ำมันดิบคือ กระบวนการกลั่นแบบแยกส่วน (fractional distillation process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยจุดเดือดที่ต่างกันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ใน น้ำมันดิบ กระบวนการกลั่นดังกล่าวและกระบวนการทางเคมีหลังการกลั่นจะทำให้ได้ผลผลิตเป็น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquidified petroleum gas หรือ LPG) น้ำมันเบนซิน (gasoline) น้ำมันก๊าด (kerosene) น้ำมันดีเซล (diesel) และน้ำมันเตา (fuel oil) ตามลำดับจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น เชื้อเพลิง เหลวที่สำคัญต่อโรงไฟฟ้าคือ น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล

3.2.1 น้ำมันเตา

ในบรรดาผลผลิตที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ น้ำมันเตานับว่าเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับโรง ไฟฟ้าเนื่องจากมีราคาถูกกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ และค่าความร้อนของน้ำมันเตาอยู่ระหว่าง 40705 ถึง 45520 kJ/kg โดยประมาณซึ่งนับว่าไม่ต่ำเกินไปนัก น้ำมันเตาแบ่งเป็นน้ำมันเตาเบอร์ 1, เบอร์ 2, เบอร์ 4, เบอร์ 5 และเบอร์ 6 (น้ำมันเตาเบอร์ 3 เลิกใช้แล้ว) โดยมีจุดเดือดและความหนืดที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ

ถ้าเปรียบเทียบกับถ่านหิน น้ำมันเตาเผาไหม้ง่ายกว่า อุปกรณ์เผาไหม้น้ำมันเตาจึงมีความซับ ซ้อนน้อยกว่าอุปกรณ์เผาไหม้ถ่านหิน อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบราคาเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยค่า ความร้อน จะพบว่าน้ำมันเตามีราคาแพงกว่าถ่านหิน

3.2.2 น้ำมันดีเซล

น้ำมันดีเซลนอกจากจะเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับยานยนต์นานาชนิดแล้วยังเป็นเชื้อเพลิงสำหรับ ผลิต ไฟฟ้า ด้วย น้ำมันดีเซลมี ค่า ความ ร้อนสูง กว่า และ มี ราคา แพง กว่า น้ำมันเตา จึง ไม่นิยม ใช้ ใน โรง ไฟฟ้า พลัง ความ ร้อนซึ่ง เป็น ต้อง เดิน เครื่อง ตลอด เวลา เครื่องยนต์ ดีเซล สำหรับ ผลิต ไฟฟ้า เป็น เครื่องยนต์ เผา ไหม้ ภายในที่มีขนาด ใหญ่ และ อยู่ กับ ที่ โรง ไฟฟ้าดีเซล ถูกออกแบบ ให้ เดินเครื่อง เป็น ครั้งคราวในสถานการณ์ที่ความต้องการไฟฟ้าของระบบสูงกว่าความสามารถของโรงไฟฟ้าดีซลยัง ร้อน นอกจากนี้โรงไฟฟ้าดีเซลยังเป็นตัวเลือกหลักในสถานที่ที่สายส่งไฟฟ้าไปไม่ถึง โรงไฟฟ้าดีซลยัง มีประโยชน์ในสภาวะฉุกเฉินที่โรงไฟฟ้าประเภทอื่นไม่สามารถทำงาน

3.2.3 สมบัติของเชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลวมีราคาแพงกว่าเชื้อเพลิงแข็งเนื่องจากใช้พื้นที่เก็บน้อยกว่า สะดวกต่อการขนส่ง และมีค่าความร้อนสูงกว่า อย่างไรก็ตามราคาของเชื้อเพลิงเหลวอาจไม่ได้ขึ้นกับค่าความร้อนเพียง อย่างเดียว สมบัติอื่นที่สำคัญของเชื้อเพลิงเหลวที่บ่งบอกถึงคุณภาพและส่งผลต่อราคาได้แก่

ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของเชื้อเพลิงเหลวคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเหลวกับความหนาแน่นของน้ำ

การแสดงค่าความถ่วงจำเพาะอาจแสดงได้โดยใช้มาตรฐาน API (American Petroleum Institute) ซึ่งมีหน่วยเป็น °API ความสัมพันธ์ระหว่าง *s* และ °API เป็นดังนี้

$$s = \frac{141.5}{131.5 + \circ \mathsf{AP}}$$

ความหนืด

ความหน็ด (viscosity) เป็นสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงเหลว ถ้าเชื้อเพลิงเหลวมีความหนืด สูงเกินไปมันจะแตกตัวเป็นละอองยากและจะไม่สามารถเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ในการวัด ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM Standard D445 ซึ่งใช้หน่วยวัดความหนืดเป็นเซนติสโต๊ก (centistoke) จะทำการจับเวลาที่ของไหลปริมาตรหนึ่งไหลด้วยน้ำหนักตัวเองผ่านเครื่องมือ วัดความหนืด (viscometer) ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ ความหนืดของเชื้อเพลิงเหลว เป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดว่าควรจะอุ่นเชื้อเพลิงเหลวจนมีอุณหภูมิเท่าไรจึงจะทำให้เชื้อเพลิง เหลวไหลอย่างสะดวก โดยทั่วไปเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีความหนืดสูง ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีความหนืดต่ำและจะเผาไหม้ง่ายกว่า

3.3. เชื้อเพลิงก๊าซ

• จุดไหล

จุดไหล (pour point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวจะไหลได้ ประเทศไทยมีอากาศร้อน จึงไม่มีปัญหาเรื่องเชื้อเพลิงเหลวไหลยาก แต่ในประเทศที่มีอากาศหนาวจุดไหลเป็นสมบัติ ของเชื้อเพลิงเหลวที่สำคัญเพราะถ้าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวต่ำกว่าจุดไหล เชื้อเพลิงเหลว จะไหลยากซึ่งอาจส่งผลให้ระบบส่งเชื้อเพลิงเหลวอุดตัน ในกรณีนี้ถังเก็บเชื้อเพลิงเหลวจึง จำเป็นต้องมีเครื่องอุ่นติดตั้งอยู่ด้วยเพื่อรักษาอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวให้สูงกว่าจุดไหล

• จุดวาบไฟ

เชื้อเพลิงเหลวระเหยอยู่ตลอดเวลา การระเหยที่อุณหภูมิห้องเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จึงไม่เป็น ปัญหา แต่ถ้าเชื้อเพลิงเหลวได้รับความร้อนมากขึ้นการระเหยก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนใน ที่สุดอัตราส่วนของไอระเหยจากเชื้อเพลิงเหลวและอากาศจะมีค่าเหมาะสมต่อการเผาไหม้ จุดวาบไฟ (flash point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่มีไอระเหยจากจากผิวเชื้อเพลิงเหลวในปริมาณ ที่ทำให้เกิดการติดไฟเมื่อสัมผัสกับเปลวไฟ เชื้อเพลิงเหลวที่มีจุดวาบไฟต่ำต้องได้รับการดูแล เป็นพิเศษ การทราบค่าจุดวาบไฟทำให้ทราบว่าควรอุ่นเชื้อเพลิงเหลวให้ร้อนได้ถึงระดับใด เพื่อลดความหนืด อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ควรจะต่ำกว่าจุดวาบไฟประมาณ 4oC ถึง 5°C เพื่อความปลอดภัย

• กำมะถัน

ปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงเหลวขึ้นอยู่กับที่มาของเชื้อเพลิงเหลว น้ำมันเตาเบอร์ 6 อาจมี กำมะถันน้อยกว่า 1% หรือมากถึง 3-4% ก็ได้ น้ำมันเตาที่มีกำมะถันมากเกิน 2% จะต้องผ่าน กระบวนการลดกำมะถันก่อนนำมาใช้งาน เพราะการเผาไหม้กำมะถันจะทำให้เกิด SO₂ ซึ่ง จะกลายเป็นกรดซัลฟูริกเมื่อผสมกับน้ำ กรดชนิดนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

• ตะกอนและน้ำ

ตะกอนและน้ำเป็นสิ่งแปลกปลอมที่อันตรายในระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว สาเหตุของการมี ตะกอนและน้ำปนในเชื้อเพลิงเหลวได้แก่ การรั่วของถังเก็บหรือท่อส่งเชื้อเพลิงเหลว ปฏิกิริยา เคมี การให้ความร้อนถังมากเกินไป การควบแน่นของน้ำ เป็นต้น ผลกระทบเชิงลบของ ตะกอนและน้ำคือ (1) การหยุดทำงานของหม้อไอน้ำอันเนื่องจากหัวเผาอุดตัน (2) การเผา ใหม้ที่ผิดพลาดและไม่มีเสถียรภาพ และ (3) การสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อ ป้องกันปัญหาเหล่านี้ ควรมีการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวจากก้นถังเก็บเป็นระยะ ๆ เพื่อ ตรวจดูว่ามีตะกอนและน้ำมากเกินไปหรือไม่และแก้ไขให้เป็นปกติ

3.3 เชื้อเพลิงก๊าซ

เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น เชื้อเพลิงก๊าซมีข้อได้เปรียบคือมันอยู่ในสภาพที่พร้อม เผาไหม้แล้ว ไม่ต้องผ่านกระบวนการบดละเอียดเหมือนถ่านหินหรือกระบวนการทำให้เป็นละออง เหมือนเชื้อเพลิงเหลว นอกจากนี้เชื้อเพลิงก๊าซยังมีสิ่งเจือปนต่ำกว่าเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จึงทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศน้อยกว่า เชื้อเพลิงก๊าซที่ใช้ในโรงไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสามประเภทคือ ก๊าซธรรมชาติ (natural gas) ก๊าซสังเคราะห์ (synthetic gas) และก๊าซชีวภาพ (biogas)

3.3.1 ก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีที่มาจากซากพืชดึกดำบรรพ์และพบในบริเวณที่มีถ่านหิน หรือน้ำมันดิบ ส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติคือ ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซไฮโดรคาร์บอน อื่น ๆ นอกจากนี้อาจมีก๊าซที่ไม่เผาไหม้เช่น CO₂ ก๊าซธรรมชาติที่พบในแหล่งก๊าซมีสัดส่วนของมีเทน น้อยเกินไปและอาจมีสารที่เป็นพิษเช่น ปรอทและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) จึงต้องมีกระบวนการ แยกก๊าซเพื่อผลิตก๊าซธรรมชาติที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมซึ่งจะส่งไปยังโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ทางท่อส่งก๊าซ นอกจากนี้กระบวนการ แยกก๊าซยังผลิตผลพลอยได้อื่น ๆ ที่นำไปเป็นวัตถุดิบใน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี

กระบวนการแยกก๊าซเริ่มต้นด้วยการกำจัดสารเจือปนที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนออกจากก๊าซธรรม ชาติ หน่วยกำจัดสารเจือปนได้แก่ หน่วยกำจัด CO₂ หน่วยกำจัดความชื้น และหน่วยกำจัดปรอท ก๊าซ ธรรมชาติที่ได้จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์ลดความดันซึ่งจะทำให้ความดันและอุณหภูมิของก๊าซธรรมชาติ ลดลงจนกลายเป็นของเหลว การแยกสารไฮโดรคาร์บอนในของเหลวอาศัยจุดเดือดที่ต่างกันของ สารไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดซึ่งคล้ายกับการกลั่นน้ำมันดิบแบบแยกส่วน ผลผลิตที่ได้ประกอบด้วย มีเทน, อีเทน, โพรเพน, บิวเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ

ถึงแม้ว่าก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจะมีส่วนประกอบหลัก เป็นมีเทน แต่กระบวนการแยกก๊าซไม่ได้ผลิตก๊าซมีเทน 100% และยังคงมีก๊าซอื่น ๆ ปะปนในก๊าซ ธรรมชาติอยู่ ดังนั้นจึงต้องการวิเคราะห์ก๊าซธรรมชาติซึ่งก็คือ การหาสัดส่วนโดยโมลของก๊าซส่วน ประกอบ ก๊าซส่วนประกอบมีสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซในอุดมคติ (ideal gas) สัดส่วนโดยโมลจึงเท่ากับ สัดส่วนโดยปริมาตร ดังนั้น

$$y_i = \frac{M_i}{M} = \frac{V_i}{V}$$

โดยที่ M_i และ V_i เป็นจำนวนโมลและปริมาตรของก๊าซ i ในเชื้อเพลิงก๊าซและ M และ V เป็นจำ นวนโมลและปริมาตรรวมของเชื้อเพลิงก๊าซ ส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติขึ้นกับแหล่งที่มา ก๊าซ ธรรมชาติจากแหล่งต่างกันจึงอาจมีราคาไม่เท่ากัน ค่าความร้อนเป็นสิ่งที่กำหนดราคาของก๊าซซึ่งซื้อ ขายเป็น ล้านบาทต่อ MBtu (1 Btu = 1.055 kJ)

3.3.2 ก๊าซสังเคราะห์

นอกเหนือจากก๊าซธรรมชาติแล้วเชื้อเพลิงก๊าซที่ใช้ในโรงไฟฟ้าอาจได้มาจากการผลิตก๊าซจาก ถ่านหิน (coal gasification) ก๊าซที่ผลิตขึ้นได้แก่ ก๊าซเตาถ่านโค้ก (coke-oven gas) ก๊าซผลผลิต (producer gas) ก๊าซน้ำ (water gas) ก๊าซธรรมชาติสังเคราะห์ (synthetic natural gas หรือ SNG) กระบวนการผลิตก๊าซผลผลิต เริ่มต้นจากการให้ความร้อนถ่านหินเพื่อไล่สารระเหยและความชื้นออก

3.3. เชื้อเพลิงก๊าซ

ไปจนเหลือแต่ถ่านโค้ก (coke) ซึ่งมีเพียงคาร์บอนและเถ้าเป็นองค์ประกอบ

้สารระเหยที่ได้ประกอบด้วย H₂ และ CH₄ เป็นส่วนใหญ่เรียกว่าก๊าซเตาถ่านโค้ก จากนั้นถ่านโค้กจะ ทำปฏิกิริยาให้ความร้อน (exothermic) กับอากาศในภาวะที่มีอากาศน้อยทำให้ได้ก๊าซผลผลิตตาม สมการ

ถ่านโค้ก + อากาศ \longrightarrow CO + N₂ + ความร้อน

ก๊าซผลผลิตประกอบด้วย CO และ N₂ ค่าความร้อนของก๊าซผลผลิตมาจาก CO ซึ่งเผาไหม้กับอากาศ ได้

ถ้าถ่านโค้กทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะได้ก๊าซน้ำซึ่งประกอบไปด้วย CO และ H₂ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เป็นปฏิกิริยารับความร้อน (endothermic)

ถ่านโค้ก + ไอน้ำ + ความร้อน
$$\longrightarrow {\sf CO} + {\sf H}_2$$

การผลิตก๊าซผลผลิตและก๊าซน้ำสลับกันจะทำให้อุณหภูมิของแผงถ่านหินไม่สูงเกินไป

การผลิต SNG กระทำได้โดยการกำจัด N₂ ออกจากก๊าซผลผลิตและให้ CO ที่เหลือทำปฏิกิริยา กับไอน้ำ

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$$

SNG มีค่าความร้อนต่ำกว่าก๊าซธรรมชาติ การเพิ่มค่าความร้อนของ SNG สามารถกระทำได้โดยให้ H₂ ทำปฏิกิริยากับ CO ซึ่งจะทำให้ได้ CH₄ เป็นผลผลิต

 $\mathrm{CO} + 3\mathrm{H}_2 \longrightarrow \mathrm{CH}_4 + \mathrm{H}_2\mathrm{O}$

ปฏิกิริยานี้ต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

3.3.3 ก้าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (biogas) ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียและอุณหภูมิที่เหมาะสม สารอินทรีย์ประกอบด้วยธาตุ 5 ธาตุ ได้แก่ C, H, O, N และ S และมักพบในสภาพเปียก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายโมเลกุล ของสารอินทรีย์ที่มีสูตรเคมี C_aH_bO_cN_eS_e เป็นดังนี้

$$C_{a}H_{b}O_{c}N_{d}S_{e} + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}\right)H_{2}O \longrightarrow \\ \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{2} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right)CH_{4} + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}\right)CO_{2}$$

สมการเคมีนี้แสดงให้เห็นว่า ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยมีเทนและก๊าซอื่นที่ไม่เผาไหม้อีกสามชนิด สัดส่วนของมีเทนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มสัดส่วน ของมีเทนทำได้โดยเลือกสารอินทรีย์ที่มีสัดส่วนของคาร์บอนสูงและกำจัด CO₂, NH₃ และ H₂S ออก จากก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพควรผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งที่มีสัดส่วนของสารอินทรีย์มาก ตัวอย่างของวัสดุเหลือทิ้งที่ มี คุณสมบัติ นี้ ได้แก่ มูล สัตว์ จาก ฟาร์ม เลี้ยง สัตว์ และ น้ำ เสีย จาก โรงงาน อุตสาหกรรม การ เกษตร นอกจากนี้ขยะ จาก ครัว เรือนซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ก็สามารถ ใช้ผลิตก๊าซ ชีวภาพได้เช่นกัน การประเมินความเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุเหลือทิ้งมักใช้ค่า BOD (biochemical oxygen demand) หรือ COD (chemical oxygen demand) ของวัสดุเหลือทิ้งนั้น ค่า BOD และ COD สูงหมายถึงศักยภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีสัดส่วนสารอินทรีย์มาก

3.4 การใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

ประเทศไทยมีการสำรวจแหล่งพลังงานตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 7 โดยพบว่ามีแหล่งถ่านหินลิกไนต์ ขนาดใหญ่ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าของประเทศสูงขึ้นตาม ความเจริญของประเทศ ได้มีการสำรวจแหล่งพลังงานอย่างต่อเนื่องและพบว่าประเทศไทยมีแหล่ง น้ำมันดิบเพียงเล็กน้อย แต่มีแหล่งก๊าซธรรมชาติปริมาณมากในอ่าวไทย ดังนั้นโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ใน ประเทศไทยจึงควรใช้ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง แต่โรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยมี จำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนปริมาณถ่านหินที่ประเทศไทย สาเหตุคือถ่านหินในประเทศไทย เป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีกำมะถันและเถ้าสูงและก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และฝุ่นละอองปริ-มาณมากจนกลายเป็นมลภาวะทางอากาศ โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ในประเทศไทยจึงใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิง ตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่สัดส่วนการใช้ถ่านหินมีแนวโน้มลดลง

เชื้อเพลิง	พ.ศ. 2529	พ.ศ. 2539	พ.ศ. 2549	พ.ศ. 2559
โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	21.8%	8.2%	5.6%	1.8%
น้ำมันเตา	13.1%	23.9%	5.5%	0.2%
ถ่านหิน	21.8%	20.0%	17.2%	18.6%
ก๊าซธรรมชาติ	40.3%	41.5%	66.5%	63.2%
อื่น ๆ	3.0%	6.4%	5.2%	16.2%

ตารางที่ 3.3: สัดส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2529 ถึง 2559

ก๊าซธรรมชาติประมาณ 60% ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยไม่ได้มาจากแหล่งก๊าซธรรมชาติ ในประเทศทั้งหมด บางส่วนได้จากการนำเข้าจากประเทศอื่น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าจากประเทศ พม่า ดังนั้นการที่ประเทศไทยพึ่งพาก๊าซธรรมชาติมากขนาดนี้อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้าน พลังงานได้ ในความเป็นจริงเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าควรมีหลายชนิดและสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิง เหล่านั้นควรใกล้เคียงกันเพื่อที่ว่า ถ้าเชื้อเพลิงใดเชื้อเพลิงใดขาดแคลน ก็จะได้มีเชื้อเพลิงอื่นมา ทดแทนในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า

คำถามท้ายบท

- 1. เรียงลำดับถ่านหินจากเกรดดีที่สุดไปแย่ที่สุด บิทูมินัส แอนทราไซต์ ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส
- 2. ส่วนประกอบ 4 อย่างของถ่านหินที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณคืออะไร
- 3. ประเทศไทยมีถ่านหินชนิดใดมากที่สุด
- 4. เชื้อเพลิงหลักของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในประเทศไทยคืออะไร
- 5. ก๊าซใดเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ
- 6. ส่วนประกอบใดในถ่านหินทำให้ถ่านหินติดไฟง่าย
- 7. ถ่านโค้ก (coke) มีคุณสมบัติอย่างไร
- 8. การวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) คืออะไร
- 9. น้ำมันชนิดใดใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน
- 10. ประเทศไทยน้ำเข้าก๊าซธรรมชาติจากประเทศใดมากที่สุด
- 11. ก๊าซน้ำ (water gas) มีส่วนประกอบเป็นก๊าซใด
- 12. ส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ (biogas) คือก๊าซใด
- 13. ทำไมก๊าซธรรมชาติจึงปลอดภัยกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในครัวเรือน
- 14. อะไรเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย และอะไรเป็นเชื้อเพลิงหลักสำ-หรับการผลิตไฟฟ้าในโลก
- ถ่านหินก้อนหนึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) พบว่ามีความชื้น
 15% และเถ้า 5% เมื่อนำถ่านหินในสภาพที่ปราศจากความชื้นและเถ้า (dry, ash-free basis)
 ไปวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) พบว่ามี H 3% อยากทราบว่าสัดส่วนโดยมวลของ
 H ในถ่านหินในสภาพเดิม (as-received coal) เท่ากับเท่าไร

50

บทที่ 4 การเผาไหม้

4.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

การเผาไหม้คือ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนซึ่งทำให้เกิด ก๊าซเสีย (flue gas) และการแปลงพลังงานเคมีที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อน มีสาร เคมีจำนวนมากที่เป็นเชื้อเพลิงตามนิยามข้างต้นแต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อ เพลิงเหลวที่ใช้ในโรงไฟฟ้าตามที่กล่าวถึงในบทที่ 3

ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งองค์ประกอบที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ กำมะถัน สมการการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นคือ

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$
 (4.1)

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \tag{4.2}$$

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$
 (4.3)

เชื้อเพลิงก๊าซอาจประกอบด้วยก๊าซเชื้อเพลิงหลายชนิดผสมกันโดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีปฏิกิริยา การเผาไหม้ของมันเอง ตัวอย่างเช่น มีเทน (CH₄) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติมี สมการการเผาไหม้ดังนี้

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \tag{4.4}$$

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่าไม่น้อยกว่าอุณหภูมิจุดระเบิด (ignition temperature) เป็นที่น่าสังเกตว่าสมการ (4.1) ถึง (4.4) มีสิ่งหนึ่งที่เหมือนกันคือ จำนวน อะตอมของธาตุทุกธาตุไม่เปลี่ยนแปลงหลังปฏิกิริยา ซึ่งหมายความว่ามวลรวมของสารตั้งต้น (reactant) จะต้องเท่ากับมวลรวมของสารผลผลิต (product)

เนื่องจากการใช้ O₂ บริสุทธิ์ในกระบวนการเผาไหม้ต้องลงทุนสูง ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้อากาศ ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง อากาศแห้งในธรรมชาติประกอบด้วย N₂, O₂, Ar และ CO₂ ซึ่งมีน้ำหนัก ์ โมเลกุลเท่ากับ 28.0134, 31.9988, 39.9480 และ 44.0095 ตามลำดับ ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของ ้อากาศแห้งในธรรมชาติจึงเท่ากับ 28.97 แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์การเผาไหม้อาจสมมูติ ้ว่าอากาศแห้งเป็นอากาศทฤษฎี (theoretical air) ซึ่งประกอบด้วย N₂ 79% และ O₂ 21% โดยโมล และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 28.84 ดังนั้นอากาศทฤษฎี 4.76 โมลจึงประกอบด้วย N₂ 3.76 โมลและ ${
m O}_2$ 1 โมล สัดส่วนโดยมวลของ ${
m N}_2$ และ ${
m O}_2$ เท่ากับ 0.767 และ 0.233 ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า ้ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงอากาศมักมีความ^สึ้นปะปนอยู่ด้วยเสมอการวิเคราะห์การเผาไหม้โดยทั่วไป มักสมมุติว่าอากาศที่ใช้เผาไหม้กับเชื้อเพลิงเป็นอากาศแห้งเพราะความชื้นในอากาศมีปริมาณน้อย

มากและไม่ส่งผลมากนักต่อการคำนวณ ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบอากาศจริงกับอากาศทฤษภู

ก๊าซ	สัดส่วนโดยโมล (%)			
	อากาศแห้งในธรรมชาติ	อากาศทฤษฎี		
N_2	78.084	79		
O_2	20.946	21		
Ar	0.934	0		
CO_2	0.036	0		

ตารางที่ 4.1: ส่วนประกอบของอากาศจริงและอากาศทฤษภี

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สำคัญสองปฏิกิริยาคือการเผาไหม้สมบูรณ์ (complete combustion) และการเผาใหม้พอดี (stoichiometric combustion) การเผาใหม้สมบูรณ์คือการเผาใหม้ที่ไม่มีสาร ี เชื้อเพลิงเหลืออยู่เลยกล่าวคือไม่มี C, H, S หรือ CO ในก๊าซเสีย ในทางตรงข้ามการเผาไหม้ที่ให้ ก๊าซเสียที่ยังนำไปเผาไหม้ได้ต่อจัดเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) การเผา ้ ใหม้พอดีคือการเผาใหม้สมบูรณ์ที่ไม่มี O₂ เหลือซึ่งหมายความว่าปริมาณ O₂ พอดีกับปริมาณเชื้อ เพลิง ในกรณีดังกล่าวปริมาณอากาศที่ใช้เรียกว่าเป็นปริมาณอากาศพอดี (stoichiometric air) หรือ ปริมาณอากาศทฤษฎี (theoretical air) การเผาไหม้พอดีของไฮโดรคาร์บอนจะให้ผลผลิตคือ H₂O, CO2 และ N2 แต่ถ้ามีอากาศมากเกินไปก็มี O2 เหลือในผลผลิตด้วย การเผาไหม้เช่นนี้เป็นการเผา ใหม้ไม่พอดี ส[ื]่มการการเผาไหม้พอดีของไฮโดรคาร์บอน (C_mH_n) คือ

$$C_m H_n + (m + \frac{n}{4})(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O + 3.76(m + \frac{n}{4})N_2$$
 (4.5)

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเพราะผลผลิตอาจประกอบ ไฮโดรคาร์บอน เขม่า หรือ CO ซึ่งทั้งหมดสามารถเผาไหม้ได้ CO เผาไหม้ในอากาศตามสมการต่อไปนี้

$$CO + \frac{1}{2}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow CO_2 + 1.88N_2$$
 (4.6)

การมีสารไฮโดรคาร์บอน เขม่าหรือ CO เหลือจากการเผาไหม้หมาูยความว่าพลังงานเคมีในเชื้อเพลิง ไม่ได้แปลงเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด แต่บางส่วนถูกปล่อยทิ้งไปกับก๊าซเสียโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้สารไฮโดรคาร์บอน เขม่าและ CO ยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพและทำให้เกิดมลภาวะทาง อากาศอีกด้วย ปัจจัยสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์มี 4 ประการคือ (1) อากาศมีปริมาณมากพอ (2) อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าอุณหภูมิจุดระเบิด (3) การผสมกันของอากาศกับเซื้อเพลิงอย่างทั่วถึง และ (4) เวลาทำปฏิกิริยาเผาไหม้ที่มากพอ

ปริมาณอากาศพอดีขึ้นอยู่กับซนิดของเซื้อเพลิง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผสมกันอย่างทั่วถึง ของออกซิเจนในอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงมักกำหนดให้มีอากาศส่วนเกิน (excess air)

4.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี

ในการทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศที่ใช้จะต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าปริมาณพอดี อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศพอดีและเชื้อเพลิงเรียกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี (theoretical air-fuel ratio) ซึ่งมีสัญลักษณ์ AFR_T อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีอาจเป็น อัตราส่วนเชิงมวลหรืออัตราส่วนเชิงโมลก็ได้ การระบุค่า AFR_T จึงควรระบุหน่วยด้วยว่าเป็น kg_{air}/ kg_{fuel} หรือ mol_{air}/mol_{fuel} ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงมวลและอัตราส่วนเชิงโมลเป็นดังนี้

อัตราส่วนเชิงมวล
$$=rac{28.84 imes$$
อัตราส่วนเชิงโมล M_{fuel} (4.7)

โดยที่ 28.84 คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศทฤษฎีและ M_{fuel} คือน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วย C, H และ S ซึ่งเผาไหม้ในอากาศได้ ได้ดังแสดงในสมการ (4.1) ถึง (4.3) นอกจากนี้เชื้อเพลิงอาจมีส่วนประกอบของ O และ N ด้วย ดังนั้นโมเลกุลของเชื้อเพลิงอาจเขียน เป็นสูตรเคมี C_aH_bS_cO_dN_e อย่างไรก็ตามสูตรเคมีนี้ไม่ได้หมายความว่าธาตุต่าง ๆ สร้างพันธะเคมี ต่อกัน ธาตุบางธาตุเช่น C อยู่ในรูปของคาร์บอนอิสระในเชื้อเพลิงแข็ง สมการเผาไหม้พอดีของเชื้อ เพลิงเป็นดังนี้

$$C_{a}H_{b}S_{c}O_{d}N_{e} + \left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right)(O_{2} + 3.76N_{2}) \longrightarrow$$

$$aCO_{2} + \frac{b}{2}H_{2}O + cSO_{2} + \left[3.76\left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right) + \frac{e}{2}\right]N_{2}$$
(4.8)

สมการ (4.8) แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงนี้มีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีเท่ากับ

$$AFR_T = 4.76\left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right) \quad \text{mol}_{air}/\text{mol}_{fuel}$$
(4.9)

ตารางที่ 4.2 แสดง AFR_T ของเชื้อเพลิงบางชนิดที่คำนวณจากสมการ (4.9) สำหรับธาตุอื่นหรือก๊าซ อื่นที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงเช่น N, O₂ และ CO₂ ค่า AFR_T เท่ากับศูนย์

เชื้อเพลิง	AFR_T (mol _{air} /mol _{fuel})
С	4.76
Н	1.19
S	4.76
CH_4	9.52
C_2H_6	16.66
C_3H_8	23.8
СО	2.38

ตารางที่ 4.2: AFR_T ของเชื้อเพลิงบางชนิด

ในการหา AFR_T ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบหลายชนิดจะต้องทราบสัดส่วนโดยโมลของ ส่วนประกอบแต่ละชนิด สมมุติว่าเชื้อเพลิงมี k ส่วนประกอบโดยมีสัดส่วนโดยโมลเป็น y₁, y₂, ..., y_k และส่วนประกอบแต่ละชนิดมีค่า AFR_T เท่ากับ AFR_{T,1}, AFR_{T,2}, ..., AFR_{T,k} ตามลำดับ ค่า AFR_T ของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$AFR_T = y_1 AFR_{T,1} + y_2 AFR_{T,2} + \dots + y_k AFR_{T,k}$$
(4.10)

์ ตัวอย่าง คำนวณ AFR_T ของเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วย C_3H_8 40% และ C_4H_{10} 60%

วิธีทำ

กำหนดให้ C₃H₈ เป็นส่วนประกอบที่ 1 และ C₄H₁₀ เป็นส่วนประกอบที่ 2 ของเซื้อเพลิง ดังนั้น $y_1 = 0.4, y_2 = 0.6, AFR_{T,1} = 23.8, AFR_{T,2} = 30.94$

 $AFR_T = 0.4 \times 23.8 + 0.6 \times 30.94$ $= 28.1 \quad \text{mol}_{air}/\text{mol}_{fuel}$

์ ตัวอย่าง คำนวณ AFR_T เชิงโมลของเชื้อเพลิงก๊าซที่ประกอบไปด้วย CH₄ 70%, C₂H₆ 10%, C₃H₈ 10% และ CO₂ 10%

วิธีทำ

กำหนด CH₄, C₂H₆, C₃H₈ และ CO₂ เป็นส่วนประกอบที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สัดส่วนโดย โมลและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีของก๊าซแต่ละชนิดเป็นดังนี้ $y_1 = 0.7$, $y_2 = 0.1$, $y_3 = 0.1$, $y_4 = 0.1$, $AFR_{T,1} = 9.52$, $AFR_{T,2} = 16.66$, $AFR_{T,3} = 23.8$, $AFR_{T,4} = 0$ ดังนั้น

$$AFR_T = 0.7 \times 9.52 + 0.1 \times 16.66 + 0.1 \times 23.8 + 0.1 \times 0$$

4.2. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี

$$= 10.7$$
 mol_{air}/mol_{fuel}

ปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งมักวัดเป็นน้ำหนัก ดังนั้นจึงนิยมระบุ *AFR_T* เป็นอัตราส่วนเชิงมวลซึ่ง หาได้จากการแทนค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงโมลในสมการ (4.9) ในสมการ (4.7)

$$AFR_T = \frac{28.84 \times 4.76}{M_{fuel}} \left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2} \right)$$
(4.11)

เชื้อเพลิงที่มีสูตรเคมี C_aH_bS_cO_dN_e มีน้ำหนักโมเลกุลดังนี้

$$M_{fuel} = 12a + b + 32c + 16d + 14e \tag{4.12}$$

สัดส่วนโดยมวลของ C, H, S และ O ในเชื้อเพลิงแข็งในสภาพแห้งและไม่มีเถ้าคือ

$$x_{C,daf} = \frac{12a}{M_{fuel}} \tag{4.13}$$

$$x_{H,daf} = \frac{b}{M_{fuel}} \tag{4.14}$$

$$x_{S,daf} = \frac{32c}{M_{fuel}} \tag{4.15}$$

$$x_{O,daf} = \frac{16d}{M_{fuel}} \tag{4.16}$$

ถ้าทราบ $x_{C,daf}, x_{H,daf}, x_{S,daf}$ และ $x_{O,daf}$ ก็สามารถหาค่า a, b, c และ d ได้ สมการ (4.11) จะ กลายเป็น

$$AFR_T = 11.44x_{C,daf} + 34.32x_{H,daf} + 4.29x_{S,daf} - 4.29x_{O,daf} \qquad \text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \quad (4.17)$$

ค่า AFR_T ในสมการ (4.17) เป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีของเชื้อเพลิงในสภาพแห้ง และไม่มีเถ้า อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีของเชื้อเพลิงในสภาพเดิมคำนวณจาก

$$AFR_T = 11.44x_{C,ar} + 34.32x_{H,ar} + 4.29x_{S,ar} - 4.29x_{O,ar}$$
(4.18)

หรือ

$$AFR_T = (11.44x_{C,daf} + 34.32x_{H,daf} + 4.29x_{S,daf} - 4.29x_{O,daf})(1 - x_M - x_A) \quad (4.19)$$

โดยที่ x_M และ x_A คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้นและเถ้าในเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านหินก้อนหนึ่งพบว่ามีความชื้น 4% และเถ้า 5% เมื่อนำถ่านหินในสภาพที่ไม่มีความชื้นและเถ้ามาวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย ได้ผลดังนี้ C 83.1%, H 5.5%, O 7.4%, N 2.1% และ S 1.9% คำนวณ *AFR*_T ของถ่านหิน

วิธีทำ

แทนค่าสัดส่วนโดยมวลในสมการ (4.18) เพื่อหา AFR_T AFR_T = (11.44 × 0.831 + 34.32 × 0.055 + 4.29 × 0.019 − 4.29 × 0.074) × (1 − 0.04 − 0.05) = 10.2 kg_{air}/kg_{fuel}

4.3 ค่าความร้อน

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเซื้อเพลิงกับอากาศที่อุณหภูมิอ้างอิง (25°) และความดันอ้างอิง (1 atm) ในระบบปิดที่ไม่แลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมจะทำได้ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่มี อุณหภูมิเปลวไฟแอเดียแบติก (adiabatic flame temperature) ในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนออก จากระบบสู่สิ่งแวดล้อมจนทำให้อุณหภูมิของผลผลิตลดลงเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิง ปริมาณความร้อน ที่ถ่ายเทนี้เรียกว่า ค่าความร้อน (heating value) โดยทั่วไปค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะหมายถึง ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แบบพอดีของเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว 1 kg หรือของ เชื้อเพลิงก๊าซ 1 m³ การหาค่าความร้อนโดยตรงอาจใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter)

ค่าความร้อนขึ้นกับผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งอาจป็นน้ำหรือไอน้้ำก็ได้ การเผาไหม้ที่ให้ ผลผลิตเป็นน้ำให้ค่าความร้อนสูง (higher heating value) การเผาไหม้ที่ให้ผลผลิตเป็นไอน้ำให้ค่า ความร้อนต่ำ (lower heating value) ดังนั้นผลต่างระหว่างค่าความร้อนสูงกับค่าความร้อนต่ำจึง เท่ากับ ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำที่เป็นผลผลิตจากการเผาไหม้

ค่าความร้อนเป็นลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงแข็งแต่ละชนิด ถ้าทราบสัดส่วนโดยมวลของธาตุ ต่าง ๆ รวมถึงความชื้นและเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งจากการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายก็สามารถคำนวณค่า ความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งได้ ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความร้อนสูงต่อมวลของเผาไหม้ธาตุที่เผาไหม้ ได้ ธาตุ C และ S ที่อยู่ในเชื้อเพลิงทั้งหมดจะเผาไหม้และให้ค่าความร้อนตามตารางที่ 4.3 แต่ในกรณี

ตารางที่ 4.3: ค่าความร้อนสูงของ C H และ S

ธาตุ	ปฏิกิริยา	HHV (kJ/kg)
С	$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	33700
Н	$\rm H + 0.25O_2 \longrightarrow 0.5H_2O$	144200
S	$S + O_2 \longrightarrow SO_2$	9300

ของ H มีเพียงไฮโดรเจนอิสระเท่านั้นที่เผาไหม้ในขณะที่ไฮโดรเจนไม่อิสระ 1 kg รวมตัวกับ O 8 kg ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็งจึงเท่ากับ

$$HHV = 33700x_{C,daf} + 144200\left(x_{H,daf} - \frac{x_{O,daf}}{8}\right) + 9300x_{S,daf}$$
(4.20)

56

4.3. ค่าความร้อน

สูตรนี้มีชื่อว่า สูตรของดูลอง (Dulong's formula) ค่าความร้อนสูงในสมการ (4.20) เป็นของเซื้อเพลิง แข็งในสภาพที่แห้งและไม่มีเถ้า ในกรณีของเชื้อเพลิงในสภาพเดิมที่มีทั้งความชื้นและเถ้า สมการของ ค่าความร้อนสูงเป็นดังนี้

$$HHV = (33700x_{C,daf} + 144200\left(x_{H,daf} - \frac{x_{O,daf}}{8}\right) + 9300x_{S,daf})(1 - x_M - x_A)$$
(4.21)

หรือ

$$HHV = 33700x_{C,ar} + 144200\left(x_{H,ar} - \frac{x_{O,ar}}{8}\right) + 9300x_{S,ar}$$
(4.22)

ในคำนวณค่าความร้อนต่ำของเซื้อเพลิงแข็ง จะต้องทราบปริมาณน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ต่อ มวลของเซื้อเพลิง ตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ C และ S ไม่ทำให้เกิดน้ำ แต่การเผาไหม้ H จะทำให้ได้น้ำ 9 kg ต่อ 1 kg ของ H ซึ่งนับเฉพาะไฮโดรเจนอิสระ อย่างไรก็ตามเมื่อรวมน้ำที่เกิด จากการเผาไหม้ไฮโดรเจนอิสระกับน้ำที่มีพันธะกับสารอื่นซึ่งจะกลายเป็นไอน้ำจากการเผาไหม้ก็จะ พบว่าไฮโดรเจนทั้งหมดในเชื้อเพลิงทำให้เกิดน้ำซึ่งมีมวลเป็น 9 เท่าของมวลไฮโดรเจน นอกจากนี้ เชื้อเพลิงแข็งยังมีความชื้นซึ่งก็จะกลายเป็นไอหลังการเผาไหม้เช่นกัน เนื่องจากค่าความร้อนแฝงใน การกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 2442 kJ/kg ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงแข็งจึง เท่ากับ

$$LHV = HHV - 2442(9x_{H,ar} + x_M)$$
(4.23)

์ ตัวอย่าง เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วย C 70%, H 5%, O 4%, S 1%, ความชื้น 10% และเถ้า 10% หาค่าความร้อนสูงและความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง

วิธีทำ

ผลรวมของสัดส่วนโดยมวลของธาตุทั้ง 4 ธาตุ ความชื้นและเถ้าเท่ากับ 100% ดังนั้นข้อมูลที่ โจทย์ให้มาจึงเป็นสัดส่วนโดยมวลจากการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายของถ่านหินที่มีความชื้นและเถ้า กล่าว คือ $x_{C,ar} = 0.70$, $x_{H,ar} = 0.05$, $x_{O,ar} = 0.04$, $x_{S,ar} = 0.01$, $x_M = 0.10$ และ $x_A = 0.10$ ค่า ความร้อนสูงคำนวณจากสมการ (4.22)

$$HHV = 33700(0.7) + 144200(0.05 - 0.04/8) + 9300(0.01)$$

= 30172 kJ/kg

ค่าความร้อนต่ำคำนวณจากสมการ (4.23)

$$LHV = 30172 - 2440(9 \times 0.05 + 0.1)$$

= 28828 kJ/kg

สารประกอบ	ปฏิกิริยา	HHV (kJ/m ³)	HHV (kJ/kg)
CH_4	$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$	39700	55600
C_2H_6	$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	69600	52000
C_3H_8	$C_3H_8 + 5O_2 \longrightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	99100	50500
H_2	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$	12700	142200
CO	$CO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2$	12600	10100

ตารางที่ 4.4: ค่าความร้อนสูงของก๊าซบางชนิด

ในเชื้อเพลิงเหลวและเขื้อเพลิงก๊าซ ธาตุที่เผาไหม้ได้รวมตัวเป็นสารประกอบกับธาตุอื่น โดยมัก อยู่ในรูปของ C_mH_n ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลวและ C_mH_n, CO และ H₂ ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ สารประกอบเหล่านี้มีปฏิกิริยาการเผาไหม้และค่าความร้อนตามตารางที่ 4.4

ถ้าเชื้อเพลิงก๊าซปร[ิ]ะกอบด้วยก๊าซ k ชนิด สัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเหล่านี้คือ y₁, y₂, ..., y_k และก๊าซแต่ละชนิดมีค่าความร้อนสูงต่อปริมาตรเท่ากับ HHV₁, HHV₂, ..., HHV_k ค่าความร้อน สูงต่อปริมาตรของเซื้อเพลิงก๊าซสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$HHV = y_1 HHV_1 + y_2 HHV_2 + \dots + y_k HHV_k$$
(4.24)

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด จะเห็นว่าเชื้อเพลิงทุก ชนิดยกเว้น CO ให้น้ำเป็นผลผลิต ถ้ากำหนดให้ V_i เป็นปริมาตรของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อ เพลิง *i* 1 m³ ปริมาตรรวมของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ 1 m³ ที่ประกอบด้วยก๊าซ *k* ชนิดที่เผาไหม้ได้มีค่าดังนี้

$$V = y_1 V_1 + y_2 V_2 + \dots + y_k V_k \tag{4.25}$$

้ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1962 kJ/m³ ดังนั้นค่าความร้อน ต่ำของเชื้อเพลิงก๊าซ

$$LHV = HHV - 1962V \tag{4.26}$$

ตัวอย่าง] เชื้อเพลิงก๊าซประกอบด้วย CH₄ 80%, H₂ 15% และ CO 5% หาค่าความร้อนสูงและ ความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง

วิธีทำ

ค่าความร้อนสูงคำนวณจากสมการ (4.24) และตารางที่ 4.4

$$HHV = 39700(0.8) + 12700(0.15) + 12600(0.05)$$

 $= 34295 \; \mathrm{kJ/m^3}$

ปริมาณน้ำเกิดจากการเผาใหม้เชื้อเพลิง 1 m³ ได้จากสมการ (4.26) และตารางที่ 4.4

$$V = 2 \times 0.8 + 1 \times 0.15$$
$$= 1.75 \text{ m}^3$$

ค่าความร้อนต่ำคำนวณจากสมการ (4.27)

 $LHV = 34295 - 1960 \times 1.75$ = 30865 kJ/m³

4.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง

การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต้องใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ก๊าซเสียซึ่งมี วิธีวิเคราะห์ 2 วิธี วิธีแรกใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในก๊าซเสีย โดยสามารถอ่านค่า ปริมาณก๊าซจากเซ็นเซอร์ได้ทันทีแต่เซ็นเซอร์แต่ละตัวสามารถวัดปริมาณก๊าซได้เพียงหนึ่งหรือสอง ชนิดเท่านั้น วิธีที่สองจะเก็บตัวอย่างก๊าซเสียมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ วิธีที่สองไม่ให้ค่าปริมาณ ก๊าซส่วนประกอบทันทีเหมือนวิธีแรกแต่สามารถหาปริมาณก๊าซหลายชนิด อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ ก๊าซเสียด้วยวิธีที่สองที่ได้รับความนิยมคือ อุปกรณ์ออร์แสต (Orsat apparatus) เพราะมีราคาไม่ แพง ง่ายต่อการใช้ และเคลื่อนย้ายง่าย อุปกรณ์ออร์แสตใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สำหรับ ดูดกลืนก๊าซ CO₂ ไพโรแกลลอล (pyrogallol) สำหรับดูดกลืนก๊าซ O₂ และคูพรัสคลอไรด์ (CuCl₂) สำหรับดูดกลืนก๊าซ CO การดูดกลืนก๊าซแต่ละชนิดทำให้ปริมาตรของก๊าซลดลง ดังนั้นสัดส่วนโดย ปริมาตรของก๊าซแต่ละชนิดจึงคำนวณได้และใช้หาสัดส่วนโดยปริมาตรของ N₂ ดังนี้

$$y_{N_2} = 1 - y_{CO_2} - y_{CO} - y_{O_2} \tag{4.27}$$

เมื่อทราบสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซส่วนประกอบในก๊าซเสียแล้วก็สามารถหาอัตราส่วนอากาศต่อ เซื้อเพลิงจริง (AFR_A) ได้โดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในสองวิธีต่อไปนี้

4.4.1 วิธีที่หนึ่ง

วิธีนี้ให้ค่า AFR_A ซึ่งอัตราส่วนโดยมวลจึงเหมาะกับเชื้อเพลิงแข็ง เริ่มต้นจากนิยามของ AFR_A

AFR_A = มวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้
มวลเชื้อเพลิง
=
$$rac{1}{0.767} \left(rac{$$
มวลของ N₂ ในอากาศที่ใช้เผาไหม้
มวลเซื้อเพลิง

บทที่ 4. การเผาใหม้

$$= \frac{1}{0.767} \left(\frac{\text{JIRTNERSE - JIRTNERSE - JIRTNERSE N_2 luteration}}{\text{JIRTNERSE N_2 luteration}} \right)$$
$$= \frac{1}{0.767} \left(\frac{28(\text{-lutrulianes N_2 luteration})}{\text{JIRTNERSE N_2 luteration}} - x_N \right)$$
(4.28)

คาร์บอนที่เผาไหม้จะกลายเป็น CO หรือ CO₂ ในก๊าซเสีย กำหนดให้ x_{Cb} เป็นสัดส่วนโดยมวลของ C ที่เผาไหม้ต่อ 1 kg ของเชื้อเพลิง ดังนั้น

แทนค่ามวลเชื้อเพลิงจากสมการ (4.29) ในสมการ (4.28) ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left(\frac{28x_{Cb}y_{N_2}}{12(y_{CO} + y_{CO_2})} - x_N \right)$$
(4.30)

x_{Cb} มีค่าเกือบเท่ากับ x_C สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งมักก่อให้เกิดคาร์บอน ที่ไม่เผาไหม้ซึ่งอาจเป็นเพราะเชื้อเพลิงไม่ได้สัมผัสกับอากาศอย่างทั่วถึงหรือเวลาในการเผาไหม้ น้อยเกินไป ในบางครั้งการหาค่า x_{Cb} จะต้องใช้วิธีทางอ้อมเพราะการวัดโดยตรงค่อนข้างยาก โดย ทั่วไปสิ่งที่ทราบเกี่ยวกับเชื้อเพลิงแข็งคือสัดส่วนโดยมวลของเถ้า (x_A) ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่เป็น ของแข็งเรียกว่าขี้เถ้า (bottom ash) ซึ่งจะประกอบด้วยคาร์บอนผสมกับเถ้า ถ้านำขี้เถ้าไปวิเคราะห์ก็ จะทราบสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอน (x_{Ca}) ในขี้เถ้า ข้อมูลเหล่านี้ใช้หาค่า x_{Cb}

ด้งนั้น

$$x_{Cb} = x_C - \frac{x_{Ca} x_A}{(1 - x_{Ca})} \tag{4.31}$$

60

ตัวอย่าง ถ่านหินลิกไนต์แห้งและไม่มีเถ้ามีสัดส่วนโดยมวลของธาตุต่าง ๆ ดังนี้ C 81%, H 7%, O 10%, S 1% และ N 1% ถ่านหินในสภาพเดิมมีความชื้น 25% และเถ้า 10% เมื่อเผาไหม้ถ่านหิน กับอากาศ พบว่าได้ก๊าซเสียแห้งซึ่งประกอบด้วย CO₂ 14.49%, O₂ 3.81%, SO₂ 0.07% และ CO 0.22% นอกจากนี้พบว่าขี้เถ้าประกอบด้วยคาร์บอน 5% จงคำนวณหา *AFR*_A

2วิธีทำ โจทย์ให้ $x_{C,daf}$ และ $x_{N,daf}$ ซึ่งสามารถแปลงเป็น x_C และ X_N หรือสัดส่วนโดยมวล ของคาร์บอนและในโตรเจนในสภาพเดิมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_{C} &= x_{C,daf}(1 - x_{M} - x_{A}) \\ &= 0.527 \\ x_{N} &= x_{N,daf}(1 - x_{M} - x_{A}) \\ &= 0.007 \end{aligned}$$

้สัดส่วนโดยมวล N₂ ในก๊าซเสียแห้งหาได้ดังนี้

$$y_{N_2} = 1 - y_{CO_2} - y_{O_2} - y_{SO_2} - y_{CO}$$

= 0.8141

ต่อไปเป็นการหา x_{Cb}

$$x_{Cb} = 0.53 - \frac{0.05 \times 0.1}{(1 - 0.05)}$$
$$= 0.521$$

ดังนั้น

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left(\frac{28 \times 0.521 \times 0.8141}{12(0.0022 + 0.1449)} - 0.007 \right)$$
$$= 8.76 \quad \text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

4.4.2 วิธีที่สอง

วิธีนี้ใช้กับเชื้อเพลิงที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ วิธีนี้จึงเหมาะสมกับเชื้อเพลิงก๊าซ สมมุติ ว่าเชื้อเพลิงมีสูตรเคมี C_aH_bS_cO_d สมการเผาไหม้พอดีของเชื้อเพลิงนี้ดัดแปลงจากสมการ (4.8)

$$C_{a}H_{b}S_{c}O_{d} + \left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right)(O_{2} + 3.76N_{2}) \longrightarrow$$

$$aCO_{2} + \frac{b}{2}H_{2}O + cSO_{2} + 3.76\left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right)N_{2}$$
(4.32)

ในการเผาไหม้จริงจะมีปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณอากาศพอดีซึ่งทำให้มี O₂ ในก๊าซเสีย นอกจากนี้การเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ซึ่งทำให้มี CO ในก๊าซเสียด้วย สมการเผาไหม้จริงจึงอาจเขียน ได้ดังนี้

$$C_{a}H_{b}S_{c}O_{d} + \alpha \left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right)(O_{2} + 3.76N_{2}) \longrightarrow (a - \beta)CO_{2} + \beta CO + \frac{b}{2}H_{2}O + cSO_{2} + \left[(\alpha - 1)\left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right) + \frac{\beta}{2}\right]O_{2} + 3.76\alpha \left(a + \frac{b}{4} + c - \frac{d}{2}\right)N_{2}$$

$$(4.33)$$

lpha คือ อัตราส่วนอากาศ (air ratio) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง AFR_A กับ AFR_T สัดส่วนโดย โมลของ O₂, CO และ N₂ ในก๊าซเสียได้จากสมการ (4.33)

$$y_{O_2} = \frac{(\alpha - 1)(a + b/4 + c - d/2) + \beta/2}{N_{total}}$$
(4.34)

$$y_{CO} = \frac{\beta}{N_{total}} \tag{4.35}$$

$$y_{N_2} = \frac{3.76\alpha(a+b/4+c-d/2)}{N_{total}}$$
(4.36)

โดย N_{total} เท่ากับจำนวนโมลของก๊าซเสีย กำจัด eta และ ออกจากสมการ (4.34) และ (4.35)

$$y_{O_2} - \frac{1}{2}y_{CO} = \frac{(\alpha - 1)(a + b/4 + c - d/2)}{N_{total}}$$
(4.37)

หารสมการ (4.36) ด้วยสมการ (4.37)

$$\frac{y_{N_2}}{y_{O_2} - 0.5y_{CO}} = \frac{3.76\alpha}{(\alpha - 1)}$$

แก้สมการหา α

$$\alpha = \frac{y_{N_2}}{y_{N_2} - 3.76(y_{O_2} - 0.5y_{CO})} \tag{4.38}$$

หลังจากได้ค่า α แล้ว AFR_A คำนวณได้จาก

$$AFR_A = \alpha AFR_T \tag{4.39}$$

ตัวอย่าง C₃H₈ เผาไหม้ในอากาศแล้วได้ก๊าซเสียแห้งซึ่งมีสัดส่วนโดยปริมาตรของ CO₂, O₂ และ CO เท่ากับ 11.5%, 2.7% และ 0.7% ตามลำดับ จงหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงในการ เผาไหม้

วิธีทำ

62
4.5. อากาศส่วนเกิน

ค่า AFR_T ของ C₃H₈ เท่ากับ 23.8 โมลอากาศ/โมลเชื้อเพลิง ในการหาค่า α จากสมการ (4.31) ต้องทราบสัดส่วนโดยปริมาตรของ N₂ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$y_{N_2} = 1 - y_{CO_2} - y_{O_2} - y_{CO}$$

= 0.851

ใช้สมการ (4.38) หาค่า lpha

$$\begin{split} \alpha &= \frac{0.851/(0.027-007/2)}{0.851/(0.027-007/2)-3.76} \\ &= 1.116 \\ \implies AFR_A = 1.116 \times 23.8 = 26.56 \quad \mathrm{mol}_{\mathrm{air}}/\mathrm{mol}_{\mathrm{fuel}} \end{split}$$

4.5 อากาศส่วนเกิน

ปริมาณอากาศเซิงทฤษฎีเป็นเพียงความต้องการขั้นต่ำสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ในความ เป็นจริงความต้องการอากาศสำหรับการเผาไหม้จะมากกว่านี้เพราะอากาศกับจะไม่ผสมกันอย่าง ทั่วถึงในเตาเผา จะมีบางตำแหน่งในเตาเผาที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่ามาก (lean mixture) และบางตำแหน่งที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่าน้อย (rich mixture) ถ้าอัตราส่วนอากาศ ต่อเชื้อเพลิงต่ำกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่าน้อย (rich mixture) ถ้าอัตราส่วนอากาศ ต่อเชื้อเพลิงต่ำกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่าน้อย (rich mixture) ถ้าอัตราส่วนอากาศ ต่อเชื้อเพลิงต่ำกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฏี การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ก็จะเกิดขึ้น เพื่อ หลีกเลี่ยงการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะต้องมากกว่าปริมาณพอดี ตามทฤษฏี อากาศส่วนเกินมักบ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศเชิงทฤษฏี 20% สูตรการคำนวณ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (e) คือ

$$e = \left(\frac{AFR_A - AFR_T}{AFR_T}\right) \times 100 \tag{4.40}$$

ความต้องการอากาศส่วนเกินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง อุปกรณ์การเผา ใหม้ และอัตราการผลิตไอน้ำ ตามปกติถ่านหินต้องการอากาศส่วนเกิน 15% ถึง 30% ในขณะที่เชื้อ เพลิงก๊าซต้องการ 5% ถึง 10% อุปกรณ์การเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่และออกแบบให้มีการผสมกันของ อากาศกับเชื้อเพลิงอย่างทั่วถึงจะต้องการอากาศส่วนเกินน้อยกว่าอุปกรณ์การเผาไหม้ที่มีขนาดเล็ก กว่า อัตราการผลิตไอน้ำมีผลต่ออากาศส่วนเกินเพราะอัตราการผลิตไอน้ำแปรผันกับอัตราการไหล ของอากาศ ดังนั้นอัตราการใหลของอากาศจึงต้องลดลงตามอัตราการผลิตไอน้ำ ถ้าอากาศไหลช้าลง การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอย่างทั่วถึงก็จะยากขึ้น ดังนั้นปริมาณอากาศส่วนจะต้องเพิ่ม มากขึ้นถ้าอัตราการผลิตไอน้ำลดลง ในกรณีของการเผาไหม้โดยใช้ถ่านหินปริมาณอากาศส่วนเกิน อาจต้องเพิ่มขึ้นเท่าตัวถ้าอัตราการผลิตไอน้ำลดลงครึ่งหนึ่ง

บทที่ 4. การเผาใหม้

การวัดอากาศส่วนเกินอาจกระทำได้ทางอ้อมจากการวัดสัดส่วนของ O₂ และ CO₂ ในก๊าซเสีย ถ้าสมมุติว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิง C_mH_n เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์โดยมี O₂ ในก๊าซเสีย

$$C_m H_n + \alpha \left(m + \frac{n}{4} \right) (O_2 + 3.76 N_2) \longrightarrow m CO_2 + \left[(\alpha - 1) \left(m + \frac{n}{4} \right) \right] O_2 + \frac{n}{2} H_2 O + 3.76 \alpha \left(m + \frac{n}{4} \right) N_2$$
(4.41)

สัดส่วนโดยโมลของ O2 และ CO2 ในก๊าซเสียแห้งหาได้จากสมการข้างต้น

$$y_{O_2} = \frac{[(\alpha - 1)(m + n/4)]}{4.76\alpha(m + n/4) - n/4}$$
$$y_{CO_2} = \frac{m}{4.76\alpha(m + n/4) - n/4}$$

และเนื่องจากอากาศส่วนเกินของปฏิกิริยาการเผาไหม้นี้มีค่าเท่ากับ

$$e = 100(\alpha - 1)$$

สมการระหว่าง y_{O_2} และ y_{CO_2} กับ e จึงเป็นดังนี้

$$y_{O_2} = \frac{0.01e}{4.76(1+0.01e) - n/(4m+n)}$$
$$y_{CO_2} = \frac{4m/(4m+n)}{4.76(1+0.01e) - n/(4m+n)}$$

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟระหว่าง y_{O2} และ y_{CO2} กับ e ในการเผาไหม้เซื้อเพลิง C_mH_n ที่มีค่า m และ n ต่างกัน จะเห็นว่าเส้นโค้งของ y_{O2} ในการเผาไหม้ทุกเชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกันมาก ในทาง ตรงข้ามเส้นโค้งของ y_{CO2} ขึ้นกับชนิดของเซื้อเพลิงอย่างชัดเจน เหตุผลคือ CO₂ ขึ้นกับสัดส่วนของ คาร์บอนในเชื้อเพลิง ถ่านหินมีสัดส่วนของคาร์บอนมากกว่าก๊าซมีเทน ปริมาณ CO₂ ที่ได้จากการ เผาใหม้ถ่านหินจึงมากกว่าที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซมีเทน

ถึงแม้ว่าปริมาณอากาศส่วนเกินจะหาได้จากการวัด O₂ หรือ CO₂ แต่การวัด O₂ เป็นที่นิยม มากกว่าเนื่องจาก

- เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลง O₂ ตามเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินจะคล้ายกันไม่ว่าเชื้อเพลิงจะ เป็นถ่านหิน น้ำมันเตาหรือก๊าซธรรมชาติ ในขณะที่ชนิดของเชื้อเพลิงมีผลอย่างมากต่อเส้น โค้งของ CO₂
- เส้นโค้งของ CO₂ มีความชันน้อยกว่าเส้นโค้งของ O₂ ซึ่งทำให้การวัด CO₂ ต้องมีความ แม่นยำสูงกว่าการวัด O₂ เพื่อให้ได้ค่าอากาศส่วนเกินที่มีความคลาดเคลื่อนเท่ากัน
- CO₂ ละลายน้ำดีกว่า O₂ การวัดปริมาณอากาศส่วนเกินด้วยการวัด CO₂ จึงอาจให้ค่าที่ผิด พลาดมากกว่า



รูปที่ 4.1: ความสัมพันธ์ระหว่าง y_{O_2} และ y_{CO_2} กับ e ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 4.2: ผลกระทบของอากาศส่วนเกินต่อ O₂, CO₂, CO และเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ในก๊าซเสีย

รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของ CO₂, O₂ และ CO ตามปริมาณอากาศที่ ใช้เผาไหม้ เป็นที่น่าสังเกตว่าสัดส่วนของ CO₂ ที่มากเป็นสิ่งดีเพราะหมายความว่าการเผาไหม้มี ประสิทธิภาพสูง ในทางตรงข้ามสัดส่วนของ O₂ ที่มากเกินไปเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เพราะมันหมาย ถึงความร้อนปริมาณมากที่สูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน

ถึงแม้ว่าปริมาณ O₂ ที่เพิ่มขึ้นจะบ่งบอกถึงอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีอากาศรั่วไหลเข้า มาในระบบหลังจากการเผาไหม้สิ้นสุดแล้ว ปริมาณ O₂ จะไม่สามารถใช้หาปริมาณอากาศส่วนเกิน อย่างถูกต้องเพราะ O₂ บางส่วนมาจากอากาศที่รั่วไหลเข้ามาในระบบ ถ้าคิดว่าปริมาณ O₂ ที่วัด ได้มาจากการเผาไหม้เพียงแหล่งเดียวและไปลดปริมาณ O₂ ผลที่ตามมาอาจเป็นการเผาไหม้ไม่ สมบูรณ์เพราะโดยแท้จริงแล้ว กระบวนการเผาไหม้กำลังขาดอากาศ

้สัดส่วนของ CO ที่เพิ่มขึ้นก็บ่งบอกอย่างชัดเจนถึงการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ที่รุนแรงขึ้น โดยไม่ขึ้น

บทที่ 4. การเผาไหม้

กับการรั่วไหลของอากาศเข้าสู่ระบบ การวัดทั้ง O₂ และ CO อาจกระทำควบคู่กันเพื่อผลการวิเคราะห์ อากาศส่วนเกินที่แม่นยำ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น อากาศส่วนเกินทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ดังนั้น ปริมาณอากาศส่วนเกินควรจะน้อยที่สุดเท่าที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ วิธีหนึ่งที่ใช้ ควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกินได้คือการลดอากาศส่วนเกินลงมาเรื่อย ๆ ถ้าพบว่าสัดส่วนของ O₂ มากไปพร้อมกับตรวจวัด CO เมื่อ CO เริ่มเพิ่มขึ้น ก็ให้หยุดลดอากาศส่วนเกินแล้วให้เพิ่มมันขึ้นมา ตามเล็กน้อยสมควร ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ได้ขณะนี้น่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของการ ส่งเสริมการเผาไหม้สมบูรณ์และการประหยัดพลังงาน

ถึงแม้ว่าอากาศส่ว^{ุ้}นเกินจะลดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกินจะทำให้เกิดการสูญ เสียพลังงานความร้อน เนื่องจากความร้อนบางส่วนจะต้องถูกใช้ไปกับการทำให้ N₂ และ O₂ บาง ส่วนในอากาศส่วนเกินร้อนขึ้นก่อนที่มันจะถูกปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม

4.6 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

เนื่องจากถ่านหินมีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ก๊าซเสียจะประกอบไปด้วย SO₂ ซึ่งเกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยา

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

 SO_2 จะทำปฏิกิริยากับ O_2 กลายเป็น SO_3

$$\mathrm{SO}_2 + \frac{1}{2}\mathrm{O}_2 \longrightarrow \mathrm{SO}_3$$

ถ้าไอน้ำในก๊าซเสียควบแน่น SO3 จะทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดกรดซัลฟูริก (sulfuric acid)

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

ซึ่งมีความสามารถในการกัดกร่อนโลหะสูง จึงเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ทำด้วยโลหะ ดังนั้นจึงมี ความจำเป็นต้องป้องกันการเกิดกรดชนิดนี้ขึ้นด้วยการเลือกใช้ถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำและติดตั้ง ระบบกำจัด SO₂ นอกจากนี้ยังควรควบคุมไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในก๊าซเสียที่จะทำให้มีน้ำ มาทำปฏิกิริยากับก๊าซ SO₃ ได้

ไอน้ำในก๊าซเสียเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศ (*p*) เท่ากับ 1 atm ความดัน ย่อย (partial pressure) ของไอน้ำ (*p*_{H2}*O*) มีค่าเท่ากับ

$$p_{H_2O} = y_{H_2O}p$$

โดยที่ y_{H2O} คือสัดส่วนโดยโมลของไอน้ำ ถ้าอุณหภูมิของก๊าซเสียลดลงเรื่อย ๆ โดยที่ความดันคงที่ที่ 1 atm ในที่สุดไอน้ำจะควบแน่น อุณหภูมิที่การควบแน่นเริ่มเกิดขึ้นเรียกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dewpoint temperature) ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน p_{H2O} ตราบใดที่อุณหภูมิของ ก๊าซเสียสูงกว่าอุณหภูมินี้ จะไม่มีการควบแน่นของน้ำ ดังนั้นอุณหภูมิของก๊าซเสียจึงถูกควบคุมให้สูง กว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของก๊าซเสีย

66

4.7 อุปกรณ์เผาไหม้

หัวข้อที่ผ่านมากล่าวถึงองค์ประกอบทางเคมีของการเผาไหม้ซึ่งประกอบด้วยเชื้อเพลิงและ อากาศ แต่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อมีองค์ประกอบทางกายภาพที่เหมาะสม ด้วย ปัจจัยที่ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มีสามประการคือ

 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิจุดระเบิด (ignition temperature) เชื้อเพลิงที่ ผสมกับอากาศจะไม่ทำปฏิกิริยาเผาไหม้กันถ้าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงต่ำเกินไป การเผาไหม้ จะเกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิจุดระเบิด ตารางที่ 4.5 แสดง อุณหภูมิจุดระเบิดของเชื้อเพลิงบางชนิดที่ใช้ในโรงไฟฟ้า

เชื้อเพลิง	อุณหภูมิจุดระเบิด (°C)
С	700
S	243
H_2	500
CO	609
CH_4	580
C_2H_6	515
C_3H_8	480

ตารางที่ 4.5: อุณหภูมิจุดระเบิดของเชื้อเพลิงบางชนิด

- เชื้อเพลิงกับอากาศต้องผสมกันอย่างทั่วถึง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณอากาศมากเมื่อเทียบกับเชื้อ เพลิงแต่การเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ก็อาจเกิดขึ้นถ้ามีบางจุดที่มีอากาศไม่เพียงพอกับเชื้อ เพลิงอันเป็นผลจากการที่อากาศกับเชื้อเพลิงไม่ได้ผสมกันอย่างทั่วถึง วิธีหนึ่งที่ช่วยทำให้เชื้อ เพลิงกับอากาศผสมกันคือการทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนของอากาศผ่านเชื้อเพลิง
- มีเวลาที่มากพอสำหรับการเผาไหม้ การเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ในช่วงเวลาสั้น ๆ เนื่องจาก การผสมกันระหว่างอากาศกับเซื้อเพลิงอาจไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่ถ้าให้เวลาการเผา ไหม้ที่มากพอ การผสมกันก็มีโอกาสเกิดขึ้นและในที่สุดการเผาไหม้ก็จะเป็นไปอย่างสมบูรณ์

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นภายในเตาเผา (furnace) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อการเผาไหม้ แบบสมบูรณ์โดยคำนึงถึงบัจจัยทั้งสามประการดังกล่าว ดังนั้นอุปกรณ์เผาไหม้ในเตาเผาจะถูก ออกแบบให้มี (1) มีระบบให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิจุดระเบิด (2) ควบคุมปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ได้และมีระบบการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ และ (3) มี ขนาดใหญ่พอที่ให้อากาศกับเชื้อเพลิงมีเวลาเผาไหม้ที่เพียงพอ

4.7.1 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลว

อุปกรณ์หลักคือ หัวเผา (burner) ซึ่งมีหน้าที่สำคัญประการแรกคือ จ่ายเชื้อเพลิงกับอากาศและ ผสมกับเชื้อเพลิงกับอากาศระหว่างการเผาไหม้ รูปที่ 4.3 แสดงการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศใน หัวเผา จะเห็นว่าเชื้อเพลิงและอากาศไหลแยกกันภายในหัวเผาและจะผสมกันนอกหัวเผา การที่ เชื้อเพลิงไม่ผสมกับอากาศภายในหัวเผาทำให้การเผาไหม้ไม่เกิดขึ้นภายในหัวเผาและช่วยป้องกัน อุบัติเหตุ อย่างไรก็ตามหัวเผาต้องได้รับอาการออกแบบให้เชื้อเพลิงต้องผสมกับอากาศนอกหัวเผา รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอากาศมีการไหลวนซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ นอกจากนี้ อากาศบางส่วนยังไหลย้อนกลับเข้าเปลวไฟซึ่งทำให้มีการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอย่างมี ประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.3: การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในหัวเผา

หน้าที่อีกประการหนึ่งของหัวเผาคือ จุดระเบิดเชื้อเพลิงให้เกิดการเผาไหม้ การให้ความร้อนแก่ เชื้อเพลิงนิยมใช้ประกายไฟจากความต่างศักย์ไฟฟ้า 11 kV ซึ่งทำให้เกิดเปลวไฟนำร่อง (pilot flame) และนำไปสู่เปลวไฟหลัก (main flame) ในที่สุด พลังงานที่ทำให้เกิดการจุดระเบิดขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง ความเร็วของเชื้อเพลิง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เป็นต้น พลังงานมีค่าต่ำ สุดเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เป็นต้น พลังงานมีค่าต่ำ สุดเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี หลังจากได้เปลวไฟ หลักแล้ว หัวเผาต้องทำหน้าที่ควบคุมเปลวไฟให้มีเสถียรภาพเพื่อให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หัวเผามีกลไกการควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเพื่อให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ อัตราการไหลของ เชื้อเพลิงจะมีค่าต่ำสุดค่าหนึ่งซึ่งทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพได้ ในขณะเดียวกันหัวเผาก็ถูกออกแบบ ให้จ่ายเชื้อเพลิงได้ไม่เกินอัตราการไหลสูงสุด อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลสูงสุดกับอัตราการไหล ต่ำสุดของเชื้อเพลิงในหัวเผาเรียกว่า อัตราลดเปลวไฟ (turndown ratio)

ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลว การเผาไหม้จะยากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซเนื่องจากเชื้อเพลิง เหลวต้องได้รับความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอก่อนที่จะเผาไหม้ ความเร็วของการเปลี่ยนสถานะ ขึ้นกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเหลว ดังนั้นหัวเผาสำหรับเชื้อเพลิงเหลวจึงประกอบด้วยหัวฉีด (atomizer) ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวเป็นละอองเล็ก ๆ จำนวนมาก ขนาดของละอองที่เล็กลงจะเพิ่มพื้นผิว

4.7. อุปกรณ์เผาใหม้

สัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ทำให้เชื้อเพลิงกลายเป็นไอเร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสของการเกิดการ เผาไหม้สมบูรณ์ มีหลายวิธีที่ทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวเป็นละอองได้เช่น (1) การส่งเชื้อเพลิงภายใต้ ความดันสูงผ่านรูเล็ก ๆ (2) การส่งเชื้อเพลิงที่ความดันปกติให้ไหลมาบรรจบกับไอน้ำหรืออากาศ ที่มีความดันสูงตรงทางออกของหัวฉีดหรือ (3) การส่งเชื้อเพลิงผ่านท่อกลวงที่หมุนรอบแกนด้วย ความเร็วสูง แรงหนีศูนย์กลางจะทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวเป็นละอองที่ปลายหัวฉีด

4.7.2 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ขั้นตอนแรกของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีความชื้นคือ การใช้ความร้อนขับไล่ความชื้นออก จากเชื้อเพลิง หลังจากนั้นความร้อนจะขับสารระเหยออกจากเชื้อเพลิง สารระเหยคือ ก๊าซหลายชนิด ที่แทรกตัวในเชื้อเพลิงโดยมีก๊าซบางชนิดเช่น H₂, CH₄ และ CO ที่เผาไหม้ได้ สารระเหยเหล่านี้จะเผา ใหม้กับอากาศจนหมดสิ้นและทำให้เชื้อเพลิงแข็งกลายเป็นถ่านโค้กซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนกับเถ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สารระเหยเพียงพอที่จะทำให้ถ่านโค้กก็จะเผาไหม้กับอากาศจน กลายเป็นขี้เถ้าในที่สุด อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ถ่านโค้กเกิดขึ้นค่อนข้างช้าและเป็นสาเหตุที่ทำให้ เชื้อเพลิงแข็งเผาไหม้ได้ยากกว่าเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจึง มีความซับซ้อนมากกว่าอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง แข็งที่ใช้ในโรงไฟฟ้าแบ่งเป็น เครื่องป้อนเชื้อเพลิง (mechanical stoker) เครื่องบดละเอียดกับหัวเผา (pulverizer-burner system) และระบบเผาไหม้แบบฐานไหล (fluidized bed combustion system)

เครื่องป้อนเชื้อเพลิง

การป้อนถ่านหินเข้าเตาเผาอาจใช้มือหรือพลั่ว แต่ความต้องการอัตราการเผาไหม้สูงขึ้นทำให้มี การออกแบบเครื่องป้อนถ่านหินแบบต่าง ๆ ข้อดีของการใช้เครื่องป้อนคือ

- ลดแรงงานเนื่องจากคนงานหนึ่งคนสามารถเดินระบบเตาเผาหลายเตาพร้อมกัน
- สามารถเพิ่มปริมาณการเผาใหม้โดยออกแบบเครื่องขนาดใหญ่ขึ้น
- ป้อนถ่านหินได้ต่อเนื่องและสม่ำเสมอ
- สามารถใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้
- สามารถควบคุมปริมาณอากาศเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแข็งคือ ตะแกรง (grate) ซึ่งเป็นฐานสำหรับกอง เชื้อเพลิงขณะเผาไหม้ ตะแกรงอาจถูกออกแบบให้อยู่นิ่ง สั่นได้ หรือเคลื่อนที่ได้ เชื้อเพลิงที่ผ่าน กระบวนการลดขนาดจนมีขนาดเล็กพอเหมาะจะถูกป้อนเข้าตะแกรงด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ป้อนจาก ด้านล่าง ป้อนจากด้านบน และป้อนจากเครื่องกระจาย (spreader) ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ การ ป้อนเชื้อเพลิงด้วยเครื่องกระจายนับว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดเพราะทำให้เชื้อเพลิงกระจายไปทั่ว ตะแกรงและไม่กระจุกตัวที่จุดใดจุดหนึ่ง การจุดระเบิดการเผาไหม้อาจใช้หัวเผาที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงก๊าซ หรืออาจใช้แหล่งความร้อนซึ่งอาจเป็นโค้ง (arch) ที่แผ่รังสีความร้อนมายังกองเชื้อ เพลิงเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงพอที่จะเริ่มการเผาไหม้ได้ นอกจากนี้จะต้องมีระบบการควบคุมอากาศให้มี ปริมาณมากพอสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ เครื่องป้อนถ่านหินที่ดีควรมีคุณลักษณะดังนี้

- สามารถเผาใหม้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่าง ๆ กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- มีกลไกที่ป้องกันการสะสมของขี้เถ้าบนตะแกรงซึ่งจะขัดขวางการเผาใหม้
- สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณการเผาใหม้เชื้อเพลิงตามความต้องการได้
- ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
- ควบคุมการทำงานง่าย โดยอาจควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ
- ผู้ควบคุมเครื่องสามารถสังเกตการเผาใหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาได้

เครื่องป้อนเชื้อเพลิงมีหลายแบบเช่น แบบป้อนจากด้านล่าง (underfeed stoker) แบบตะแกรง เคลื่อนที่ (travelling grate stoker) แบบตะแกรงสั่น (vibrating grate stoker) และแบบกระจาย (spreader stoker) เครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบกระจายมีสมรรถภาพสูงกว่าเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบ อื่น เครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบนี้มีตัวกระจาย (spreader) ที่ทำหน้าที่เหวี่ยงเชื้อเพลิงลงสู่ตะแกรง เชื้อ เพลิงขนาดเล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยมากจะเผาไหม้ขณะกำลังลอยอยู่ในอากาศ ส่วนเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะตกลงมาเผาไหม้บนตะแกรง ขนาดของเชื้อเพลิงควรจะมีหลายขนาด เพราะถ้ามีเพียงขนาดเดียวมันจะตกลงมาอยู่บริเวณใกล้กันเป็นกองเชื้อเพลิงที่อาจจะเผาไหม้ไม่ หมด การเผาไหม้ในเครื่องป้อนแบบนี้จะทำให้เกิดขี้เถ้าลอย (fly ash) ปริมาณมากเนื่องจากมีการ เผาไหม้เชื้อเพลิงขณะที่ลอยอยู่ในอากาศ รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นแผนภาพของเครื่องป้อนเชื้อเพลิง แบบกระจาย จะเห็นว่ามีการจ่ายอากาศเข้าทางด้านล่างเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงบนตะแกรงและทาง ด้านบนเพื่อเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอยขึ้นไปในอากาศ

เครื่องป้อนเชื้อเพลิ่งแข็งแบบที่ใช้เครื่องกระจายเหมาะกับโรงไฟฟ้าขนาดเล็กเพราะให้อัตราการ เผาไหม้ที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการเผาไหม้ที่จะกล่าวถึงภายหลัง ดังนั้นอุปกรณ์เผา ไหม้ประเภทนี้เกือบทั้งหมดจึงพบในโรงไฟฟ้าชีวมวล ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งซึ่งทำให้อุปกรณ์ เผาไหม้ประเภทนี้ได้รับความนิยมในโรงไฟฟ้าชีวมวลคือ เชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิดเช่นแกลบและ ชานอ้อยมีขนาดเล็กอยู่แล้วและไม่ต้องผ่านกระบวนการลดขนาดอีก

เครื่องบดละเอียดกับหัวเผา

ก้อนเชื้อเพลิงแข็งที่มีขนาดใหญ่เผาไหม้ยาก ถ้าเชื้อเพลิงแข็งสามารถถูกทำให้ละเอียดเป็นผง การเผาไหม้จะง่ายขึ้นมาก ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่บดละเอียดได้ด้วยเครื่องบดถ่านหิน (pulverizer) การออกแบบเครื่องบดถ่านหินต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญ 3 ประการคือความชื้นของถ่านหิน ความสามารถในการถูกบดและปริมาณสารระเหยในถ่านหิน เครื่องบดถ่านหินต้องเป่าถ่านหินให้ แห้งโดยใช้อากาศร้อนก่อนที่จะบดละเอียด ความสามารถในการถูกบดวัดได้จากดรรชนีฮาร์ดโกรฟ

4.7. อุปกรณ์เผาใหม้



รูปที่ 4.4: เครื่องป้อนเชื้อเพลิงแข็งแบบกระจาย

ซึ่งมีค่าประมาณ 26 ถึง 112 ตัวเลขต่ำหมายถึงถ่านหินที่แข็งและยากต่อการบดซึ่งต้องใช้พลังงาน ในการบดที่สูง ปริมาณสารระเหยเป็นปัจจัยที่กำหนดว่า ถ่านหินควรต้องถูกบดละเอียดขนาดไหน ถ่านหินที่มีสารระเหยมากอาจต้องการการบดน้อยกว่าถ่านหินที่มีสารระเหยน้อยเพราะสารระเหย ช่วยให้การเผาไหม้ง่ายขึ้น เพราะฉะนั้นการบดจึงควรทำให้ 85% ของถ่านหินแอนทราไซต์ผ่านช่อง ตะแกรงเบอร์ 200 (200 mesh) หรือมีขนาดเล็กกว่า 74 ไมครอน แต่ทำให้เพียง 60% ของถ่านหิน ลิกไนต์ผ่านช่องตะแกรงเบอร์ 200 การบดถ่านหินให้ละเอียดเกินความจำเป็นจะทำให้สูญเสียพลังงาน มากเกินไป

ผงถ่านหินอาจจะถูกส่งไปเผาไหม้ในเตาเผาทันทีหรืออาจจะถูกเก็บในถังเก็บที่อยู่ใกล้เตาเผา ซึ่งทำหน้าที่ป้อนผงถ่านหินสู่เตาเผา ผงถ่านหินจะถูกส่งไปตามท่อพร้อมกับอากาศด้วยระบบนิวแม ติกไปที่หัวเผาที่มีลักษณะคล้ายรูปที่ 4.3 หัวเผาทำหน้าที่ 4 อย่างคือ (1) ผสมของผงถ่านหินกับ อากาศในสัดส่วนที่เหมาะสม (2) จุดระเบิดและควบคุมความมีเสถียรภาพของเปลวไฟ (3) ป้องกัน การไหลย้อนของเปลวไฟ (flashback) กลับเข้าไปในหัวเผา ซึ่งหมายความว่าอัตราการไหลของส่วน ผสมของผงถ่านหินกับอากาศออกจากหัวเผาจะต้องมากพอ และ (4) เพิ่มเติมอากาศเพื่อให้การเผา ไหม้สมบูรณ์

เครื่องบดละเอียดกับหัวเผาเหมาะกับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เพราะสามารถให้อัตราการเผาไหม้ที่ สูงและตอบสนองต่อความต้องการพลังงานความร้อนที่รวดเร็ว ข้อจำกัดของอุปกรณ์เผาไหม้ประเภท นี้คือ เชื้อเพลิงต้องอยู่ในสภาพที่บดละเอียด เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากไม่สามารถอยู่ในสภาพบด ละเอียดได้จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์เผาไหม้ประเภทนี้ ดังนั้นโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องบดละเอียดกับ หัวเผาจึงเป็นโรงไฟฟ้าถ่านหิน

ระบบเผาไหม้แบบฐานไหล

รูปที่ 4.5 แสดงอนุภาคของแข็งจำนวนมากที่รวมตัวกันเป็นฐานอยู่บนแผ่นที่มีรูพรุน ถ้าไม่มีก๊าซ ใหลผ่านแผ่น อนุภาคก็จะเรียงตัวทับกันตามปกติ แต่ถ้ามีก๊าซที่มีความเร็วมากพอไหลผ่าน อนุภาค ของแข็งเหล่านี้จะแปรสภาพเป็นฐานไหลเพราะอนุภาคจะถูกพยุงตัวให้ลอยอยู่ในก๊าซ โดยอนุภาค จะคลุกเคล้ากับก๊าซเป็นอย่างดี ถ้าอนุภาคเป็นก้อนถ่านหินขนาดเล็กกว่า 32 mm ความเร็วก๊าซขั้น ต่ำอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 4.6 m/s ลักษณะทางกายภาพของฐานไหลที่มีก๊าซพยุงจะคล้ายกับของไหล ดังนี้

- ความดันสถิตที่ระดับความสูงหนึ่ง ๆ มีค่าโดยประมาณเท่ากับน้ำหนักของอนุภาคเหนือระดับ ความสูงนั้นหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของฐาน
- ระดับของผิวของฐานจะเป็นระดับระนาบไม่ว่าฐานจะเอียงไปในทิศทางใด
- อนุภาคในฐานสามารถระบายออกจากรูด้านล่างฐานเหมือนการระบายของเหลวออกจาก ภาชนะบรรจุ
- อนุภาคที่ความหนาแน่นมากจะจม อนุภาคที่ความหนาแน่นน้อยจะลอย



รูปที่ 4.5: หลักการทำงานของฐานไหล

ฐานไหลที่เกิดขึ้นจะมีการผสมกันระหว่างถ่านหินกับอากาศอย่างทั่วถึง และถ้าอุณหภูมิของฐาน ไหลสูงกว่าจุดระเบิดของการเผาไหม้ การเผาไหม้ก็จะเกิดขึ้น ระบบเผาไหม้แบบฐานไหลสามารถเผา ไหม้ถ่านหินคุณภาพต่ำที่มีความชื้น เถ้าและกำมะถันมากได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากถ่านหินแล้ว ระบบเผาไหม้นี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงแข็งอื่น ๆ เช่นฟางข้าว ชานอ้อย เศษขยะได้อีกด้วย นอกจากเชื้อเพลิงแข็งและขี้เถ้าจากการเผาไหม้แล้ว ฐานไหลยังประกอบไปด้วยทรายซึ่งเป็น วัสดุเฉื่อยที่ไม่เผาไหม้และปูนขาว เม็ดของปูนขาวประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เป็น

72

ส่วนใหญ่และมี MgCO3 อยู่บ้าง CaCO3 จะทำแตกตัวเป็น CaO และ CO2 เมื่อได้รับความร้อนที่ เหมาะสม

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

CaO จะทำปฏิกิริยากับ SO₂ และ O₂ ดังนี้

$$CaO + SO_2 + 0.5O_2 \longrightarrow CaSO_4$$

ซึ่งเป็นปฏิกิริยากำจัด SO₂ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ดีที่สุดประมาณ 815°C ถึง 870°C ซึ่งใกล้ เคียงกับอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในฐานไหล CaSO₄ ที่เกิดขึ้นและตกค้างอยู่ในฐานจะถูกถ่ายเท ออกจากฐานเป็นระยะ ๆ ส่วนที่ลอยไปกับก๊าซเสียก็จะถูกแยกออกจากก๊าซเสียก่อนก๊าซเสียจะถูก ปล่อยสู่บรรยากาศ

ระบบเผาไหม้ในฐานไหลมีอุณหภูมิการเผาไหม้ประมาณ 900°C ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิในระบบ เผาไหม้แบบอื่นมาก ข้อดีของอุณหภูมิเผาไหม้ต่ำนอกจากจะช่วยให้ปฏิกิริยากำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เกิดขึ้นได้ดีแล้ว ยังมีข้อดีอีกสองประการ ประการแรกคือ อุณหภูมิเผาไหม้ต่ำช่วยลดการเกิดก๊าซ NO_x ซึ่งเกิดขึ้นมากที่อุณหภูมิเผาไหม้สูง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิเผาไหม้ของระบบนี้จะต่ำกว่าระบบอื่น แต่ปัจจัยสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ยังมีอยู่ครบครันรวมทั้งเวลาของการเผาไหม้ที่มากจากการที่ ถ่านหินสามารถลอยอยู่ในอากาศได้นาน ๆ ประการที่สองคือ อุณหภูมิเผาไหม้ในฐานไหลต่ำกว่า อุณหภูมิเถ้าหลอมเหลวซึ่งจะลดปัญหาการเกิดสแลกและฟาวลิ่ง

ระบบเผาไหม้ในฐานไหลทำงานได้ที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันสูง ระบบเผาไหม้ใน ฐานไหลมีสองแบบคือ แบบไม่ไหลเวียน (bubbling fluidized bed combustion) และแบบไหลเวียน (circulating fluidized bed combustion) รูปที่ 4.6 แสดงเตาเผาในระบบเผาไหม้ในฐานไหลแบบ ฟองอากาศ อากาศที่ไหลเข้าฐานไหลมีความเร็วพอเหมาะที่จะทำให้เกิดฐานไหลซึ่งเป็นพิ้นที่สีเทาใน รูป การเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแข็งกับอากาศทำให้ฐานไหลมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีการฝังท่อน้ำ ในฐานไหลเพื่อถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้สู่น้ำ นอกจากนี้ผนังของเตาเผาอาจทำด้วยผนังน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนความร้อนในเตาเผา ก๊าซเสียที่ลอยขึ้นจากฐานไหลมีอุณหภูมิสูง และสามารถถ่ายเทความร้อนให้น้ำในหม้อไอน้ำ ก๊าซเสียจะมีอนุภาคของเซื้อเพลิง ปูนขาวและทราย ปะปนในปริมาณมาก จึงต้องใช้อุปกรณ์กำจัดฝุ่นดักอนุภาคเหล่านี้และส่งกลับเข้าฐานไหล ก๊าซเสีย ที่ปราศจากอนุภาคจะถูกระบายออกจากระบบเผาไหม้

รูปที่ 4.7 แสดงระบบเผาไหม้ในฐานไหลแบบไหลเวียน อากาศที่ไหลเข้าฐานไหลมีความเร็วสูง มากจนทำให้อนุภาคของเซื้อเพลิงลอยไปกับอากาศ การกระจายตัวของเซื้อเพลิงค่อนข้างคงที่ทั่ว เตาเผาซึ่งทำให้อุณหภูมิเผาไหม้คงที่เช่นกัน ผนังของเตาเผาแบบนี้เป็นผนังน้ำเพื่อดูดกลืนความร้อน จากการเผาไหม้ ก๊าซเสียและเซื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้จะไหลออกจากเตาเผาเข้าสู่อุปกรณ์ กำจัดฝุ่นซึ่งจะแยกอนุภาคของเซื้อเพลิงออกจากก๊าซเสีย เชื้อเพลิงจะถูกส่งกลับเข้าเตาเผา ก๊าซเสีย ที่ไหลออกมีอุณหภูมิสูงและจะไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำก่อนที่จะระบาย ออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 4.7: ระบบเผาไหม้ในฐานไหลแบบไหลเวียน

ถึงแม้ว่าระบบเผาไหม้แบบฐานไหลมีข้อดีมากมาย แต่อุปกรณ์เผาไหม้มีขนาดเล็กและราคา แพง จึงอาจไม่เหมาะกับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่แต่เหมาะกับโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ยากด้วยอุปกรณ์เผาไหม้แบบเครื่องป้อนเชื้อเพลิงและอุปกรณ์เผาไหม้แบบเครื่องบดละเอียดและหัว เผา นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันมากซึ่งทำให้เกิด SO₂ ปริมาณมากและยากแก่การกำจัดมีความ เหมาะสมที่จะเผาไหม้ด้วยอุปกรณ์ประเภทนี้ อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่อุปกรณ์เผาไหม้แบบฐานไหล จะได้รับความนิยมมากขึ้นในการใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงที่หลากหลายมากขึ้น

4.7. อุปกรณ์เผาใหม้

คำถามท้ายบท

- 1. ธาตุสามตัวที่เผาใหม่ได้คืออะไร
- จงระบุข้อแตกต่างระหว่างการเผาไหม้แบบพอดี (stoichiometric combustion) และการเผา ใหม้แบบสมบูรณ์ (complete combustion)
- 3. การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์มักทำให้เกิดก๊าซใด
- 4. ในถ่านหินที่มีสัดส่วนโดยมวลของ H เท่ากับ x_H และ สัดส่วนโดยมวลของ O เท่ากับ x_O จะ มีสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนอิสระ (free hydrogen) เท่าไร
- 5. อัตราส่วนอากาศ (air ratio) หมายถึงอะไร
- การวิเคราะห์ก๊าซเสียแห้งโดยใช้ Orsat apparatus จะทำให้ทราบส่วนประกอบอะไรบ้างของ ก๊าซเสีย
- 7. ทำไมการเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าจึงต้องการอากาศส่วนเกินเสมอ
- การใช้อากาศส่วนเกินมากเกินไปส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า และทำไมถึง เป็นเช่นนั้น
- 9. เชื้อเพลิงชนิดใดระหว่าง ถ่านหิน น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติต้องการอากาศส่วนเกินน้อยที่สุด
- 10. ทำไมการวัดปริมาณอากาศส่วนเกินด้วยเครื่องวัด O₂ เพียงอย่างเดียวอาจให้ค่าที่ผิดได้
- 11. ถ้าเครื่องวัด CO₂ และเครื่องวัด O₂ มีความแม่นยำเท่ากัน เครื่องไหนจะให้ค่าอากาศส่วนเกิน ที่คลาดเคลื่อนมากกว่า เพราะอะไร
- 12. จงระบุปัจจัยสามประการของการผาใหม้แบบสมบูรณ์
- 13. เครื่องป้อนเชื้อเพลิงออกแบบให้เผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดใด
- 14. จงระบุข้อเสียของระบบเผาใหม้แบบฐานใหลมาสองข้อ
- 15. ปูนขาวในระบบเผาไหม้แบบฐานไหล (fluidized-bed combustion system) ทำหน้าที่อะไร
- ทำไมระบบเผาไหม้แบบฐานไหล (fluidized bed) จึงก่อให้ก๊าซ SO₂ น้อยกว่าระบบที่ใช้ ถ่านหินบดละเอียด
- 17. ระบบเผาไหม้แบบฐานไหลลดการเกิด NO_x ได้อย่างไร
- ค่าความร้อนสูง (HHV) ของ C₄H₁₀ เท่ากับ 128400 kJ/m³ และค่าความร้อนแฝงในการ ควบแน่นของไอน้ำเท่ากับ 1960 kJ/m³ จงหาค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของ C₄H₁₀

- ถ่านหินก้อนหนึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายในสภาพเดิม (as-received basis) พบว่ามี C
 70%, H 3%, O 4%, N 2%, S 1%, ความชื้น 15% และเถ้า 5% จงหา AFR_T
- 20. เมื่อเผาไหม้ถ่านหิน 1 kg ในข้อที่แล้วโดยสมบูรณ์แล้วจะได้น้ำกี่กิโลกรัม
- 21. จงหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีของ C₅H₁₂
- 22. ก๊าซ C₄H₁₀ 1 m³ เมื่อเผาไหม้โดยสมบูรณ์กับอากาศจะทำให้ได้ไอน้ำกี่ลูกบาศก์เมตร
- 23. เชื้อเพลิงก๊าซชนิดหนึ่งประกอบด้วย CH₄ 74%, C₂H₆ 17% และ CO 9% จงหา *LHV* ของ เชื้อเพลิงนี้
- 24. ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งพบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 30% ถ้าเชื้อเพลิงนี้มี ค่า *AFR_T* = 10 kg_{air}/kg_{fuel} จงหา *AFR_A*

บทที่ 5 หม้อไอน้ำ

5.1 ประเภทของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (boiler) เป็นอุปกรณ์ที่พบเห็นทั่วไปในโรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และอาคาร ธุรกิจ หม้อไอน้ำมีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กที่มีอัตราการผลิตไอน้ำต่ำและความดันต่ำซึ่งสามารถ หาซื้อได้ในท้องตลาด ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำสูงและความดันสูงซึ่งต้องก่อสร้าง ในสถานที่ใช้งาน หม้อไอน้ำอุตสาหกรรม (industrial boiler) หมายถึง หม้อไอน้ำที่ใช้ผลิตไอน้ำความ ดันต่ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ ในโรงแรม โรงพยาบาล หรืออาคารธุรกิจขนาดใหญ่อื่น ๆ หม้อไอน้ำประเภทนี้มีขนาดเล็กและความสามารถ ในการผลิตไอน้ำไม่สูงมากนัก เชื้อเพลิงที่ใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมเป็นได้ทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่ง ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันเตา หรือก๊าซธรรมชาติ และเชื้อเพลิงชีวมวล หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า (utility boiler) หมายถึง หม้อไอน้ำที่ใช้ผลิตไอน้ำความดันสูงในโรงไฟฟ้า หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ มีกำลัง การผลิตไอน้ำสูง และใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเท่านั้น

การจำแนกหม้อไอน้ำยังอาจกระทำได้โดยพิจารณาจากหลักการผลิตไอน้ำซึ่งแบ่งหม้อไอน้ำเป็น 2 ประเภทคือ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (fire-tube boiler) และหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (water-tube boiler) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่เริ่มมีการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งรวม ถึงการใช้พลังไอน้ำขับเคลื่อนขบวนรถไฟ ถึงแม้ว่าในบัจจุบันการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งรวม ถึงการใช้พลังไอน้ำขับเคลื่อนขบวนรถไฟ ถึงแม้ว่าในบัจจุบันการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งรวม ถึงการใช้พลังไอน้ำขับเคลื่อนขบวนรถไฟ ถึงแม้ว่าในบัจจุบันการใช้ประโยชน์จากหม้อไอน้ำแบบนี้ จะลดลงมามาก แต่มันก็ยังมีความสำคัญในกรณีที่ความต้องการความดันไอน้ำไม่เกิน 18 bar และ กำลังการผลิตไอน้ำไม่เกิน 6.2 kg/s หม้อไอน้ำแบบท่อไฟมีข้อได้เปรียบที่มีขนาดเล็ก ราคาที่ไม่สูง นัก ความง่ายในการใช้งาน ความง่ายในการดูแลรักษา และการตอบสนองที่รวดเร็วต่อความต้องการ ไอน้ำที่เปลี่ยนแปลง ส่วนประกอบสำคัญของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟคือเปลือกหม้อไอน้ำ (boiler shell) ท่อ เตาเผา และวาล์วนิรภัย ก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงที่ได้จากการเผาไหม้ในเตาเผาจะไหลในท่อและ ถ่ายเทความร้อนให้น้ำที่อยู่นอกท่อและภายในเปลือกหม้อไอน้ำ ความดันของไอน้ำถูกควบคุมไม่ให้ สูงเกินไปโดยวาล์วนิรภัยซึ่งจะเปิดออกเพื่อลดความดันของไอน้ำที่สูงเกินไปให้ต่ำลงมาอยู่ในระดับ ที่ปลอดภัย ข้อจำกัดที่สำคัญของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟคือ ขนาดและความดันถูกจำกัดโดยความเค้น

บทที่ 5. หม้อไอน้ำ

้ดึง (tensile stress) สูงสุดที่โลหะของหม้อไอน้ำสามารถทนได้ซึ่งคำนวณจาก

$$\sigma = \frac{pD}{2t} \tag{5.1}$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นดึง p คือ ความดันไอน้ำ D คือ ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของหม้อไอน้ำและ t คือ ความหนาของเปลือกหม้อไอน้ำ ถ้าต้องการผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนกำลังการ ผลิตไอน้ำ (D คงที่) ความหนาของเปลือกหม้อจะต้องเพิ่มเพื่อควบคุมไม่ให้ความเค้นดึงมากเกินไป ความหนาที่เพิ่มขึ้นหมายถึงน้ำหนักและราคาของหม้อไอน้ำที่เพิ่มตามไปด้วย

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำมีหลักการทำงานตรงข้ามกับหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ กล่าวคือ น้ำและไอน้ำ จะไหลในท่อโดยรับความร้อนจากก๊าซเสียที่ไหลนอกท่อและการแผ่รังสีจากเปลวไฟที่เกิดจากการ เผาใหม้เชื้อเพลิง หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำมีข้อได้เปรียบอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อไอน้ำ แบบท่อไฟคือ ความสามารถในการผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงและอัตราการไหลสูง ในการออกแบบ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำให้ทนความดันสูง ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อต้องไม่มากเกินไปและ ความหนาของท่อจะต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นไม่เกินกว่าโลหะของท่อจะ ทนทานได้ ถึงแม้ว่าการจำกัดความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจะจำกัดอัตราการผลิตไอน้ำในท่อ ไปด้วย แต่การเพิ่มอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำสามารกระทำได้โดยการเพิ่มจำนวนท่อ ข้อได้ เปรียบของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำดังกล่าวนี้ทำให้โรงไฟฟ้าผลิตไอน้ำด้วยหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

5.2 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีสองวิธีคือ วิธีความร้อนเข้าออก (input-output method) และวิธีความร้อนสูญเสีย (heat-loss method) วิธีความร้อนเข้าออกใช้สมการ (2.24) ข้อมูลที่ ต้องใช้ในการคำนวณได้แก่ อัตราการไหลของไอน้ำ เอนทัลบีของน้ำป้อน เอนทัลบีของไอน้ำ อัตรา การใหลของเซื้อเพลิงและค่าความร้อนสูงของเซื้อเพลิง วิธีนี้จึงต้องการข้อมูลไม่มาก อย่างไรก็ตาม การวัดอัตราการไหลของเซื้อเพลิงแข็งอาจไม่สะดวก นอกจากนี้วิธีนี้มีข้อเสียเปรียบคือ ไม่ได้ให้ข้อมูล เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

วิธีความร้อนสูญเสียคำนวณการสูญเสียความร้อนด้วยสาเหตุต่าง ๆ (Q_l) แล้วจึงหาค่าประสิทธิภาพ ของหม้อไอน้ำดังนี้

$$\eta_b = 1 - \frac{\dot{Q}_l}{\dot{m}_f.HHV} \tag{5.2}$$

รูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า มีการสูญเสียพลังงานความร้อนไปกับก๊าซเสียและขี้เถ้าที่ไหลออกจากหม้อ ใอน้ำ นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากผิว ของหม้อไอน้ำสู่อากาศแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจึงลดลงจากการสูญเสีย ความร้อนด้วยสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้ การคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำด้วยวิธีความร้อนสูญ เสียต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากกว่าวิธีความร้อนเข้าออก แต่มีข้อได้เปรียบคือ สามารถชี้ให้เห็นแนวทาง การเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้



รูปที่ 5.1: แบบจำลองของหม้อไอน้ำ

สาเหตุของการสูญเสียความร้อนมี 5 ประการ ถ้ากำหนดให้

$$L_i = \frac{\dot{Q}_{l,i}}{\dot{m}_f.HHV} \tag{5.3}$$

เป็นอัตราส่วนระหว่างของค่าความร้อนสูญเสียต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหนึ่งกิโลกรัม ประสิทธิ ภาพของหม้อไอน้ำจะเท่ากับ

$$\eta_b = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) \tag{5.4}$$

การสูญเสียความร้อนทั้ง 5 ประการมีรายละเอียดนี้

 การสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซเสียแห้ง โดยความร้อนส่วนนี้จะทำให้ก๊าซเสียแห้งมีอุณหภูมิ เพิ่มจาก T_a เป็น T_g ถ้าสมมุติว่าก๊าซเสียแห้งเป็นก๊าซในอุดมคติ สมการของการสูญเสียความ ร้อนจากสาเหตุนี้คือ

$$L_1 = \frac{x_{dg}.c_{pg}(T_g - T_a)}{HHV}$$
(5.5)

โดยที่

 x_{dg} คืออัตราส่วนของมวลก๊าซเสียแห้งต่อมวลเชื้อเพลิง

c_{pg} คือความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซเสียแห้ง (ประมาณ 1.1 kJ/kg.°C)

 T_g คืออุณหภูมิของก๊าซเสียแห้งที่ออกจากหม้อไอน้ำ

 T_a คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

มวลของก๊าซเสียแห้งคำนวณได้จาก

$$m_{dg} = m_{fuel} + m_{air} - m_A - m_{uc} - m_{H_2O} \tag{5.6}$$

มวลของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้คำนวณจากสมการ (4.31) ดังนั้น

$$m_{dg} = m_{fuel} \left(1 + AFR_A - x_A - \frac{x_{Ca}x_A}{1 - x_{Ca}} - x_M - 9x_H \right)$$
(5.7)

 x_{dg} เท่ากับ m_{dg} หารด้วย m_{fuel}

$$x_{dg} = 1 + AFR_A - x_A - \frac{x_{Ca}x_A}{1 - x_{Ca}} - x_M - 9x_H$$
(5.8)

 การสูญเสียความร้อนไปกับความชื้นในก๊าซเสีย โดยความร้อนส่วนนี้จะทำให้ความชื้นกลาย เป็นไอน้ำอุณหภูมิสูงออกไปกับก๊าซเสีย ความชื้นก๊าซเสียบางส่วนมาจากความชื้นในเชื้อ เพลิงและ H ในเชื้อเพลิงซึ่งทำปฏิกิริยากับ O เป็นน้ำ ทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความ ร้อน

$$L_2 = \frac{(x_M + 9x_{H,ar})[2442 + c_{pv}(T_g - T_a)]}{HHV}$$
(5.9)

โดยที่ c_{pv} คือความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของไอน้ำ (ประมาณ 1.9 kJ/kg.°C) และ 2442 kJ/kg คือ ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C โปรดสังเกตว่าสัดส่วน โดยมวลของ H ในที่นี้คือสัดส่วนโดยมวลตามฐานเชื้อเพลิงในสภาพเดิมเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ เป็นฐานการคำนวณหาประสิทธิภาพมีทั้งความชื้นและเถ้า

 การสูญเสียความร้อนไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อาจจะทำให้ได้ขึ้ เถ้าที่ประกอบด้วยเถ้าและคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ โดยทั่วไปขึ้เถ้าจะถูกนำไปทิ้ง ดังนั้นการมี คาร์บอนในขึ้เถ้าจึงนับเป็นการสูญเสียความร้อนโดยเปล่าประโยชน์ สมการของการสูญเสีย ความร้อนจากสาเหตุนี้คือ

$$L_3 = \frac{x_{uc}.HHV_C}{HHV} \tag{5.10}$$

โดยที่ x_{uc} คือ อัตราส่วนของ มวล คาร์บอนที่ เหลือ จาก การ เผา ไหม้ ต่อ มวล เชื้อ เพลิง และ HHV_C คือ ค่าความร้อนของคาร์บอน (32800 kJ/kg)

 การสูญเสียความร้อนไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย ก๊าซเสียที่มี CO สามารถนำไป เผาไหม้เพื่อให้ความร้อนได้ แต่ในทางปฏิบัติ ก๊าซเสียจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศ สมการ การสูญเสียความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L_4=rac{ extsf{l} extsf{l}$$

โดยที่ x_{cb} คือสัดส่วนของมวลคาร์บอนที่เผาไหม้ต่อมวลเชื้อเพลิง น้ำหนักโมเลกุลของ CO (M_{CO}) เท่ากับ 28 น้ำหนักโมเลกุลของ C (M_C) เท่ากับ 12 และ ค่า ความ ร้อนของ CO (HHV_{CO}) เท่ากับ 10080 kJ/kg

5. การสูญเสียความร้อนไปกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างหม้อไอน้ำกับสิ่งแวดล้อมโดยการพา ความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน การสูญเสียพลังงานด้วยสาเหตุนี้ขึ้นกับอุณหภูมิผิวและ พื้นที่ผิวของหม้อไอน้ำ อุณหภูมิผิวมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ว่าอัตราการผลิตไอน้ำจะลดลง ดัง นั้นการสูญเสียพลังงานด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนมีสัดส่วนที่ผกผันกับ อัตราการผลิตไอน้ำเช่น สัดส่วนการสูญเสียพลังงานจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวถ้าอัตราการผลิตไอน้ำ ลดลงครึ่งหนึ่ง การประมาณค่าความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนนี้อาจใช้สมการ ต่อไปนี้

$$L_5 = \frac{\dot{m}_{s,max} 100(L_5)_{100\%}}{\dot{m}} \tag{5.12}$$

$$(L_5)_{100\%} = \frac{0.066}{\dot{m}_{s,max}^{0.42}} \tag{5.13}$$

โดยที่ m_{s,max} คืออัตราการผลิตไอน้ำสูงสุดเป็น kg/s

ตัวอย่าง หม้อไอน้ำใบหนึ่งมีกำลังการผลิตไอน้ำ 200 ton/h แต่ผลิตไอน้ำเพียง 170 ton/h ที่ ความดัน 4 MPa และอุณหภูมิ 427°C โดยน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิ 124°C และถ่านหินที่ ประกอบด้วย C 36%, H 3%, O 8%, N 2.8%, ความขึ้น 36% และเถ้า 14.2% ถ่านหินนี้เผาไหม้กับ อากาศที่มีอุณหภูมิ 27°C จากการวิเคราะก๊าซเสียแห้งพบว่ามี CO₂ 11.94%, CO 0.43% และ O₂ 7.03% โดยปริมาตร นอกจากนี้พบว่า ในขี้เถ้ามีคาร์บอน 8% โดยมวล ถ้าก๊าซเสียมีอุณหภูมิ 167°C จงคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

<u>[วิธีทำ]</u> สัดส่วนของ N₂ ในก๊าซเสียแห้งคือ

 $y_{N_2} = 1 - 0.1194 - 0.0703 - 0.0043 = 0.806$

อัตราส่วนของคาร์บอนที่เผาไหม้ต่อเชื้อเพลิงคำนวณจากสมการ (4.32)

$$x_{cb,daf} = 0.36 - \left(\frac{0.08 \times 0.142}{(1 - 0.08)(1 - 0.36 - 0.142)}\right)$$

= 0.335

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงคำนวณจากสมการ (4.30)

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left[\frac{28 \times 0.335 \times 0.806}{12(0.1194 + 0.0043)} - 0.028 \right]$$
$$= 6.6$$

อัตราส่วนของก๊าซเสียแห้งต่อเชื้อเพลิงคำนวณจากสมการ (5.8)

$$x_{dg} = 1 + 6.6 - 0.142 - 0.012 - 0.36 - 9 \times 0.03$$
$$= 6.82$$

ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงคำนวณจากสมการ (4.22)

$$HHV = 33700(0.36) + 144200\left(0.03 - \frac{8}{8}\right) + 9300(0)$$

= 15016 kJ/kg

การสูญเสียความร้อนให้ก๊าซเสียแห้งคำนวณจากสมการ (5.5)

$$L_1 = \frac{7.08 \times 1.1 \times (167 - 27)}{15016}$$
$$= 0.07$$

การสูญเสียความร้อนสูญเสียให้ความชื้นในก๊าซเสียคำนวณจากสมการ (5.9)

$$L_2 = \frac{(0.36 + 9 \times 0.03)[2442 + 1.9(167 - 27)]}{15016}$$

= 0.114

การสูญเสียความร้อนจากคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้คำนวณจากสมการ (5.10)

$$L_3 = \frac{(0.36 - 0.348) \times 32800}{15016}$$
$$= 0.026$$

การสูญเสียความร้อนจาก CO ในก๊าซเสียคำนวณจากสมการ (5.11)

$$L_4 = \frac{28 \times 0.43 \times 0.348 \times 10080}{12(0.43 + 11.94) \times 15016}$$
$$= 0.019$$

82

การสูญเสียความร้อนไปกับการถ่ายเทความร้อนคำนวณจากสมการ (5.12)

 $L_5 = \frac{200 \times 0.066}{170(200 \times 1000/3600)^{0.42}}$ = 0.012

แทนค่า L_1 ถึง L_5 ที่คำนวณได้ ในสมการ (5.4)

$$\eta_b = 1 - 0.07 - 0.114 - 0.026 - 0.019 - 0.012$$
$$= 0.759$$

5.3 หลักการทำงานของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นสองแบบคือ หม้อไอน้ำแบบมีถังพักไอน้ำ (drum-type boiler) และหม้อไอน้ำแบบไหลผ่านครั้งเดียว (once-through boiler) รูปที่ 5.2 แสดงส่วนประกอบที่ สำคัญของหม้อไอน้ำแบบแรกซึ่งได้แก่ เตาเผาและเครื่องระเหย (F), ถังพักไอน้ำ (SD), เครื่องทำไอ น้ำยวดยิ่ง (SH), เครื่องให้ความร้อนซ้ำ (RH), เครื่องประหยัดเชื้อเพลิง (ECO) และเครื่องอุ่นอากาศ (AH) โปรดสังเกตว่า เครื่องระเหย (evaporator) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของหม้อไอน้ำไม่ได้อยู่ใน รูปที่ 5.2

การเผาใหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาจะทำให้ได้ความร้อนปริมาณมาก ความร้อนส่วนหนึ่งถ่ายเทให้ แก่ท่อน้ำซึ่งอยู่ที่ผนังของเตาเผาและทำให้น้ำในท่อกลายเป็นไอ แต่น้ำทั้งหมดไม่ได้กลายเป็นตรง ทางออกจากเตาเผา ดังนั้นสภาวะ 4 จึงเป็นของผสมของไอน้ำอิ่มตัวกับน้ำอิ่มตัว ของผสมน้ำจะ แยกเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่สภาวะ 5 และน้ำอิ่มตัวที่สถาวะ 3 ซึ่งจะไหลกลับไปที่เครื่องระเหยในเตาเผา ก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาที่สภาวะ c มีอุณหภูมิสูง การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซเสียกับไอน้ำใน เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทำให้ไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยวดยิ่งที่สภาวะ 6 ไอน้ำอิ่มตัวจะไหลไปยัง กังหันไอน้ำ บางส่วนจะไหลกลับเข้าหม้อไอน้ำที่สภาวะ 7 อุณหภูมิของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็นสภาวะ 8 เมื่อได้รับการถ่ายเทความร้อนโดยก๊าซเสียในเครื่องให้ความร้อนซ้ำ ก๊าซเสียจะถ่ายเทความร้อนให้ แก่น้ำป้อนในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงและอากาศในเครื่องขุ่นอากาศก่อนที่ก๊าซเสียจะระบายออกสู่ วิ่งแวดล้อมที่สภาวะ d อุณหภูมิของน้ำป้อนจะเพิ่มขึ้นจากสภาวะ 1 เป็นสภาวะ 2 ในเครื่องประหยัด เชื้อเพลิง อุณหภูมิของอากาศจะเพิ่มขึ้นจากสภาวะ a เป็นสภาวะ b ในเครื่องอุ่นอากาศ น้ำป้อน ที่ออกจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงจะไหลเข้าถังพักไอน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำในถังพักไอน้ำให้คงที่ อากาศที่ออกจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงจะไหลเข้าถึงพักไอน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำในถังพักไอน้ำให้คงที่

หม้อไอน้ำแบบไหลผ่านครั้งเดียวใช้งานในวัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤต ถึงแม้ว่าหม้อไอน้ำแบบ นี้จะมีค่าก่อสร้างสูงกว่าหม้อไอน้ำแบบมีถังพักไอน้ำ แต่วัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤตมีประสิทธิภาพ สูงกว่าวัฏจักรแรงคินแบบธรรมดา จึงอาจมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้า ที่ทำงานด้วยวัฏจักรแรงคินเหนือวิกฤต ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อไอน้ำแบบไหลผ่านครั้งเดียว



รูปที่ 5.2: ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อไอน้ำแบบมีถังพักไอน้ำ

คล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 5.2 แต่ไม่มีถังพักไอน้ำ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำแบบ ใหลผ่านครั้งเดียวเป็นกลุ่มท่อที่มีไอน้ำและน้ำไหลภายใน น้ำจะค่อย ๆ เปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ จากการไหลผ่านเครื่องระเหยซึ่งได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน ไอ น้ำที่ออกจากเครื่องระเหยอาจมีความชื้นปะปน จึงต้องมีเครื่องแยกไอน้ำ (steam separator) ซึ่งทำ หน้าที่แยกความชื้นออกจากไอน้ำก่อนที่ไอน้ำแห้งซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง หม้อ ไอน้ำแบบไหลผ่านครั้งเดียวต้องการน้ำป้อนที่มีการเจือปนของเกลือแร่น้อยมากเนื่องจากเกลือแร่จะ ตกค้างอยู่ภายในเครื่องและจะทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตไอน้ำถดถอยลง

5.4 เตาเผาและเครื่องระเหย

เตาเผาทำหน้าที่ผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยความร้อนส่วนหนึ่งจะ ถ่ายเทสู่เครื่องระเหยซึ่งติดตั้งอยู่ที่ผนังของเตาเผาโดยการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนส่วนที่เหลือ จะอยู่ในก๊าซเสียอุณหภูมิสูงที่ไหลออกจากเตาเผา นอกจากนี้เตาเผายังทำหน้าที่สะสมขี้เถ้าไว้ที่ ด้านเตาเผาก่อนถูกเคลื่อนย้ายออกไป การออกแบบเตาเผาต้องคำนึงถึงลักษณะขี้เถ้าที่เกิดขึ้นว่าจะ หลอมเหลวที่อุณหภูมิได

ผนังของเตาเผามีทั้งวัสดุทนไฟ (refractory) และท่อน้ำเล็ก ๆ หลายท่อวางเรียงกันในแนวตั้ง เรียกว่าผนังน้ำ (water wall) รูปที่ 5.3 แสดงโครงสร้างโดยคร่าว ๆ ของผนังน้ำ ท่อหลายท่อเรียงตัว เป็นแถวและเชื่อมต่อด้วยเมมเบรน (membrane) ซึ่งทำจากโลหะ แถวของท่อวางชิดกับวัสดุทนไฟ ผนังน้ำทำให้ความร้อนจากการแผ่รังสีมาถึงวัสดุทนไฟน้อยลงซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุ ทนไฟ ความร้อนที่ดูดกลืนโดยผนังน้ำทำให้น้ำในท่อกลายเป็นไอ ดังนั้นผนังน้ำจึงทำหน้าที่เป็นเครื่อง ระเหย น้ำอิ่มตัวไหลเข้าเครื่องระเหยทางด้านล่างและไอน้ำปนน้ำไหลออกทางด้านบน



รูปที่ 5.3: โครงสร้างของผนังน้ำ

้น้ำที่ไหล เข้าท่อ จะ เปลี่ยนสถานะ ตลอดการ ไหล เนื่องจากท่อ ได้ รับ ความ ร้อน จากการแผ่รังสี ้ความร้อนของเปลวไฟ ก๊าซร้อน เขม่าและขึ้เถ้าในเตาเผา สถานะของน้ำเป็นของเหลุวอิ่มตัวตรุง ้ทางเข้าท่อและจะกลายเป็นน้ำผุสมไอน้ำจากการได้รับความร้อนโดยสัดส่วนของไอน้ำจะเพิ่มขึ้น ี้เรื่อย ๆ ตามทิศทางการไหลของน้ำ รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่า ความร้อนที่น้ำได้รับทำให้รูปแบบการ ใหลของน้ำเปลี่ยนแปลงตลอดการไหล การไหลผ่านท่อที่ได้รับความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 5 ้ช่วง ในช่วงแรกน้ำยังไม่เปลี่ยนสถานะเป็นไอเรียกว่าช่วงการพาความร้อน (convection) เมื่อไหลไป ระยะหนึ่งจะเริ่มเกิดฟองไอน้ำในของเหลวโดยที่ฟองเริ่มก่อตัวที่ผนังท่อ ช่วงการไหลนี้เรียกว่าการ ใหลพร้อมฟองไอ (bubbly flow) ขนาดของฟองไอจะใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งฟองไอรวมตัวกัน ้เป็นก้อนไอและการไหลจะเป็นการไหลพร้อมก้อนไอ (slug flow) เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะเพิ่มขึ้นอีก การใหลจะกลายเป็นการใหลแบบวงแหวน (annular flow) ซึ่งเป็นการไหลที่มีฟิล์มของเหลวไหลชิด ้ ผนังท่อและมีไอไหลที่แกนของท่อขนานกับของเหลว ไอในช่วงนี้จะไหลด้วยความเร็วสูงซึ่งทำให้การ เปลี่ยนสถานะเป็นไอเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและส่งผลให้ฟิล์มของเหลวบางลงตามทิศทางการไหล ใน ที่สุดของเหลวจะระเหยจนหมด ช่วงการไหลสุดท้ายจึงเป็นการไหลพร้อมละออง (mist flow) รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ในทิศทางของการไหล h จะเพิ่ม ขึ้นในช่วงแรก การเพิ่มจะรวดเร็วที่สุดในช่วงการไหลพร้อมก้อนไอ และจะช้าลงในช่วงการไหลแบบ ้วงแหวน แต่เมื่อฟิล์มของเหลวเหือดแห้งไปหมดในช่วงท้ายของช่วงการไหลแบบวงแหวน h จะลดลง อย่างรวดเร็ว และมีค่าน้อยตลอดการไหลพร้อมละอองุ

ถึงแม้ว่าหน้าที่ของเครื่องระเหยคือ การผลิตไอน้ำ แต่การปล่อยให้การไหลอยู่ในช่วงการไหล พร้อมละอองเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเนื่องจากค่า h ในช่วงการไหลนี้ต่ำมาก ความร้อนที่สะสมในท่อ เป็นผลต่างระหว่างความร้อนที่ท่อได้รับกับการพาความร้อนจากท่อสู่น้ำในท่อบวกกับ ความร้อนที่ สะสมในท่อส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของท่อ ถ้าการพาความร้อนมีค่าน้อยเกินไป อุณหภูมิของท่อ อาจเพิ่มขึ้นจนทำให้ท่อเสียหายได้ ดังนั้นจึงควรออกแบบเครื่องระเหยให้ค่า h เฉลี่ยซึ่งแปรผันตาม ค่าการพาความร้อนในท่อมีค่ามากพอไม่มีช่วงการไหลพร้อมละออง ผลที่ตามมาคือ ไอน้ำที่ไหลออก จากเครื่องระเหยจะไม่ใช่ไอน้ำแห้งแต่มีความชื้นปนอยู่ซึ่งทำให้ต้องมีการแยกความชื้นออกจากไอน้ำ ก่อนส่งไอน้ำอิ่มตัวไปยังเครื่องทำใชน้ำยวดยิ่ง



รูปที่ 5.4: ลักษณะการไหลของน้ำภายในท่อของเครื่องระเหย

5.5 ถังพักไอน้ำ

ถังพักไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานภายใต้ความสูง (pressure vessel) ขนาดและความหนาของถัง พักไอน้ำจึงต้องออกแบบเพื่อให้ความเค้นดึงตามสมการ (5.1) ไม่เกินความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้สร้าง ถังพักไอน้ำ โดยทั่วไปถังพักไอน้ำมีรูปทรงกระบอกซึ่งมีความยาวมากกว่า 30 m เส้นผ่าศูนย์กลาง ยาวกว่า 4.5 m อาจมีท่อต่อมากกว่า 30 ท่อ ท่อต่อบางท่อต่อกับท่อน้ำขึ้น (riser) ซึ่งทำหน้าที่ส่งไอน้ำ ที่ปนกับน้ำเข้าถังพักไอน้ำ ท่อต่อที่เหลือต่อกับท่อน้ำลง (downcomer) ซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำอิ่มตัวกลับ ไปที่เครื่องระเหย รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นการไหลเวียนของน้ำในวงจรที่ผ่านถังพักไอน้ำ ถังพักไอน้ำ แยกไอน้ำอิ่มตัวออกมา การไหลเข้าของน้ำป้อนที่มาจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงจะรักษาปริมาณน้ำ ในถังพักไอน้ำให้คงที่

จากน้ำอิ่มตัวในวงจรการไหลเวียนของน้ำ โดยไอน้ำอิ่มตัวจะถูกส่งต่อไปที่เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง ผ่านถังพักไอน้ำ

ไอน้ำยแยกออกจากน้ำโดยธรรมชาติเนื่องจากไอน้ำจะลอยขึ้นส่วนบนของถังพักไอน้ำและน้ำจะ อยู่ส่วนล่าง วิธีนี้เหมาะสมกับกรณีที่อัตราการผลิตไอน้ำต่ำและความดันของถังพักไอน้ำไม่สูงมาก นัก แต่การแยกไอน้ำออกจากน้ำจะต้องใช้วิธีเชิงกลถ้าต้องการอัตราการผลิตไอน้ำที่สูงและถังพักไอ น้ำมีความดันสูง วิธีนี้สองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การแยกไอน้ำออกจากน้ำ ขั้นตอนที่สองคือ การ แยกละอองน้ำที่ปะปนกับไอนู้ำออกมาซึ่งทำให้ได้ไอน้ำแห้ง

รูปที่ 5.6 แสดงถังพักไอน้ำที่ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) และะตะแกรง (screen) ไอน้ำมีความสามารถ ในการไหลอ้อมแผ่นกั้น แต่น้ำจะถูกดักด้วยแผ่นกั้นเพราะน้ำมีความเนื่อยสูง ดังนั้นแผ่นกั้นจึงใช้แยก ไอน้ำออกจากน้ำได้ ไอน้ำที่ไหลผ่านแผ่นกั้นจะเป็นไอน้ำแห้งส่วนใหญ่ แต่ก็จะมีละอองน้ำขนาดเล็ก 5.5. ถังพักไอน้ำ



รูปที่ 5.5: วงจรการไหลเวียนของน้ำและไอน้ำผ่านถังพักไอน้ำ

ปะปนมาด้วย ละอองน้ำเหล่านี้มีเกลือแร่ละลายปนอยู่ด้วย ละอองน้ำที่ออกจากถังพักไอน้ำพร้อม กับไอน้ำไปยังเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งจะทำให้เกิดคราบเกลือบนผิวของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง คราบ เกลือจะทำให้ท่อของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งนำความร้อนแย่ลง ถ่ายเทความร้อนสู่ไอน้ำได้น้อยลง และทำให้ท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าหากอุณหภูมิท่อสูงเกินไปท่อก็จะเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการ แยกละอองน้ำออกจากไอน้ำโดยใช้ตะแกรงซึ่งประกอบด้วยโครงตาข่ายของเส้นลวดหลายชั้น แต่ละ ชั้นสามารถดึงดูดและขัดขวางการไหลผ่านของละอองน้ำได้ เมื่อน้ำสะสมที่ตะแกรงมีปริมาณมากก็ จะหยดลงกลับคืนสู่ถังพักไอน้ำ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความดันในถังพักไอน้ำสูงมาก ความแตก ต่างระหว่างความหนาแน่นของไอน้ำและน้ำเดือดจะน้อยมาก แผ่นกั้นอาจทำหน้าที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้แรงหนีศูนย์กลางมาช่วยแยกไอน้ำจากน้ำ อุปกรณ์ที่ทำงานโดยหลักการนี้คือ เครื่องแยก แบบไซโคลน (cyclone separator) ของผสมระหว่างไอน้ำกับละอองน้ำจะไหลเข้าสู่เครื่องแยกและ จะไหลวนในเครื่อง น้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าไอน้ำถูกเหวี่ยงไปกระทบผนังของเครื่องแยกและ จะไหลวนในเครื่อง น้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าไออง้ำถูกเหวี่ยงไปกระทบผนังของเครื่องแยกและ จะไหลวนในเครื่อง น้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าไอน้ำถูงกำดักที่สำคัญของถังพักไอน้ำคือ ความ สามารถในการแยกไอน้ำออกจากน้ำลดลงเมื่อความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้น ถังพักไอน้ำคือ ความ สามารถในการแยกไอน้ำออกจากน้ำลดลงเมื่อหวางดันของไอน้ำเพิ่มขึ้ง ถังพักไอน้ำคุณหวิมสามารถ ทำงานได้ถ้าความดันมากกว่าความดันวิกฤต (22.1 MPa)

น้ำและไอน้ำที่ไหลเข้าออกถังพักไอน้ำมีอัตราการไหลน้อยกว่าอัตราการไหลเวียนของน้ำและ ไอน้ำในท่อน้ำลงและท่อน้ำขึ้นค่อนข้างมาก ภายในท่อน้ำลงมีแต่น้ำอิ่มตัวและภายในท่อน้ำขึ้นมี ไอน้ำผสมกับน้ำ สถานะของน้ำที่แตกต่างในท่อน้ำลงและท่อน้ำขึ้นทำให้มีความแตกต่างกันของ ความหนาแน่นในท่อน้ำลง (ρ_d) และความหนาแน่นเฉลี่ยในท่อน้ำขึ้น (ρ_r) ซึ่งนำไปสู่ความดันขับ เคลื่อน (Δp) สำหรับการไหลเวียนของน้ำ โดย Δp แปรผันตามความสูงของถังพักไอน้ำจากระดับพื้น (H) และ $\rho_d - \rho_r$ ระบบที่มีการไหลเวียนแบบนี้เรียกว่า ระบบไหลเวียนแบบแบบธรรมชาติ (natural circulation)

87



ท่อน้ำขึ้นและท่อน้ำลงมีความดันสูญเสีย ระบบไหลเวียนแบบแบบธรรมชาติจะทำงานได้ก็ต่อ เมื่อความดันขับเคลื่อนมีค่ามากพอที่จะเอาชนะการสูญเสียความดันรวมในระบบ การเพิ่มความ ขับเคลื่อนอาจทำได้โดยเพิ่ม H เพิ่ม ρ_r ด้วยการเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในท่อน้ำขึ้น หรือลด ρ_d ด้วย การลดปริมาณฟองอากาศในท่อน้ำลง ฟองอากาศมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและจะลอยขึ้นไปขัด ขวาง ดังนั้นผลดีอีกประการหนึ่งของการลดปริมาณฟองอากาศคือ การไหลในท่อน้ำลงสะดวกขึ้น วิธี เหล่านี้ต่างก็มีข้อจำกัด H ถูกจำกัดโดยค่าใช้จ่ายในการวางระบบท่อ ρ_r ถูกจำกัดโดยปริมาณไอน้ำ ที่ออกจากท่อน้ำขึ้น และ ρ_d ถูกจำกัดโดยค่าใช้จ่ายในการวางระบบท่อ ρ_r ถูกจำกัดโดยปริมาณไอน้ำ เหล่านี้ต่างก็มีข้อจำกัด H ถูกจำกัดโดยค่าใช้จ่ายในการวางระบบท่อ ρ_r ถูกจำกัดโดยปริมาณไอน้ำ ที่ออกจากท่อน้ำขึ้น และ ρ_d ถูกจำกัดโดยค่าความหนาแน่นของน้ำอิ่มตัวในกรณีที่ไม่มีฟองอากาศใน ท่อน้ำลงเลย การลดความดันสูญเสียในระบบอาจทำได้โดยเพิ่มความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ น้ำลงซึ่งทำให้ความหนาของท่อต้องเพิ่มตามไปด้วย อย่างไรก็ตามระบบไหลเวียนแบบธรรมชาติมี ประสิทธิผลลดลงเมื่อความดันสูงเสียในระบบอาจทำได้โดยเพิ่มความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ระบบไหลเวียนแบบบังคับ (forced circulation) ซึ่งใช้เครื่องสูบที่ติดตั้งที่ท่อน้ำลงเพิ่มความดันขับ เคลื่อนให้ระบบ ถึงแม้ว่าระบบนี้ มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องสูบ แต่ก็มีข้อได้เปรียบที่ H มีค่าลด ลงได้และทำให้สามารถใช้ท่อน้ำลงมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงและความหนาลดลงเมื่อเทียบ กับระบบไหลเวียนแบบธรรมชาติ

5.6 การถ่ายน้ำออก

น้ำป้อนที่ไหลเข้าถังพักไอน้ำจะต้องถูกกำจัดเอาสิ่งเจือปนออกเสียก่อนเพื่อจะได้ไม่มีสารตกค้าง ในถังพักไอน้ำ น้ำป้อนมักจะปราศจากสารแขวนลอย อย่างไรก็ตามน้ำป้อนมักจะมีเกลือแร่ละลาย ปะปนอยู่ การวัดความเข้มข้นของสารละลายอาจใช้หน่วย ppm (part per million) ซึ่งหมายถึงหนึ่ง ส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายหนึ่งล้านส่วนของน้ำ การไหลออกของไอน้ำตลอดเวลาทำให้ความ เข้มข้นของสารละลายในน้ำที่เหลืออยู่ในถังพักไอน้ำจึงเพิ่มขึ้นตลอดเวลาเช่นกัน การถ่ายน้ำออก (blowdown) และทดแทนด้วยน้ำป้อนใหม่จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมไม่ให้ความเข้มข้นสูงเกิน ไป

การถ่ายน้ำออกอาจกระทำอย่างต่อเนื่อง (continuous blowdown) หรือกระทำเป็นช่วง ๆ (intermitten blowdown) การถ่ายน้ำออกอย่างต่อเนื่องมีข้อได้เปรียบหลายประการเช่น ปริมาณสารละ-ลายมีค่าคงที่ ระดับน้ำในถังพักไอน้ำคงที่ อัตราการไหลของน้ำคงที่ซึ่งทำให้เครื่องสูบขนาดเล็ก และ ระบบควบคุมมีความซับซ้อนน้อยกว่า ปริมาณน้ำที่ถ่ายออกสามารถคำนวณได้จากการทำสมดุล มวลของสารละลายในน้ำป้อน รูปที่ 5.7 แสดงการไหลเข้าออกในถังพักไอน้ำโดยไม่พิจารณาการไหล ในท่อน้ำขึ้นและท่อน้ำลงเนื่องจากการไหลเวียนภายในระบบไม่ส่งผลต่อสมดุลมวลของสารละลาย ถ้ากำหนดให้ x_d เป็นความเข้มข้นของสารละลายในถึงพักไอน้ำ x_w เป็นความเข้มข้นของสารละลาย ในน้ำป้อน x_s เป็นความเข้มข้นของสารละลายในไอน้ำที่ออกจากถังพักไอน้ำ และ m_s เป็นอัตราการ ไหลของไอน้ำ อัตราการไหลของน้ำถ่ายออก (m_b) จะมีค่าดังนี้

$$\dot{m}_b = \dot{m}_s \left(\frac{x_w - x_s}{x_d - x_w} \right) \tag{5.14}$$

โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารแปลกปลอมในไอน้ำมีค่าน้อยมาก ($x_s=0$) สมการ (5.14) กลายเป็น

$$\dot{m}_b = \dot{m}_s \left(\frac{x_w}{x_d - x_w}\right) \tag{5.15}$$

การถ่ายน้ำออกเป็นช่วง ๆ ทำให้อัตราการถ่ายน้ำออกมีค่าเท่ากับ m_b ในช่วงเวลา d และจะไม่มี การถ่ายน้ำออกในช่วงเวลาที่เหลือ (t) ผลที่ตามมาคือ ความเข้มข้นของสารละลายในถังพักไอน้ำมี ค่าเพิ่มขึ้นจาก x_{d1} เป็น x_{d2} ในช่วงเวลาที่ไม่มีการถ่ายน้ำออกและมีค่าลดลงจาก x_{d2} เป็น x_{d1} ใน ช่วงเวลาที่มีการถ่ายน้ำออกดังแสดงในรูปที่ 5.8 อัตราการถ่ายน้ำออกคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_s(x_w - x_s)(d+t)}{[0.5(x_{d1} + x_{d2}) - x_w]d}$$
(5.16)

ในกรณีที่ t=0 การถ่ายน้ำจะเป็นแบบต่อเนื่องและ $x_{d1}=x_{d2}=x_d$ สมการ (5.16) จะกลายเป็น สมการ (5.14)



รูปที่ 5.8: การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายน้ำออกและความเข้มข้นของสารแปลกปลอมในการ ถ่ายน้ำออกเป็นช่วง ๆ

5.7 เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำ

เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำเป็นกลุ่มท่อที่มีไอน้ำไหลภายในท่อและก๊าซเสีย ใหลภายนอกท่อ ไอน้ำได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีหรือการพาความร้อนจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิ สูงผ่านท่อซึ่งทำดวยโลหะที่สามารถนำความร้อนได้ดี เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้ ไอน้ำอิ่มตัวจากถังพักไอน้ำกลายเป็นไอน้ำยวดยิ่ง เครื่องให้ความร้อนซ้ำทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้ น้ำที่สูญเสียเอนทัลปีบางส่วนไปในเครื่องกังหันไอน้ำก่อนไหลกลับเข้าไปยังเครื่องกังหันไอน้ำอีกครั้ง เครื่องให้ความร้อนซ้ำมักพบในโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 100 MW และไม่คุ้มค่าแก่การติด ตั้งในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งจะมีเพียงเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง

การจำแนกเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งอาจกระทำได้โดยพิจารณาลักษณะการถ่ายเทความร้อน เครื่อง

ทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับรังสีความร้อน (radiant superheater) ติดตั้งอยู่เหนือเตาเผาเพื่อรับการแผ่รังสี จากเปลวไฟและอนุภาคที่ลุกโซนและมีอุณหภูมิสูง เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับการพาความร้อน (convective superheater) ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่การแผ่รังสีความร้อนไปไม่ถึง จึงได้รับความร้อน โดยการพาจากก๊าซเสียที่ไหลออกมาจากเตาเผา เครื่องให้ความร้อนซ้ำมักติดตั้งถัดจากเครื่องทำไอ น้ำยวดยิ่งแบบรับการพาความร้อน ดังนั้นเครื่องให้ความร้อนซ้ำจึงได้รับความร้อนจากการพาความ ร้อนเช่นกัน

สิ่งสำคัญที่ ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและ เครื่องให้ความร้อนซ้ำคือ ความสามารถในการทนอุณหภูมิและความดัน ความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงของเครื่องทำไอ น้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำขึ้นกับโลหะที่ใช้ทำท่อโดยโลหะที่ทนอุณหภูมิได้สูงกว่าย่อมจะมี ราคาแพงกว่า การออกแบบท่อของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำเพื่อลดอุณหภูมิ ของท่อจะสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านวัสดุได้ รูปที่ 5.9 แสดงการไหลของก๊าซเสียผ่านท่อ และไอน้ำในท่อสองแบบ แบบแรกเป็นการไหลแบบขนานกัน (parallel-flow) แบบที่สองเป็นการไหล แบบสวนทางกัน (counter-flow) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำภายในท่อและของก๊าซ เสียภายนอกท่อมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุณหภูมิของท่อจึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิไอน้ำกับอุณหภูมิก๊าซเสีย รูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าการไหลแบบขนานกันทำให้อุณหภูมิของ ท่อต่ำกว่าการไหลแบบสวนทางกัน อย่างไรก็ตามการไหลแบบขนานกันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน ด้อยกว่าการไหลแบบสวนทางกัน กรเลือกรูปแบบการไหลของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ ความร้อนซ้ำจึงต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของท่อควบคู่กับประสิทธิมลของการแลกเปลี่ยนความร้อน

ท่อของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำได้รับการออกแบบให้ทนความดันสูง ได้ตามสมการ (5.1) ในกรณีที่หม้อไอน้ำได้รับการเพิ่มสมรรถนะให้ทำงานที่ความดันสูงขึ้น ท่อของ เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำจะต้องถูกเปลี่ยนให้สามารถทนความดันที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามท่อที่มีขนาดเล็กซึ่งทนความดันได้สูง และมีพื้นที่มากในการรับความร้อนมีข้อเสีย เปรียบเนื่องจากความดันสูญเสียของไอน้ำที่ไหลในท่อจะเพิ่มขึ้นตามความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของ ท่อที่ลดลง ปัจจัยเหล่านี้จึงต้องนำมาพิจารณาในการเลือกขนาดท่อ ถ้าเปรียบเทียบท่อของเครื่องทำ ไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำ จะพบว่าไอน้ำในเครื่องให้ความร้อนซ้ำมีความดันต่ำกว่าไอ น้ำในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง ดังนั้นท่อเครื่องให้ความร้อนซ้ำจึงทนกับความเค้นที่ต่ำกว่าและสามารถ มีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางที่มากกว่าเพื่อลดการสูญเสียความดันไอน้ำที่ไหลผ่าน นอกจากนี้เครื่อง ให้ความร้อนซ้ำยังสามารถทนอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง อุณหภูมิไอน้ำที่ออกจากเครื่อง ให้ความร้อนซ้ำจึงอาจสูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำที่ออกจากเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง 20°C ถึง 30°C

การที่เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำทำงานที่อุณหภูมิสูงมากทำให้มีโอกาสที่ขึ เถ้าจะหลอมเหลวและไปเกาะที่ผิวของท่อ โรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินที่มีสัดส่วนของเถ้ามากและอุณหภูมิ เถ้าหลอมเหลวต่ำมักประสบปัญหาดังกล่าว ขึ้เถ้ามีค่าการนำความร้อนต่ำและกลายเป็นฉนวน ความร้อนซึ่งจะลดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเสียสู่ไอน้ำและเพิ่มอุณหภูมิของท่อ การป้องกัน การสะสมของขึ้เถ้าหลอมเหลวเป็นเรื่องยาก แต่มีอุปกรณ์ที่สามารถลดการสะสมของขึ้เถ้าได้คือ



รูปที่ 5.9: การไหลแบบขนานกันและการไหลแบบสวนทางกันในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ ความร้อนซ้ำ

เครื่องเป่าฝุ่น (soot blower) ท่อของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำที่มีจำนวนหลาย ท่อมักวางระยะห่างที่มากพอที่จะทำให้เครื่องเป่าฝุ่นทำงานอย่างสะดวกโดยระยะห่างระหว่างท่อจะ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของก๊าซเสีย นอกจากนี้ท่อเหล่านี้มักเป็นท่อเรียบเพื่อให้การกำจัดขึ้เถ้าเป็นไป อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าท่อที่มีครีบจะมีประสิทธิผลสูงกว่าในการแลกเปลี่ยนความร้อนแต่มี ความลำบากในการกำจัดขึ้เถ้าที่สะสมที่ครีบด้วยเครื่องเป่าฝุ่น

5.8 การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำ

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของไอน้ำที่ออกจากเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งเข้าสู่เครื่องกังหันจะถูกออกแบบให้ มีค่าเหมาะสมที่สุด แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิไอน้ำจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เตาเผา อัตราการผลิตไอน้ำ ความดันไอน้ำ ปริมาณอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ชนิดของ เชื้อเพลิง อุณหภูมิของน้ำป้อน ความสะอาดของผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบ เป็นต้น ถ้าปล่อยให้หม้อไอน้้ำทำงานโดยปราศจากการควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิไอน้ำก็อาจจะขึ้นลงใน ช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ ซึ่งการจำกัดให้อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจนส่งผลเสียอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ รวมทั้งเครื่องกังหัน หมายถึงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ต่ำลง อันเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากมันจะทำให้ ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไอน้ำในช่วงกว้างยังจะ ทำให้การออกแบบเชิงกลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบซับซ้อนขึ้นเนื่องจากการขยายตัวตามอุณหภูมิ

5.8. การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำ

ของชิ้นส่วนอุปกรณ์จะเกิดขึ้นในช่วงกว้างเช่นกัน ดังนั้นอุณหภูมิไอน้ำจึงควรถูกควบคุมให้มีค่าไม่ มากกว่าและไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดเกิน 5°C

การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำอาจแบ่งเป็น 4 วิธีได้แก่ การใช้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับรังสีความ ร้อน (radiant) และแบบพาความร้อน (convective) การลดเอนทัลปีของไอน้ำ (attemperation) การ เอียงระดับหัวเผาขึ้นลง และการไหลวนของก๊าซเสีย (gas recirculation)

1. การใช้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับรังสีความร้อนควบคู่กับแบบพาความร้อนสามารถควบคุม อุณหภูมิไอน้ำได้เนื่องจากทั้งสองแบบมีคุณสมบัติที่ต่างกัน กล่าวคือเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง แบบแรกจะให้ไอน้ำอุณหภูมิที่ต่ำลงถ้าอัตราการผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการ ที่อุณหภูมิในเตาเผาไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบหลังจะให้ไอน้ำอุณหภูมิที่ สูงขึ้นตามอัตราการผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นเพราะอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นของก๊าซเสียจะทำให้สัม ประสิทธ์การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเสียสู่ไอน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีความเป็น ไปได้ทางทฤษฏีที่การใช้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทั้งสองแบบร่วมกันเป็นเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง แบบผสมจะทำให้อุณหภูมิของไอน้ำที่ผลิตได้มีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของเครื่องทำไอ น้ำยวดยิ่งแบบพาความร้อนมากกว่าแบบรับรังสีความร้อน ดังนั้นจึงยังคงมีการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิไอน้ำเล็กน้อยเมื่ออัตราการผลิตไอน้ำเพิ่มดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10: ผลของการควบคุมอุณหภูมิไอน้ำโดยใช้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับรังสีความร้อนและ พาความร้อน

 การใช้แอตเทมเพอเรเทอร์ (attemperator) ลดอุณหภูมิของไอน้ำโดยการพ่นละอองน้ำปน เข้าไปในไอน้ำตามรูปที่ 5.11 ละอองน้ำจะระเหยเป็นไอพร้อมกับดูดกลืนความร้อนจากไอน้ำ

บทที่ 5. หม้อไอน้ำ

อันจะทำให้อุณหภูมิไอน้ำลดลงได้ ถ้าทราบอัตราการไหลของไอน้ำขาเข้า อุณหภูมิไอน้ำขา เข้า และอุณหภูมิไอน้ำขาออก อัตราการไหลของน้ำ (mw) สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{m}_s h_{s1} + \dot{m}_w h_w = (\dot{m}_s + \dot{m}_w) h_{s2}$$



รูปที่ 5.11: แอตเทมเพอเรเทอร์

การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำวิธีนี้ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วแต่มีข้อควรระวังคือ ละอองน้ำจะ ต้องมีความบริสุทธิ์สูง คือมีสารแปลกปลอมเจือปนน้อยที่สุด ไม่เช่นนั้นแล้วมันจะทำให้เกิด คราบตะกรันที่ผิวท่อเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งได้ อย่างไรก็ตามยังมีความเสี่ยงที่จะมีละอองน้ำ ปะปนไปกับไอน้ำที่ออกจากแอตเทมเพอเรเทอร์ ดังนั้นจึงควรแยกเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง เป็นสองส่วนคือ เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งปฐมภูมิ (primary superheater) และเครื่องทำไอน้ำ ยวดยิ่งทุติยภูมิ (secondary superheater) และติดตั้งแอตเทมเพอเรเทอร์ระหว่างเครื่องทำ ไอน้ำยวดยิ่งปฐมภูมิกับเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทุติยภูมิเพื่อที่ว่า ละอองน้ำที่ออกจากแอตเท มเพอเรเทอร์จะระเหยจนหมดสิ้นในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทุติยภูมิและไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่อง กังหันไอน้ำจะไม่มีละอองน้ำปะปน

- 3. การเอียงระดับหัวเผาขึ้นลงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำโดยการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนความร้อน ในเตาเผาและส่งผลให้อุณหภูมิไอน้ำเปลี่ยนแปลงตามได้ รูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่าพลังงาน จากการเผาไหม้ในเตาเผา (Q) เท่ากับผลรวมของพลังงานที่ดูดกลืนโดยเครื่องระเหย (Q_a) พลังงานของก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผา (Q_g) และพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนจากเตา เผาไปยังเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง (Q_r) การเอียงหัวเผาขึ้นจะลด Q_a และเพิ่ม Q_r กับ Q_g การ ลดลงของ Q_a ทำให้อัตราการผลิตไอน้ำลดลง การเพิ่มขึ้นของ Q_r และ Q_g จะเพิ่มการถ่ายเท ความร้อนให้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบรับรังสีความร้อนและเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบพา ความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิไอน้ำจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเอียงหัวเผาลงจะลดอุณหภูมิไอ น้ำ
- การไหลวนของก๊าซเสียคือ การทำให้ก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำไปแล้วไหลย้อนกลับเตา เผาอีกครั้ง การไหลวนของก๊าซเสียจะลดอุณหภูมิในเตาเผาซึ่งทำให้ Q_a ลดลงและทำให้ Q_r กับ Q_g เพิ่มขึ้น ดังนั้นการไหลเวียนของก๊าซเสียที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิไอน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.12: สมดุลพลังงานที่เตาเผา

เนื่องจากการใช้แอตเทมเพอเรเทอร์และการไหลวนของก๊าซเสียเป็นการควบคุมอุณหภูมิไอน้ำ สองวิธีที่ให้ผลต่างกัน ทั้งสองวิธีจึงอาจถูกใช้ร่วมกันเพื่อทำให้ไอน้ำมีอุณหภูมิคงที่ กล่าวคือถ้าอัตรา การผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นก็ให้ใช้วิธีพ่นสเปรย์น้ำลดอุณหภูมิไอน้ำ แต่ถ้าอัตราการผลิตไอน้ำลดลงก็ให้ใช้ วิธีนำก๊าซเสียไหลย้อนกลับเตาเผา รูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าการกระทำเช่นนี้จะทำให้อุณหภูมิไอน้ำ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการผลิตไอน้ำ



รูปที่ 5.13: การควบคุมอุณหภูมิไอน้ำโดยการใช้แอตเทมเพอเรเทอร์และการไหลวนของก๊าซเสีย

5.9 เครื่องประหยัดเชื้อเพลิง

ก๊าซเสียที่ออกจากเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำมีอุณหภูมิสูง การปล่อยก๊าซ เสียออกสู่สิ่งแวดล้อมทันทีจึงเป็นการสูญเสียพลังงานในก๊าซเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ จากการ พิจารณาวัฏจักรแรงคิน จะพบว่าน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำควรมีอุณหภูมิสูงเพื่อลดความต้องการเชื้อ เพลิงในการทำให้น้ำป้อนกลายเป็นไอ ดังนั้นความร้อนในก๊าซเสียจึงควรถูกถ่ายเทสู่น้ำป้อน อันจะ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การที่น้ำป้อนมีอุณหภูมิสูงยังช่วยลด ความเค้นเชิงความร้อน (thermal stress) ในถังพักไอน้ำด้วยโดยการลดความแตกต่างอุณหภูมิผิว ของถังพักไอน้ำ

อุปกรณ์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซเสียกับน้ำป้อนมีชื่อว่า เครื่องประหยัดเชื้อ เพลิงซึ่งประกอบด้วยกลุ่มท่อจำนวนมากวางขนานกัน ตำแหน่งของเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงอยู่ถัด จากเครื่องให้ความร้อนซ้ำ น้ำป้อนจะไหลในท่อของเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงและไหลออกไปยังถัง พักไอน้ำ ส่วนก๊าซเสียจะไหลนอกท่อ เครื่องประหยัดเชื้อเพลิงไม่ได้ออกแบบให้ผลิตไอน้ำ ดังนั้นน้ำ ป้อนที่ออกจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงควรมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดประมาณ 30°C เพื่อไม่ให้มี การเปลี่ยนสถานะของน้ำ การที่ของเหลวไหลในท่อของเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงทำให้อุณหภูมิของ ท่อใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำป้อนเพราะสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำภายในท่อสูงกว่า ของก๊าซเสียภายนอกท่อมาก ดังนั้นจึงไม่มีบัญหาเรื่องอุณหภูมิท่อสูงเกินไปในเครื่องประหยัดเชื้อ เพลิงเหมือนในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องให้ความร้อนซ้ำ ทิศทางการไหลของน้ำและก๊าซเสีย ในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงจึงเป็นแบบสวนทางกันเพื่อให้ประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างก๊าซเสียกับน้ำป้อนสูงที่สุด

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงคือ การกัดกร่อนโดยอนุภาคในก๊าซเสีย ดังนั้น ความเร็วของก๊าซเสียจึงถูกจำกัดอยู่ที่ 10 ถึง 12 m/s ถ้าปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิงมีน้อย แต่ถ้าเชื้อ เพลิงมีสัดส่วนของเถ้ามากความเร็วของก๊าซเสียอาจต้องต่ำกว่านี้ ปัญหาต่อคือ การควบแน่นของ ใอน้ำในก๊าซเสียบนผิวนอกของท่อซึ่งมีอาจมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ปัญหานี้มักเกิดขึ้นในช่วง เริ่มเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าซึ่งท่อของเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่ การแก้ปัญหาอาจ ทำได้โดยการปล่อยให้ก๊าซเสียไหลผ่านท่อในขณะที่ยังไม่มีน้ำไหลเข้าเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของท่อให้ สูงกว่าจุดน้ำค้าง ปัญหาสุดท้ายที่เกิดขึ้นคือ การสะสมของขึ้เถ้าบนผิวท่อของเครื่องประหยัดเชื้อ เพลิง เพื่อแก้ปัญหานี้กลุ่มท่อจะต้องมีระยะห่างระหว่างท่อที่มากพอที่จะให้เครื่องเป่าฝุ่นทำงานโดย สะดวก นอกจากนี้ท่อที่ใช้ควรเป็นท่อเรียบ อย่างไรก็ตามถ้าเชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติหรือเชื้อเพลิง สะอาดอื่น ๆ ก็สามารถใช้ท่อติดครีบเพื่อเพิ่มประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนและลดขนาด ของเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงได้

5.10 เครื่องอุ่นอากาศ

โดยทั่วไปอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลออกจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่ ก๊าซเสียจึงสามารถ นำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่จะเข้าเตาเผาโดยใช้เครื่องอุ่นอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศ อากาศที่ร้อนขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นและความต้องการเชื้อเพลิงลดลง อาจ กล่าวโดยประมาณได้ว่าอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น 110°C ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงได้ 4% และ อุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น 280°C ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่า 11% นอกจากนี้อากาศร้อน อุณหภูมิ 150-420°C ยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับลดความชื้นในผงถ่านหินในระบบที่ใช้หัวเผาและ เครื่องบดละเอียด เครื่องอุ่นอากาศมักถูกออกแบบให้เพิ่มอุณหภูมิของอากาศเป็น 280°C ถึง 400°C โดยที่ก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 135°C ถึง 180°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดน้ำค้างของก๊าซ เสียเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำในก๊าซเสียที่ทำให้เกิดกรดซัลฟูริก

เครื่องอุ่นอากาศแบ่งออกเป็นสองแบบตามลักษณะการทำงานคือ รีคูปเพอเรเตอร์ (recuperator) และรีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) รีคูปเพอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหล ตัดกันซึ่งประกอบด้วยท่อจำนวนมากโดยท่ออาจอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 5.14 เป็นที่น่าสังเกตว่าก๊าซเสียไหลในแนวตั้งในขณะที่อากาศไหลในแนวนอนโดนก๊าซเสียไหลในท่อในรูป ที่ 5.14(ก) แต่ไหลตัดกับท่อในรูปที่ 5.14(ข) เหตุผลที่ก๊าซเสียไหลในแนวตั้งคือ ก๊าซเสียมีขี้เถ้าและ ฝุ่นปนอยู่ ขี้เถ้าและฝุ่นจะไปสะสมบนท่อ แต่การสะสมจะถูกจำกัดโดยการไหลของก๊าซเสียและแรง ใน้มถ่วงของโลก ขี้เถ้าและฝุ่นบางส่วนจึงตกลงสู่ถังเก็บ (hopper) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน รวมของรีคูปเพอเรเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 30 ถึง 60 W/m².°C ซึ่งนับว่าต่ำเนื่องจากของไหลในระบบ มีสถานะเป็นก๊าซทั้งคู่ ดังนั้นท่อจึงควรมีขนาดเล็กและมีจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของท่ออยู่ประมาณ 50 ถึง 65 mm ท่ออาจติดครับในกรณีที่เชื้อ เพลิงที่ใช้เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงสะอาด



รูปที่ 5.14: เครื่องอุ่นอากาศประเภทรีคูปเพอเรเตอร์ที่มี (ก) ท่อในแนวตั้ง และ (ข) ท่อในแนวนอน

เครื่องอุ่นอากาศแบบรีเจนเนอเรเตอร์ใช้เมทริกซ์ (matrix) หรือวงล้อที่บรรจุวัสดุพรุนซึ่งมีค่า ความจุความร้อนสูงในการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเสียไปยังอากาศ รีเจนเนอเรเตอร์จะทำงานได้ก็ ต่อเมื่อมีการไหลของก๊าซเสียสลับกับการไหลของอากาศที่แต่ละซีกของวงล้อ กลไกการทำงานของรี เจนเนอเรเตอร์จึงแบ่งเป็นสองแบบ รูปที่ 5.15 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์แบบวงล้อหมุน (rotating-wheel regenerator) หรือรีเจนเนอเรเตอร์แบบจุงสทรัม (Ljungstrom regenerator) จะเห็นว่าก๊าซเสียและ อากาศมีทิศทางการไหลคงที่ ก๊าซเสียจะไหลผ่านด้านเย็นของวงล้อและถ่ายเทความร้อนให้แก่วงล้อ ซึ่งทำให้ก๊าซเสียมีอุณหภูมิลดลง อากาศจะไหลผ่านด้านร้อนของวงล้อและได้รับความร้อนจากวง ล้อซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 5.16 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์แบบวงล้อนิ่ง (stationary-wheel regenerator) หรือรีเจนเนอเรเตอร์แบบโรเทอมุลเลอ (Rothemuhle regenerator) จะเห็นว่าโครงหุ้ม และแกนกลางหมุนในขณะที่วงล้ออยู่นิ่ง การหมุนของโครงหุ้มและแกนกลางทำให้ทิศทางการไหล ของก๊าซเสียและอากาศเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งทำให้วงล้อสามารถดูดกลืนความร้อนจากก๊าซ เสียและถ่ายเทความร้อนให้อากาศได้



รูปที่ 5.15: รีเจนเนอเรเตอร์แบบวงล้อหมุน

รีเจนเนอเรเตอร์มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่ารีคูปเพอเรเตอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้น รีเจนเนอเรเตอร์จึงมีประสิทธิผล (effectiveness) ของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ารีคูปเพอเรเตอร์ นอกจากนี้รีเจนเนอเรเตอร์ยังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) เนื่องจาก การไหลสลับกันของก๊าซเสียและอากาศในส่วนเดียวกันของเมทริกซ์ทำให้ฝุ่นและขี้เถ้าในส่วนนั้น ถูกกำจัดออกตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม รีเจนเนอเรเตอร์มีข้อเสียเปรียบบางประการ วัสดุพรุนในเม ทริกซ์ทำให้เกิดความดันสูญเสียของก๊าซเสียและอากาศที่ไหลผ่าน รีเจนเนอเรเตอร์จึงต้องการพัดลม ที่มีกำลังงานสูง การไหลสลับกันของก๊าซเสียและอากาศที่ไหลผ่าน รีเจนเนอเรเตอร์จึงต้องการพัดลม ที่มีกำลังงานสูง การใหลสลับกันของก๊าซร้อนและอากาศที่ใหลผ่าน รีเจนเนอเรเตอร์จึงต้องการพัดลม ที่มีกำลังงานสูง การใหลสลับกันของก๊าซร้อนและอากาศไย้นทำให้เกิดความเค้นเชิงความร้อนในเม ทริกซ์ซึ่งอาจลดอายุการใช้งานของเมทริกซ์ นอกจากนี้ปัญหาที่สำคัญของรีเจนแนอเรเตอร์คือ การรั่ว ใหลมาผสมกันของก๊าซเสียและอากาศซึ่งอาจทำให้เกิดการเผาไหม่ในเมทริกซ์ได้ถ้ามีเชื้อเพลิงที่ไม่ เผาไหม้ในก๊าซเสีย แต่โดยรวมแล้วโรงไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่า 120 MW นิยมติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์อาจมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางถึง 10 m และมีความเร็วรอบของวงล้ออยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 3 rpm

98


รูปที่ 5.16: รีเจนเนอเรเตอร์แบบวงล้อนิ่ง

เครื่องเป่าฝุ่น 5.11

ก๊าซเสียมักมีจึงมีฝุ่นปะปนอยู่เสมอ ที่มาของฝุ่นคือ เถ้าซึ่งเป็นส่วนประกอบเชื้อเพลิงที่ไม่เผา ้ใหม้และจะกลายเป็นเถ้าลอยที่ปนไปกับก๊าซเสียถ้าเถ้ามีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง นอกจากนี้ยังมีเชื้อ เพลิงบางส่วนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์และกลายเป็นเขม่าปะปนไปกับก๊าซเสียเช่นกัน การไหลของก๊าซ เสียในหม้อไอน้ำเป็นการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งก็คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ แม้ว่าก๊าซ ้สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ แต่ฝุ่นมักถูกดักไว้ไม่ให้ไหลผ่านไปได้ ผลที่ตามมาคือ การสะสมของ ้ ฝุ่นบนผิวท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ฝุ่นมีค่าการนำความร้อนต่ำและจะลดค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ้ร้อนจึงลดลงตามการสะสมของฝุ่นที่เพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีการกำจัดฝุ่นออกไปอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ไหล ้ออกจากหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิของไอน้ำจะลดลงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อ ไอน้ำลดลงเช่นกัน

ถ้าโรงไฟฟ้ามีกำหนดปิดซ่อมบำรุงทุกปีหรือสองปี่ฝุ่นอาจถูกกำจัดโดยการชะล้างฝุ่นออกจาก ้ผิวท่อหลังจากหม้อไอน้ำหยุดการทำงาน แต่วิธีนี้เหมาะสมถ้าก๊าซเสียมีฝุ่นน้อยซึ่งหมายความว่าเชื้อ เพลิงมีสัดส่วนของเถ้าต่ำและมีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นน้อย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแข็ง การสะสมของฝุ่นบนผิวท่อจะมีปริมาณมากเกินกว่าที่จะรอทำความสะอาดทุกปีหรือสองปีได้ การ ้ กำจัดฝุ่นควรกระทำบ่อยครั้งขึ้นแต่โรงไฟฟ้าไม่สามารถหยุดการทำงานบ่อย ๆ ได้ ดังนั้นการกำจัดฝุ่น จึงต้องกระทำขณะที่หม้อไอน้ำกำลังทำงานอยู่โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องเป่าฝุ่น (soot blower) หลักการทำงานของเครื่องเป่าฝุ่นคือ ใช้การพ่นไอน้ำ อากาศ หรือน้ำสลายขี้เถ้าที่สะสมบนผิวท่อ

เครื่องเป่าฝุ่นที่ใช้ไอน้ำจึงมีค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำ ไอน้ำที่ใช้ควรเป็นไอน้ำยวดยิ่งมากกว่า ใอน้ำอิ่มตัวเนื่องจากการควบแน่นจะทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวท่อ อย่างไรก็ตาม เครื่องเป่าฝุ่น อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิผลในช่วงที่โรงไฟฟ้าเริ่มเดินเครื่องเพราะปริมาณไอน้ำยัง ไม่มากพอ เครื่องเป่าฝุ่นที่ใช้อากาศสามารถทำงานได้ตลอดเวลาและมีค่าบำรุงรักษาต่ำ แต่จะมีค่า ใช้จ่ายในการเดินเครื่องค่อนข้างสูงเพราะต้องมีเครื่องอัดอากาศเพื่อเพิ่มความดันให้อากาศสำหรับ เป่าฝุ่น ในกรณีของผิวท่อที่มีขี้เถ้าหลอมเหลวหรือสแลกเกาะอยู่ เครื่องเป่าฝุ่นต้องใช้น้ำเนื่องจากไม่ สามารถทำความสะอาดด้วยไอน้ำหรืออากาศ

้เครื่องเป่าฝุ่นสองแบบหลักคือ เครื่องเป่าฝุ่นแบบหลายหัวฉีด (multi-nozzle soot blower) และ ้เครื่องเป่าฝุ่นแบบยืดหดได้ (retractable soot blower) เครื่องเป่าฝุ่นแบบหลายหัวฉีดในรูปที่ 5.17 ประกอบด้วยท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ถึง 64 mm ที่มีหัวฉีดตลอดความยาวของท่อให้ไอน้ำหรือ ้อากาศที่มีความดันสูงพ่นออกมาได้ รัศมีทำงานของเครื่องประมาณ 2 m เครื่องเป่าฝุ่นแบบนี้หมุน ้ได้เพื่อให้สามารถพ่น ้อน้ำหรืออากาศหลายทิศทาง เครื่องเป่าฝุ่นแบบหลายหัวฉีดอาจมีหลายท่อ ้วางขนานกันโดยท่อส่วนหนึ่งพ่นไอน้ำหรืออากาศขึ้นบนและท่ออีกส่วนหนึ่งพ่นไอน้ำหรืออากาศลง ้ ล่างและแต่ละท่อหมุนได้ 180° ซึ่งจะทำให้สามารถกำจัดฝุ่นได้อย่างทั่วถึง รูปที่ 5.17 แสดงเครื่อง ้เป่าฝุ่นแบบนี้ ข้อจำกัดของเครื่องเป่าฝุ่นแบบหลายหัวฉีดคือ การทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ตลอดเวลา อุณหภูมิจึงไม่ควรเกิน 1000°C การใช้งานจึงจำกัดอยู่ที่เครื่องประหยัดเชื้อเพลิงและ ้เครื่องอุ่นอากาศ เครื่องเป่าฝุ่นแบบยืดหดได้ในรูปที่ 5.18 ประกอบด้วยท่อที่ฝังอยู่ในผนังของหม้อ ้ไอน้ำเมื่อไม่ได้ใช้งานและจะยื่นออกมาเมื่อมีความต้องการกำจัดฝุ่น ด้านปลายของเครื่องมีหัวฉีด ้สำหรับพ่นไอน้ำหรืออากาศที่มีความดันสูง หัวฉีดอาจมีสองหัวฉีดเพื่อลดแรงปฏิกิริยาขณะพ่นไอน้ำ หรืออากาศซึ่งอาจทำให้ท่อโค้งงอ ท่อสามารถหมุนได้รอบทิศ รูปที่ 5.18 แสดงให้เห็นว่า การพ่นไอ ้น้ำหรืออากาศขณะหมุนและยื่นออกทำให้ไอน้ำหรืออากาศเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวและทำให้สามารถ ทำความสะอาดท่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างทั่วถึง การเคลื่อนที่ของหัวฉีดอาจทำให้หัว ้ ฉีดพ่นไอน้ำหรืออากาศไปที่ท่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงได้ซึ่งอาจนำไปสู่การสึกกร่อน ของท่อ ดังนั้นเครื่องเป่าฝุ่นจึงควรอยู่ห่างจากท่ออย่างน้อย 50 cm เครื่องเป่าฝุ่นแบบนี้ทำงานได้ใน สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเครื่องทำงานในช่วงเวลาสั้น ๆ และจะถูกเก็บเมื่อไม่ใช้งาน อย่างไร ก็ตามเครื่องเป่าฝุ่นแบบนี้ต้องการพื้นที่เก็บเมื่อฝังตัวในผนัง

5.12 การใหลเวียนของอากาศและก๊าซเสีย

หม้อไอน้ำต้องการอากาศปริมาณมหาศาลให้ไหลเข้าและก๊าซเสียในปริมาณที่มากกว่าให้ไหล ออกโดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การไหลของอากาศและก๊าซเสียจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ มีผลต่างระหว่างความดันของระบบกับความดันของสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลต่างที่ว่านี้เรียกว่าดราฟต์ (draft) ดราฟต์ที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าแบ่งออกตาม 2 วิธีสำหรับทำให้เกิดดราฟต์ได้แก่ ดราฟต์ธรรมชาติ (natural draft) และดราฟต์เชิงกล (mechanical draft)



รูปที่ 5.18: เครื่องเป่าฝุ่นแบบยืดหดได้

5.12.1 ดราฟต์ธรรมชาติ

เนื่องจากก๊าซเสียมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศของสิ่งแวดล้อมมันจึงเบากว่าและจะลอยขึ้นเองตาม ธรรมชาติหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความหนาแน่นที่ต่างกันของก๊าซเสียกับอากาศทำให้เกิดดราฟต์ โครงสร้างของโรงไฟฟ้ามักประกอบไปด้วยปล่อง (stack) ในรูปที่ 5.19 เพื่อส่งเสริมการเกิดดราฟต์ ถ้า ความสูงของปล่องเท่ากับ H ดราฟต์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น (Δp) จะมีค่าแปรผันตาม H และความหนา แน่นของก๊าซเสียในปล่อง ถ้าสมมุติว่าก๊าซเสียเป็นก๊าซในอุดมคติ ดราฟต์ธรรมชาติจะแปรผันตาม อุณหภูมิก๊าซเสีย ดราฟต์ธรรมชาติจึงเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของปล่องเพิ่มขึ้นหรือก๊าซเสียมีอุณหภูมิสูง ขึ้น อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดความสูงของปล่อง นอกจากนี้ก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงทำให้หม้อไอน้ำมี ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงต้องกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของก๊าซเสียโดยคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ควบคู่กัน นอกจากทำหน้าที่เพิ่มดราฟต์แล้ว ปล่องยังทำหน้าที่แพร่กระจายก๊าซเสียสู่สิ่งแวดล้อมที่ ความสูงอันเหมาะสมที่ไม่ส่งผลเสียต่อชุมชนใกล้โรงไฟฟ้า



รูปที่ 5.19: ระบบดราฟต์ธรรมชาติ

ระบบที่ใช้ดราฟต์ธรรมชาติมีได้เปรียบที่ค่าบำรุงรักษาระบบต่ำ ไม่มีความต้องการพลังงานขับ เคลื่อนอุปกรณ์ ความง่ายในการออกแบบ อายุการใช้งานยาว และความสามารถแพร่กระจายก๊าซ เสียในที่สูง ๆ แต่ดราฟต์ธรรมชาติก็มีข้อเสียตรงที่มันจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญที่สุดมันให้ดราฟต์ที่น้อยกว่าความต้องการของโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่

5.12.2 ดราฟต์เชิงกล

ถ้ามีการใช้อุปกรณ์จำพวกพัดลมมาช่วยให้เกิดการไหลเวียนของอากาศและก๊าซเสีย ดราฟต์ ที่เกิดขึ้นเรียกว่าดราฟต์เชิงกล ดราฟต์เชิงกลจึงไม่ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม และไม่มีความจำเป็นต้อง มีปล่องสูงเหมือนกับระบบที่ใช้ดราฟต์ธรรมชาติ ระบบที่ใช้ดราฟต์เซิงกลยังข้อดีอื่น ๆ เช่น ควบคุม ได้ง่ายกว่า และไม่ต้องปล่อยก๊าซเสียอุณหภูมิสูงออกจากระบบเพื่อเพิ่มดราฟต์ แต่ก็มีค่าใช้จ่าย สูงในการดูแลรักษาและปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ต้องใช้ระบบนี้เพราะดราฟต์ ธรรมชาติไม่เพียงพอที่จะเอาชนะการสูญเสียความดันปริมาณมากที่มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์หลาย ชนิดและโครงสร้างอันซับซ้อนของโรงไฟฟ้า

ดราฟต์เชิงกลแบ่งออกเป็นดราฟต์จากการเป่า (forced draft) และดราฟต์จากการดูด (induced draft) ในแบบแรกพัดลมจะทำหน้าที่เป่าอากาศสู่เตาเผา จึงทำให้เตาเผามีความดันสูงกว่าสิ่ง แวดล้อม ในกรณีที่ต้องการทำให้เกิดดราฟต์ปริมาณ Δp กำลังงานที่ให้กับพัดลม (P_{FD}) สามารถ คำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$P_{FD} = \frac{\dot{m}_f . AFR_A . v_a . \Delta p}{\eta_{FD}} \tag{5.17}$$

โดยที่ v_a คือปริมาตรจำเพาะของอากาศและ η_{FD} คือประสิทธิภาพของพัดลมเป่าอากาศ ข้อดีของ ดราฟต์จากการเป่าคือพัดลมที่มีขนาดเล็กและไม่ต้องหล่อเย็น เนื่องจากมันใช้เป่าอากาศที่มีอุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะต่ำ นอกจากนี้การที่เตาเผามีความดันสูงหมายความว่าไม่มีอากาศรั่วไหลเข้าสู่ เตาเผาได้ ซึ่งอากาศที่รั่วไหลเข้าจะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง แต่ในทางกลับกันการที่ เตาเผามีความดันสูงก็เป็นข้อเสียของดราฟต์จากการเป่าเพราะเปลวไฟอาจรั่วออกนอกเตาเผาได้ซึ่ง จะเป็นอันตรายต่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ

ดราฟต์จากการดูดเกิดในกรณีที่พัดลมถูกติดตั้งระหว่างหม้อไอน้ำและปล่อง โดยพัดลมจะทำ หน้าที่ดูดก๊าซเสียออกจากหม้อไอน้ำเข้าสู่ปล่อง จึงทำให้หม้อไอน้ำโดยรวมมีความดันต่ำกว่าสิ่ง แวดล้อม กำลังงานที่ให้กับพัดลม (P_{ID}) เพื่อผลิตดราฟต์ Δp คือ

$$P_{ID} = \frac{\dot{m}_f (1 + AFR_A) v_g . \Delta p}{\eta_{ID}}$$

โดยที่ v_g คือปริมาตรจำเพาะของก๊าซเสียและ ŋ_{ID} คือประสิทธิภาพของพัดลมดูดอากาศ พัดลมที่ ใช้ผลิตดราฟต์จากการดูดต้องทำงานที่อุณหภูมิสูง กำลังงานที่ต้องให้พัดลมจึงมากกว่าในกรณีของ ดราฟต์จากการเป่า นอกจากนี้พัดลมยังต้องผจญขี้เถ้าในก๊าซเสีย อายุการใช้งานของมันจึงสั้นกว่า พัดลมเป่าอากาศ แต่พัดลมดูดอากาศมีความปลอดภัยเพราะจะไม่มีการรั่วไหลของก๊าซเสียและ เปลวไฟออกนอกเตาเผา

เนื่องจากดราฟต์ทั้งสองชนิดมีทั้งข้อดีและข้อเสีย โรงไฟฟ้าจึงมักใช้ทั้งสองชนิดร่วมกัน กล่าวคือ พัดลมจะถูกติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกของหม้อไอน้ำ อันจะทำให้ภายในเตาเผามีความดันต่ำกว่า สิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย ดราฟต์ที่ได้จึงเรียกว่า ดราฟต์สมดุล (balanced draft)

5.12.3 พัดลม

พัดลมทำหน้าที่เพิ่มความดันสถิตหรือความเร็วให้ก๊าซ ดังนั้นพัดลมจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความ สำคัญมากในระบบถ่ายเทอากาศและก๊าซเสีย พัดลมที่ใช้ในโรงไฟฟ้ามีสองแบบคือ แบบไหลตาม แนวแกน (axial type) และแบบแรงเหวี่ยง (centrifugal type) พัดลมแบบไหลตามแนวแกนประกอบ ด้วยแกนหมุนและใบพัดที่ติดอยู่กับแกน ก๊าซไหลเข้าและออกตามแนวแกน พัดลมแบบนี้มีประสิทธิ-ภาพสูงที่ช่วงอัตราการไหลของก๊าซที่กว้าง ดังนั้นจึงไม่ต้องควบคุมการทำงานของพัดลมอย่างใกล้ ชิด อย่างไรก็ตามพัดลมแบบนี้มีราคาแพงและต้องได้รับการดูแลรักษาอย่างดี จึงเหมาะกับการใช้ งานในภาวะที่ไม่มีฝุ่นละอองหรือขี้เถ้า ซึ่งก็คือการเป่าอากาศ ถ้าจะใช้พัดลมในการดูดก๊าซเสีย ต้อง มั่นใจว่าอนุภาคในก๊าซเสียถูกกำจัดไปเกือบหมดโดยระบบกำจัดฝุ่น ไม่เช่นนั้นแล้วพัดลมจะเสียหาย ได้เนื่องจากมันไม่สามารถทนต่อฝุ่นในก๊าซเสียได้ดี

หลักการทำงานของพัดลมแบบแรงเหวี่ยงคือ อากาศที่มีความดันต่ำหรือความเร็วต่ำจะไหลเข้า กลางพัดลมและมีความดันหรือความเร็วเพิ่มจากแรงเหวี่ยงของการหมุนของพัดลมซึ่งทำให้อากาศ ที่ออกมีความดันสูงหรือความเร็วสูง พัดลมแบบแรงเหวี่ยงประกอบด้วยใบพัดที่ต่อกับแกนหมุน การ ทำงานของพัดลมขึ้นอยู่กับลักษณะของใบพัด ซึ่งแบ่งเป็น ใบโค้งไปด้านหน้า (forward-curved) ซึ่ง การโค้งเอียงของใบพัดมีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของพัดลม ใบตรง (flat) และใบโค้งไปด้าน

บทที่ 5. หม้อไอน้ำ

หลัง (backward-curved) ซึ่งการโค้งเอียงของใบพัดมีทิศทางสวนกับทิศทางการหมุนของพัดลม รูป ที่ 5.20 แสดงลักษณะของใบพัดทั้งสามแบบ ถ้าความเร็วของอากาศหรือก๊าซเสียที่ออกจากปลาย ใบพัดเท่ากันทั้งสามกรณี ความเร็วของใบพัดโค้งไปด้านหน้าจะมีค่าน้อยที่สุด และความเร็วของ ใบพัดโค้งไปด้านหลังจะมีค่ามากที่สุด ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบใบพัดทั้งสามแบบ จะเห็นว่าพัดลม แบบใบโค้งไปด้านหลังมีประสิทธิภาพสูงกว่าพัดลมแบบอื่น ข้อเสียที่สำคัญของพัดลมแบบนี้คือ ความทนทานต่อฝุ่นต่ำเมื่อใช้พัดลมแบบนี้ดูดอากาศ ซึ่งข้อเสียเปรียบนี้สามารถแก้ไขได้ถ้ามีระบบ กำจัดฝุ่นที่มีประสิทธิผลก่อนก๊าเสียไหลเข้าพัดลม อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีฝุ่นปรีมาณมากในก๊าซ เสีย อาจจำเป็นต้องใช้พัดลมแบบใบตรงซึ่งมีโครงสร้างแข็งแรงและสามารถสร้างให้มีความทนทาน ต่อฝุ่นที่สูงมากได้ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของพัดลมแบบนี้จะต่ำกว่าพัดลมแบบใบโค้งไปด้านหลัง พัดลมแบบใบโค้งไปด้านหน้ามีข้อเสียหลายประการ จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในโรงไฟฟ้า พัดลม แบบนี้นิยมใช้ในระบบปรับอากาศโดยทำหน้าที่เป็นพัดลมระบายอากาศขนาดเล็ก



รูปที่ 5.20: พัดลมชนิดแรงเหวี่ยงแบบใบโค้งไปด้านหน้า, ใบตรง และใบโค้งไปด้านหลัง

	ใบโค้งไปด้านหน้า	ใบโค้งไปด้านหลัง	ใบตรง
ขนาดของพัดลม	เล็ก	ปานกลาง	ปานกลาง
ประสิทธิภาพ	78-83%	84-91%	70-72%
เสถียรภาพ	ไม่ดี	ดี	ลี
ความเร็วพัดลม	ต่ำ	สู่ง	ปานกลาง
ความทนต่อฝุ่น	ปานกลาง	ต่ำ	ଶ୍ବଏ

ตารางที่ 5.1: เปรียบเทียบสมรรถนะของใบพัดสามแบบของพัดลมแรงเหวี่ยง

พารามิเตอร์ที่กำหนดสมรรถนะของพัดลมคือ อัตราการไหล ความดันสถิต กำลังงาน และประ-สิทธิภาพ ความดันสถิตหมายถึงความดันสถิตที่พัดลมเพิ่มให้อากาศที่ไหลผ่าน การทดสอบพัดลม ในห้องปฏิบัติการทำให้ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของความดันสถิต กำลังงาน และประสิทธิภาพ ข้อมูลเหล่านี้นำว่าสร้างเส้นโค้งสมรรถนะ (performance curves) หรือเส้นโค้ง ลักษณะเฉพาะ (characteristic curves) เส้นโค้งสมรรถนะขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกน หมุนและความเร็วของพัดลม พัดลมที่ติดตั้งในระบบไหลเวียนของก๊าซจะต้องสร้างความดันที่เอาชนะ ความดันสูญเสียในระบบเพื่อให้มีการไหลเวียนของก๊าซ ความดันสูญเสียแปรผันไปตามอัตราการ ไหลยกกำลังสอง ดังนั้นเส้นโค้งความต้านทานของระบบ (system resistance curve) ในรูปที่ 5.21 จึงเป็นเส้นโค้งพาราโบลา รูปที่ 5.21 แสดงให้เห็นจุดตัดของเส้นโค้งสมรรถนะกับเส้นโค้งความ ต้านทาน จุดตัดนี้เรียกว่าจุดทำงาน (operation point) อัตราการไหลที่จุดนี้เรียกว่า อัตราการไหล ออกแบบ (design flow rate) พัดลมที่เลือกใช้ควรมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราการไหลนี้



รูปที่ 5.21: จุดทำงานของพัดลม

ในทางอุดมคติ อัตราการไหลออกแบบควรเท่ากับอัตราการไหลจริง แต่ในทางปฏิบัติพัดลมที่ เลือกใช้มักมีอัตราการไหลจริงต่ำกว่าอัตรากรไหลออกแบบ เหตุผลที่ทำเช่นนี้คือ

- ความต้านทานของระบบอาจมากกว่าที่ออกแบบไว้เนื่องจากการสะสมของฝุ่นและสแลกบน พื้นผิวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในหม้อไอน้ำ
- ระบบการใหลของอากาศและก๊าซเสียอาจมีการรั่ว ซึ่งทำให้ต้องเลือกพัดลมที่ให้อัตราการ ใหลสูงเพื่อชดเชยการรั่ว
- ระบบอาจต้องการอากาศส่วนเกินมากกว่าที่คาดว่าจะต้องการ

มีความเป็นไปได้สูงที่จุดทำงานของพัดลมต้องเลื่อนไปที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่าในการใช้งานจริง วิธีการที่ง่ายที่ลดอัตราการไหลได้คือ ติดตั้งแผ่นกั้น (damper) ในระบบ การปรับแผ่นกั้นจะทำให้ เส้นโค้งระบบเปลี่ยนและทำให้จุดทำงานเปลี่ยนตามไปด้วย อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีประสิทธิภาพเซิง พลังงานต่ำเนื่องจากการลดอัตราการไหลทำให้กำลังงานที่ให้พัดลมลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น วิธีควบคุมที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงกว่าคือ วิธีควบคุมแบบปรับมุมของใบพัดน้ำ (inlet vane control) ใบพัดน้ำเป็นใบพัดนิ่งที่ติดตั้งก่อนใบพัดหมุน รูปที่ 5.21 แสดงผลของการควบคุม พัดลมด้วยวิธีนี้ การปรับมุมของใบพัดน้ำทำให้เส้นโค้งความดันสถิตของพัดลมเปลี่ยนจากเส้น sp1 เป็นเส้น sp2 และจากเส้น sp2 เป็นเส้น sp3 นอกจากนี้เส้นโค้งกำลังงานก็เปลี่ยนจากเส้น p1 เป็น เส้น p2 และจากเส้น p2 เป็นเส้น p3 อย่างไรก็ตามเส้นโค้งความต้านทานของระบบไม่เปลี่ยน ดังนั้น การควบคุมพัดลมด้วยวิธีนี้ จึงทำให้จุดทำงานของพัดลมเปลี่ยนจากเส้น p1 เป็น เส้น p2 และจากเส้น p2 เป็นเส้น p3 อย่างไรก็ตามเส้นโค้งความต้านทานของระบบไม่เปลี่ยน ดังนั้น การควบคุมพัดลมด้วยวิธีนี้จึงทำให้จุดทำงานของพัดลมเปลี่ยนจากจุด a เป็นจุด b และจากจุด b เป็นจุด c เป็นที่น่าสังเกตว่าการลดลงของอัตราการไหลทำให้กำลังงานของพัดลมลงจากจุด a' บน เส้น p1 เป็นจุด b' บนเส้น p2 และจากจุด b' บนเส้น p2 เป็นเส้น p3 กำลังงานที่ลดลงนี้ มากกว่ากำลังงานที่ลดลงในการควบคุมแบบใช้แผ่นกั้น ดังนั้นวิธีควบคุมแบบปรับมุมของใบพัดนำ จึงมีประสิทธิภาพเซิงพลังงานสูงกว่าวิธีควบคุมแบบใช้แผ่นกั้น



รูปที่ 5.22: วิธีควบคุมพัดลมแบบปรับมุมของใบพัดนำ

วิธีควบคุมพัดลมที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดคือ วิธีควบคุมแบบปรับความเร็ว (variablespeed control) เส้นโค้ง sp₁ และ p₁ ในรูปที่ 5.22 เป็นเส้นโค้งของพัดลมความเร็วสูง (N₁) เส้น โค้ง sp₂ และ p₂ เป็นเส้นโค้งของพัดลมความเร็วปานกลาง (N₂) เส้นโค้ง sp₃ และ p₃ เป็นเส้นโค้ง ของพัดลมความเร็วต่ำ (N₃) จะเห็นว่า การลดความเร็วพัดลมทำให้อัตราการไหลและกำลังงานของ พัดลมลดลงตามไปด้วย เมื่อเปรียบวิธีควบคุมแบบหลายความเร็วกับวิธีควบคุมแบบปรับมุมของ ใบพัดนำจะพบว่าวิธีควบคุมแบบหลายความเร็วทำให้กำลังงานของพัดลมลดลงมากกว่าวิธีควบคุม แบบปรับมุมของใบพัดน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับความเร็วพัดลมได้จากกฏของ พัดลม (fan laws)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{5.18}$$

้นอกจากนี้กฎของพัดลมยังให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานพัดลมกับความเร็วพัดลม ดังนี้

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \tag{5.19}$$



ดังนั้น P จึงแปรผันตาม Q^3 กำลังงานของพัดลมจะลดลง 87.5% ถ้าอัตราการไหลลดลง 50%

รูปที่ 5.23: วิธีควบคุมพัดลมแบบปรับความเร็ว

คำถามท้ายบท

- 1. ทำไมอัตราการผลิตไอน้ำที่ลดลงจึงส่งผลให้ต้องใช้อากาศส่วนเกินมากขึ้น
- 2. ทำไมหม้อไอน้ำแบบท่อไฟจึงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ
- 3. ผนังน้ำหมายถึงอะไร
- 4. ทำไมท่อน้ำขึ้นจึงมีขนาดเล็กกว่าท่อน้ำลง
- 5. ถังพักไอน้ำทำหน้าที่อะไร
- 6. ละอองน้ำที่ปะปนไปกับไอน้ำที่ออกจากถังพักไอน้ำจะส่งผลเสียอย่างไร
- 7. อะไรจะเป็นผลเสียที่เกิดขึ้นถ้าไม่มีการถ่ายน้ำออกจากถังพักไอน้ำ
- 8. ไซโคลนทำหน้าที่อะไรในถังพักไอน้ำ
- 9. เครื่องประหยัดเชื้อเพลิงทำหน้าที่อะไร
- 10. อะไรคือสาเหตุสำคัญนอกจากราคาท่อที่ทำให้ท่อของเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งของโรงไฟฟ้า ถ่านหินไม่นิยมติดครีบทั้ง ๆ ที่การถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้น
- 11. เครื่องอุ่นอากาศมีกี่แบบ อะไรบ้าง
- 12. การไหลวนของก๊าซเสียส่งผลอย่างไรต่ออุณหภูมิไอน้ำที่ออกจากเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง
- 13. อธิบายการควบคุมอุณหภูมิไอน้ำโดยการเอียงระดับหัวเผาขึ้นลงมาพอสังเขป
- ทำไมการใช้เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งแบบแผ่รังสีควบคู่กับแบบพาความร้อนจึงควบคุมอุณหภูมิ ไอน้ำได้
- 15. บอกข้อเสียสองข้อของการที่อุณหภูมิไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหันเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ๆ
- 16. อะไรคือข้อเสียของระบบดราฟท์เชิงกลจากการเป่า
- 17. ทำไมพัดลมเป่าอากาศจึงมีขนาดเล็กกว่าพัดลมดูดก๊าซเสีย
- 18. พัดลมแบบแรงเหวี่ยงมีกี่แบบ อะไรบ้าง
- 19. วิธีควบคุมพัดลมวิธีใดมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด

20. ถ่านหินชนิดหนึ่งมีสัดส่วนโดยมวลจากการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) ของ ถ่านหินในสภาพแห้งและไม่มีเถ้า (dry, ash-free) ดังนี้ C 81%, H 7%, O 10%, S 1%, N 1% เมื่อน้ำถ่านในสภาพเดิม (as-received) ไปวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) พบว่ามี ความชื้น 25% และเถ้า 10% ถ่านหินชนิดนี้ในสภาพเดิมใช้เป็นเชื้อเพลิงของ หม้อไอน้ำซึ่งมีกำลังการผลิตไอน้ำ 100 ton/h ผลการทดสอบหม้อไอน้ำ พบว่าก๊าซเสียแห้ง ประกอบด้วย CO₂ 14.49%, O₂ 3.81%, SO₂ 0.07% และ CO 0.22% นอกจากนี้ยังพบว่า ขี้เถ้าประกอบด้วยคาร์บอน 5% ก๊าซเสียมีอุณหภูมิ 150°C อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิ 25°C จงคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

บทที่ 5. หม้อไอน้ำ

บทที่ 6

การควบคุมมลภาวะทางอากาศ

6.1 มลภาวะทางอากาศ

อากาศมีส่วนประกอบหลักคือ N₂ ประมาณ 79% และ O₂ ประมาณ 21% ถึงแม้ว่าจะมีก๊าซ อื่นปะปนอยู่ด้วยตามธรรมชาติก็มีปริมาณน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลเสียต่อมนุษย์ สิ่งปะปนเหล่านี้ จึงไม่นับเป็นมลภาวะทางอากาศ ก๊าซเสียเกิดจากการที่มีก๊าซอื่นหรือสารอื่นที่ปะปนเพิ่มเติมใน อากาศในปริมาณที่มากพอจนนับเป็นมลภาวะทางอากาศ สาเหตุของการเกิดก๊าซเสียในโรงไฟฟ้าคือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงชีวมวล สารปนเปื้อนที่สำคัญสามตัวในก๊าซเสียได้แก่ ฝุ่น (particulate) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) กระทรวงอุตสาหกรรมได้ กำหนดมาตรฐานการปล่อยก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้าตามเชื้อเพลิงที่ใช้และขนาดของโรงไฟฟ้าดังแสดง ในตารางที่ 6.1 โรงไฟฟ้าต้องมีระบบควบคุมก๊าซเสียไม่ให้มีสารปนเปื้อนสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดนี้ วิศวกรโรงไฟฟ้าจะต้องมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพของก๊าซเสียที่ปล่อย ออกจากโรงไฟฟ้า

6.2 การควบคุมฝุ่นละออง

การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อาจทำให้มีคาร์บอนเหลือจากการเผาไหม้และลอยออกไปพร้อมกับ ก๊าซเสียในรูปของเขม่าและควัน นอกจากนี้ระบบการเผาไหม้ที่ใช้ถ่านหินหรือน้ำมันเตาคุณภาพไม่ ดีจะได้ขี้เถ้าเป็นผลผลิต บางส่วนของขี้เถ้าจะตกลงสู่ก้นเตาเผากลายเป็นขี้เถ้า (bottom ash) ส่วน ที่เหลือจะเป็นเถ้าลอย (fly ash) ปะปนไปกับก๊าซเสียที่จะไหลเข้าสู่ปล่อง อุปกรณ์กำจัดฝุ่นที่ใช้ใน โรงไฟฟ้าได้แก่ อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุง กรอง (fabric filter) และอุปกรณ์แยกฝุ่นแบบไซโคลน (cyclone separator)

ประเภทของโรงไฟฟ้า	SO_2	NO_x	ฝุ่นละออง
	(ppm)	(ppm)	(mg/m ³)
โรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีกำลังการผลิต			
(1) น้อยกว่า 300 MW	640	350	120
(2) 300 - 500 MW	450	350	120
(3) มากกว่า 500 MW	320	350	120
โรงไฟฟ้าน้ำมันเตาที่มีกำลังการผลิต			
(1) น้อยกว่า 300 MW	640	180	120
(2) 300 - 500 MW	450	180	120
(3) มากกว่า 500 MW	320	180	120
โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ	20	120	60
โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล	60	200	120

ตารางที่ 6.1: กำหนดมาตรฐานการปล่อยก๊าซเสียจากโรงไฟฟ้า

6.2.1 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

รูปที่ 6.1 แสดงส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นลวดอิเล็กโทรดเปล่ง แสง (emitting electrode) หลายเส้นวางอยู่ระหว่างแผ่นสะสมฝุ่นที่ต่อกับสายดิน (grounded collecting plate) เส้นลวดอิเล็กโทรดได้รับศักย์ไฟฟ้าขั้วลบขนาด 20 ถึง 100 kV สนามไฟฟ้ารอบ ๆ เส้น ลวดจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งออกจากเส้นลวดอิเล็กโทรดและไปชนกับโมเลกุลก๊าซเสียที่ไหลระหว่าง แผ่นสะสมซึ่งจะแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาอิเล็กโทรดเปล่งใน ขณะที่อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาแผ่นสะสม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่ออิเล็กตรอนเข้าใกล้ แผ่นสะสมเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีกำลังอ่อนลง อิเล็กตรอนจะถูกดักจับโดยอนุภาคฝุ่นและจะถ่าย ประจุลบให้แก่อนุภาคฝุ่น สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดูดฝุ่นสู่แผ่นสะสมฝุ่นในที่สุด



รูปที่ 6.1: ส่วนประกอบหลักของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

้อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตประกอบแผ่นสะสมฝุ่นหลายแผ่นวางขนานกัน ตรงกึ่งกลางระ-

6.2. การควบคุมฝุ่นละออง

หว่างแผ่นสะสมฝุ่นสองแผ่นมีเส้นลวดอิเล็กโทรดหลายเส้นเรียงแถว จำนวนแผ่นสะสมฝุ่น จำนวน เส้นลวดอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างแผ่นสะสมฝุ่นกับเส้นลวดอิเล็กโทรด ได้รับการออกแบบ ให้อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีสมรรถนะสูงสุด ก๊าซเสียที่มีฝุ่นจะไหลเข้าอุปกรณ์ขนานกับแผ่น สะสมฝุ่น ฝุ่นที่ถูกแยกจะไปติดอยู่กับแผ่นสะสมฝุ่นและสูญเสียประจุบางส่วนแก่แผ่นสะสมฝุ่น แต่ก็ ยังมีประจุหลงเหลือและมีแรงยึดฝุ่นกับแผ่นสะสมฝุ่น อย่างไรก็ตามสมรรถนะของอุปกรณ์แยกฝุ่นจะ ลดลงถ้ามีฝุ่นเกาะแผ่นสะสมมากเกินไป ดังนั้นจึงต้องใช้การสั่นของแผ่นสะสมฝุ่นทำให้ฝุ่นตกสู่ถัง พักขี้เถ้า (ash hopper) เพื่อรอการกำจัดในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 6.2 แสดงรูปด้านบนและด้านข้างของ อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 6.2: ภาพด้านบนและด้านข้างของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ของอนุภาคขี้เถ้า สภาพต้านทานไฟฟ้าไม่ควรต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป ถ้า สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำเกินไป สนามไฟฟ้าใกล้แผ่นสะสมฝุ่นจะยังคงมีความเข้มสูงถึงแม้ว่าจะมีชั้น ฝุ่นที่หนาบนแผ่นสะสม การทำให้ฝุ่นที่เกาะอยู่บนแผ่นสะสมตกลงสู่ถังพักขี้เถ้าก็จะยาก นอกจากนี้ ฝุ่นจะตกลงไปแล้วอาจถูกดูดกลับขึ้นมาใหม่ ถ้าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงเกินไป สนามไฟฟ้าใกล้แผ่น สะสมฝุ่นจะมีกำลังอ่อนอย่างรวดเร็วเมื่อชั้นฝุ่นบนแผ่นสะสมหนาขึ้น ดังนั้นอนุภาคฝุ่นอาจจะไหล ผ่านอุปกรณ์โดยไม่ถูกดักจับ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 5 × 10⁹ ถึง 5 × 10¹⁰ Ω.cm การลดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฝุ่นในก๊าซเสียอาจใช้ ความชื้น หรือ SO₃

6.2.2 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรอง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสิ่งทอได้รับการพัฒนาจนทำให้ผ้าบางชนิดมีคุณสมบัติในการกรองอนุภาค ฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากได้ อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองจึงได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีสมรรถนะ เทียบเท่าอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองประกอบด้วยถุงกรอง (filter bag) รูปทรงกระบอกกลวงหลายถุงเรียงตัวขนานกัน แต่ละถุงมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยและ มีความสูงมากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก

ถุงกรองทำจากวัสดุพรุนที่ ฝุ่นที่อยู่ในก๊าซเสียจะถูกดักโดยถุงกรองและทำให้ก๊าซเสียที่สะอาด ไหลผ่านไปได้ การสะสมของฝุ่นบนผิวของถุงกรองจะทำให้มีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นและต้องใช้ กำลังงานของพัดลมสูงขึ้นเพื่อให้กึ่าซเสียไหลผ่านถุงกรอง ดังนั้นจึงต้องมีกลไกในการกำจัดฝุ่นออก จากผิวของถุงกรองเมื่อความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่ง อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรอง แบ่งออกเป็นสองแบบตามวิธีการกำจัดฝุ่นออกจากผิวของถุงกรอง แบบแรกคือ อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วย ถุงกรองแบบไหลกลับได้ (reverse gas fabric filter) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ถุงกรองเปิดด้านล่างและ ปิดด้านบน ก๊าซเสียสกปรกไหลเข้าถุงกรองทางด้านในและก๊าซเสียสะอาดไหลออกทางด้านนอก ก๊าซเสียที่ถูกกรองจะสะสมที่ผิวด้านในของถุงกรอง การทำความสะอาดจะใช้พัดลมเป่าอากาศเข้า เครื่อง อากาศจะไหลเข้าปะทะถุงกรองจากด้านข้างซึ่งทำให้ฝุ่นที่เกาะอยู่ที่ผิวในของถุงกรองหลุด ออกและไหลลงสู่ถังเก็บขึ้เถ้า ถุงกรองในอุปกรณ์นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 ถึง 300 mm และความสูง 7 ถึง 11 m



ฐปที่ 6.3: เครื่องกรองด้วยถุงผ้าแบบไหลกลับได้

รูปที่ 6.4 แสดงอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองแบบพัลส์เจ็ต (pulse jet fabric filter) ถุงกรองปิด ด้านล่างและเปิดด้านบน ก๊าซเสียสกปรกไหลเข้าถุงกรองทางด้านนอกและก๊าซเสียสะอาดไหลออก ทางด้านใน ก๊าซเสียที่ถูกกรองจะสะสมที่ผิวด้านนอกของถุงกรอง การทำความสะอาดจะใช้พัดลม

เป่าอากาศเข้าถุงกรองซึ่งทำให้ถุงกรองพองตัวขึ้นอย่างกะทันหันเป็นลูกคลื่นที่วิ่งจากบนลงล่าง ฝุ่นที่ เกาะผิวนอกของถุงกรองจะกระเด็นตกลงสู่ถังเก็บขี้เถ้า ถุงกรองในอุปกรณ์นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 ถึง 150 mm และความสูง 5 ถึง 8 m เป็นที่น่าสังเกตว่า อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองแบบพัลส์เจ็ตมี ขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองแบบไหลกลับได้ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกร องแบบพัลส์เจ็ตมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูงกว่า



รูปที่ 6.4: เครื่องกรองด้วยถุงผ้าแบบพัลส์เจ็ต

อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองและอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีความสามารถกำจัดฝุ่นใกล้ เคียงกัน อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ ความสามารถในการแยกฝุ่นของเครื่องไม่ขึ้นกับลักษณะของขี้เถ้าและปริมาณฝุ่นในก๊าซเสีย อย่างไร ก็ตามข้อเสียเปรียบที่สำคัญของอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองคือ ค่าบำรุงรักษาที่สูงกว่าและความ ต้องการพัดลมในการเป่าก๊าซเสีย พัดลมจะต้องออกแบบให้มีกำลังมากพอที่จะเอาซนะความดันสูญ เสียในเครื่องที่เกิดจากการสะสมฝุ่นบนผิวของถุงกรอง ในทางตรงข้ามความดันสูญเสียในอุปกรณ์ แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตค่อนข้างน้อย

6.2.3 เครื่องดักฝุ่นด้วยไซโคลน

เครื่องดักฝุ่นด้วยไซโคลนอาศัยหลักการที่ว่า อนุภาคฝุ่นมีความหนาแน่นมากกว่าโมเลกุลของ ก๊าซเสีย แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาคจึงมากกว่า รูปที่ 6.5 แสดงเครื่องดักฝุ่นด้วยไซโคลน ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกรวย ก๊าซเสียที่มีฝุ่นปะปนจะไหลเข้าไซโคลนทางด้านบนในแนวเฉียงซึ่งทำให้เกิด การไหลวนของก๊าซเสียรอบ ๆ ผนังของไซโคลน อนุภาคฝุ่นก็จะแยกออกจากก๊าซเสียโดยตกลงสู่ถัง เก็บฝุ่นข้างล่างในขณะที่ก๊าซเสียที่สะอาดขึ้นจะถูกพัดลมดูดให้ไหลย้อนกลับขึ้นข้างบนออกจาก ไซโคลนไปได้ เครื่องดักฝุ่นชนิดนี้แยกอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ออกไปได้ดีแต่ไม่สามารถแยกอนุภาคฝุ่น ที่มีขนาดเล็กได้ เครื่องนี้จึงต้องใช้ร่วมกับเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรองหรือเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กเล็ดลอดออกไปได้



รูปที่ 6.5: เครื่องดักฝุ่นด้วยไซโคลน

6.3 การควบคุมออกไซด์ของไนโตรเจน

ออกไซด์ของไนโตรเจนหมายถึงก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) NO เป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่นที่เกิดขึ้นเมื่อไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง

$$N_2 + O_2 \longrightarrow 2NO$$

ปฏิกิริยาระหว่าง NO กับออกซิเจนทำให้เกิด NO₂ ตามสมการดังนี้

$$\mathsf{NO} + \frac{1}{2}\mathsf{O}_2 \longrightarrow \mathsf{NO}_2$$

NO₂ เป็นก๊าซสีน้ำตาลแดงซึ่งมีกลิ่นฉุนและเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจโดยสามารถทำให้ เกิดโรคหลอดลมอักเสบและปอดบวมได้ นอกจากนี้ NO_x ยังทำปฏิกิริยากับสารระเหยไฮโดรคาร์บอน กลายเป็นโอโซนที่อยู่ระดับพื้นดินซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

NO_x เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกับอากาศปริมาณมาก การควบคุม NO_x จึงอาจกระทำ ได้โดยการควบคุมการเผาไหม้ (combustion control) ซึ่งจะลดปริมาณการเกิด NO_x หรือการควบคุม NO_x ในก๊าซเสียหลังจากการเผาไหม้ (post-combustion control) ซึ่งหมายถึงการกำจัด NO_x ที่เกิด ขึ้นแล้วในก๊าซเสีย การกำจัด NO_x ออกจากก๊าซเสียต้องใช้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างแอมโมเนีย (NH₃)

กับ NOx ซึ่งจะเปลี่ยน NO_x เป็นก๊าซไนโตรเจน ระบบกำจัด NO_x หลังการเผาไหม้แบ่งสองแบบคือ ระบบกำจัด NO_x ที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาหรือ SCR (selective catalytic reduction) และ ระบบกำจัด NO_x ที่ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาหรือ SCNR (selective non-catalytic reduction)

6.3.1 การควบคุมการเผาไหม้

การเกิดขึ้นของ NO_x ต้องมีทั้งไนโตรเจนและออกซิเจนซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดอยู่ในอากาศ การเผา ไหม้เชื้อเพลิงในออกซิเจนบริสุทธิ์จะลดการเกิด NO_x ได้แต่ค่าใช้จ่ายของออกซิเจนบริสุทธิ์สูงมาก อีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด NO_x คืออุณหภูมิ การควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 900° ในอุปกรณ์ การเผาไหม้แบบฐานไหลจะลดการเกิด NO_x ได้ค่อนข้างมาก ในกรณีของอุปกรณ์การเผาไหม้แบบ อื่นที่อุณหภูมิเตาเผาสูงกว่า 900° การลดอุณหภูมิเตาเผาอาจทำได้โดยทำให้ก๊าซเสียอุณหภูมิต่ำที่ ไหลออกจากหม้อไอน้ำไหลกลับเข้าเตาเผา อย่างไรก็ตาม วิธีนี้สามารถลดปริมาณ NO_x ได้เพียงเล็ก น้อยเท่านั้น

การลดออกซิเจนคือการลดปริมาณอากาศในการเผาไหม้ซึ่งอาจนำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม

ข้อมูลจากผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเผาไหม้แบบสองช่วง (two-stage combustion) ทำให้ เกิด NO_x ในปริมาณที่น้อยกว่าการเผาไหม้แบบช่วงเดียว (one-stage combustion) ถึงแม้ว่าจะใช้ อากาศปริมาณเท่ากัน อากาศจะแบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ (70% - 90%) และอากาศทุติยภูมิ (10% -30%) ในการเผาไหม้แบบสองช่วง อากาศปฐมภูมิจะผสมกับเชื้อเพลิงซึ่งเผาไหม้ในส่วนที่มีอากาศ น้อย (fuel rich zone) การที่มีอากาศน้อยทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ในส่วนนี้ไม่สูงมากนักและทำให้ NO_x เกิดขึ้นน้อยลง อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้ในส่วนนี้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องมีการให้อากาศทุติย ภูมิเพิ่มในส่วนที่มีอากาศมาก (fuel lean zone) รูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นการเผาไหม้แบบสองช่วง การ ควบคุมการเกิด NO_x ด้วยวิธีนี้เรียกอีกชื่อว่า การให้อากาศเป็นขั้น (air staging) หลักการนี้นำไปสู่ การออกแบบและสร้างหัวเผา NO_x ต่ำ (low NO_x burner)



รูปที่ 6.6: การเผาไหม้แบบสองช่วง

6.3.2 ระบบกำจัด NO $_x$ แบบ SCR

ในระบบนี้แอมโมเนีย (NH₃) จะถูกพ่นเข้าไปผสมกับก๊าซเสียและไหลผ่านสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง NH₃ กับ NO_x เป็นดังนี้

$$\begin{split} 4\mathsf{NO} + 4\mathsf{NH}_3 + \mathsf{O}_2 &\longrightarrow 4\mathsf{N}_2 + 6\mathsf{H}_2\mathsf{O} \\ 2\mathsf{NO}_2 + 4\mathsf{NH}_3 + 2\mathsf{O}_2 &\longrightarrow 3\mathsf{N}_2 + 6\mathsf{H}_2\mathsf{O} \end{split}$$

ทั้งสองปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนออกมา (exothermic) และเกิดขึ้นซ้าที่อุณหภูมิต่ำ สาร เร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาทั้งสองเกิดเร็วขึ้นโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากนัก (160°C ถึง 350°C) ความสามารถในการลด NO_x ของ SCR มากถึง 95%



รูปที่ 6.7: การลด NO $_x$ ที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาหรือ SCR

แอมโมเนียที่ใช้ใน SCR อาจเป็นแอมโมเนียบริสุทธิ์หรือแอมโมเนียผสมน้ำ แอมโมเนียบริสุทธิ์ ต้องเก็บในถังอัดความดัน แอมโมเนียเป็นสารมีพิษ จึงต้องมีระบบควบคุมการรั่วไหลของแอมโมเนีย การเก็บแอมโมเนียผสมน้ำกระทำได้ง่ายกว่าแต่ถังเก็บแอมโมเนียผสมน้ำจะต้องมีขนาดใหญ่กว่า ถังเก็บแอมโมเนียบริสุทธิ์ 3 ถึง 4 เท่าและการขนส่งแอมโมเนียผสมน้ำมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแอมโมเนีย บริสุทธิ์ ดังนั้น SCR ส่วนใหญ่จึงใช้แอมโมเนียบริสุทธิ์

ปริมาณแอมโมเนียที่ใช้สามารถคำนวณได้จากปริมาณ NO_x ที่ต้องการกำจัด การใช้แอมโมเนีย ปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดการรั่วของแอมโมเนีย (ammonia slip) ซึ่งทำให้ก๊าซเสียมีแอมโมเนีย เป็นส่วนผสมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ นอกจากนี้ การรั่วของแอมโมเนียจะก่อให้เกิดปัญหามาก ขึ้นในกรณีที่เชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้ามีกำมะถันและก๊าซเสียมี SO₂ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ SO₂ กลายเป็น SO₃ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียดังนี้

$$\mathsf{SO} + \frac{1}{2}\mathsf{O}_2 \longrightarrow \mathsf{SO}_3$$

6.3. การควบคุมออกไซด์ของในโตรเจน

$$\begin{split} \mathsf{NH}_3 + \mathsf{SO}_3 + \mathsf{H}_2\mathsf{O} &\longrightarrow \mathsf{NH}_4\mathsf{HSO}_2\\ 2\mathsf{NH}_3 + 2\mathsf{SO}_3 + \mathsf{H}_2\mathsf{O} + \frac{1}{2}\mathsf{O}_2 &\longrightarrow 2\mathsf{NH}_4\mathsf{SO}_4 \end{split}$$

แอมโมเนียมไบซัลเฟต (ammonium bisulfate, NH4HSO₂) และ แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate, NH4SO4) ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นมีสถานะเป็นของแข็งขนาดเล็กโดยมีขนาดประมาณ 1 ถึง 3 ไมครอน ดังนั้นก๊าซเสียที่ผ่าน SCR จะมีอนุภาคฝุ่นเพิ่มขึ้น

สารเร่งปฏิกิริยาใน SCR ทำจากไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO₂) ซึ่งทำหน้าที่ เป็นโครงสร้างและวาเนเดียมเพนทอกไซด์ (vanadium pentoxide, V₂O₅) หรือ ทังสเตนออกไซด์ (tungsten oxide, WO₃) ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นถาดสี่เหลี่ยมเจาะรู จำนวนมากเพื่อให้ก๊าซเสียไหลผ่านได้ ขนาดของรูขึ้นกับปริมาณฝุ่นละอองในก๊าซเสีย ถ้า SCR ติด ตั้งก่อนเครื่องกำจัดฝุ่นในรูปที่ 13.1 รูจะมีขนาด 6 ถึง 7.5 mm ถ้า SCR ติดตั้งหลังเครื่องกำจัดฝุ่น และโรงไฟฟ้าใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง รูจะมีขนาด 3.3 ถึง 5 mm และถ้าโรงไฟฟ้าใช้น้ำมันเตาหรือ ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง รูจะมีขนาด 2 ถึง 3 mm แต่ละถาด สารเร่งปฏิกิริยามีอายุใช้งานจำกัด การเปลี่ยนสารเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นหลังจากใช้งานไป 2 ถึง 4 ปีและความเช้มข้นของ NO_x ในก๊าซ เสียเกินค่าที่กฎหมายกำหนด ค่าใช้จ่ายของสารเร่งปฏิกิริยาสูงถึง 20% ถึง 30% ของค่าใช้จ่ายใน ระบบกำจัด NO_x แบบ SCR ดังนั้นจึงต้องมีระบบจัดการสารเร่งปฏิกิริยาที่ดี สารเร่งปฏิกิริยาหลาย ถาดจะติดตั้งใน SCR และการเปลี่ยนสารเร่งปฏิกิริยาจะกระทำทีละถาดเพื่อให้สามารถใช้งานสาร เร่งปฏิกิริยาแต่ละถาดได้เต็มที่และควบคุมค่าใช้จ่ายของสารเร่งปฏิกิริยา

6.3.3 ระบบกำจัด NO $_x$ แบบ SNCR

SNCR ใช้แอมโมเนียหรือยูเรีย [urea, CO(NH₂)₂] ทำปฏิกิริยากับ NO ยูเรียมีอันตรายน้อยกว่า แอมโมเนีย จึงได้รับความนิยมมากกว่า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

$$\begin{split} & 4\mathsf{NO}+4\mathsf{NH}_3+\mathsf{O}_2 \longrightarrow 4\mathsf{N}_2+6\mathsf{H}_2\mathsf{O} \\ & 4\mathsf{NO}+2\mathsf{CO}(\mathsf{NH}_2)_2+\mathsf{O}_2 \longrightarrow 4\mathsf{N}_2+2\mathsf{CO}_2+4\mathsf{H}_2\mathsf{O} \end{split}$$

อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 900°C ถึง 1050°C และเวลาทำปฏิกิริยาต้องนานพอเพื่อทดแทน การใช้สารเร่งปฏิกิริยา เป็นที่น่าสังเกตว่า SNCR ไม่ได้กำจัด NO₂ แต่เนื่องจาก NO_x ที่ออกจากโรง ไฟฟ้าอาจประกอบด้วย NO ถึง 95% โดยมี NO₂ เพียง 5% ประสิทธิภาพของ SNCR ในการกำจัด NO_x จึงอาจสูงถึง 70% ถึง 80% ซึ่งก็ยังต่ำกว่า SCR อย่างไรก็ตามการที่ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาทำให้ ค่าใช้จ่ายของ SNCR ถูกกว่า SCR นอกจากนี้ความดันสูญเสียใน SNCR ก็น้อยกว่า SCR

นอกเหนือจากปฏิกิริยาข้างต้นแอมโมเนียยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนี้

$$\begin{array}{l} 4\mathsf{NH}_3+\mathsf{5O}_2 \longrightarrow 4\mathsf{NO}+\mathsf{6H}_2\mathsf{O} \\ \\ 4\mathsf{NH}_3+\mathsf{3O}_2 \longrightarrow 2\mathsf{N}_2+\mathsf{6H}_2\mathsf{O} \\ \\ 2\mathsf{NH}_3+\mathsf{2O}_2 \longrightarrow \mathsf{N}_2\mathsf{O}+\mathsf{3H}_2\mathsf{O} \end{array}$$

ปฏิกิริยาแรกส่งผลให้ NO เพิ่มขึ้น ในตรัสออกไซด์ (nitrous oxide, N₂O) ในปฏิกิริยาที่สามไม่ใช่ ก๊าซที่ เป็นอันตรายต่อสุขภาพถึงแม้ว่า ก๊าซนี้จะทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน ทั้งสามปฏิกิริยาทำให้ แอมโมเนียสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

ระบบก่ำจัด NO_x แบบ SNCR จะติดตั้งตรงทางออกจากเตาเผาในเครื่องกำเนิดไอน้ำ แอมโมเนีย หรือยูเรียจะถูกพ่นเข้าไปผสมกับก๊าซเสียด้วยหัวฉีดที่ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำหรือหัวฉีด ที่ยื่นเข้าไปเครื่องกำเนิดไอน้ำและหดกลับได้ ตำแหน่งการพ่นแอมโมเนียหรือยูเรียเป็นตำแหน่งที่ ก๊าซเสียมีอุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้าลงและการรั่วของ แอมโมเนียจะเกิดขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปยูเรียจะสลายตัวกลายเป็นแอมโมเนียซึ่งจะทำปฏิกิริยา กับออกซิเจนกลายเป็น NO

6.4 ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดจากการเผาไหม้กำมะถันในเชื้อเพลิง กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับออกซิ-เจนในอากาศและกลายเป็น SO₂ เมื่อ SO₂ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดซัลเฟอร์ไทรออกไซด์ (SO₃) ตามสมการต่อไปนี้

$$SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_3$$

SO₃ จะทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นกรดกำมะถัน (sulfuric acid) ตามสมการต่อไปนี้

$$\mathrm{SO}_3 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} \longrightarrow \mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4$$

H₂SO₄ มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงจึงเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ นอกจากนี้อากาศที่มี SO₂ ยัง ทำให้ฝุ่นกลายเป็นฝนกรดซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศน์

เชื้อเพลิงแข็งแทบทุกชนิดมีกำมะถันเป็นส่วนประกอบซึ่งจะทำให้เกิด SO₂ การป้องกันไม่ให้เกิด SO₂ คือ การใช้ก๊าซธรรมชาติซึ่งแทบไม่มีกำมะถันเลย เหตุผลนี้เป็นเหตุผลหนึ่งที่ประเทศไทยใช้ก๊าซ ธรรมชาติผลิตไฟฟ้าในสัดส่วนที่มากเกือบ 70% อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าทั่วโลกส่วนใหญ่ยังคง ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นวิศวกรโรงไฟฟ้าต้องมีความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการปล่อย SO₂ ออก จากโรงไฟฟ้า

เมื่อ SO₂ ละลายในน้ำจะกลายเป็นกรดซัลฟูรัส (sulfurous acid, H₂SO₃) ซึ่งจะแตกตัวเป็น ไฮโดรเจนไอออน (H⁺) และไบซัลเฟตไอออน (HSO₃⁻) ไบซัลเฟตไอออนจะแตกตัวอย่างต่อเนื่องจน กลายเป็น H⁺ และซัลไฟต์ไอออน (SO₃²⁻) ในที่สุด

$$\begin{split} & \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 \\ & \text{H}_2\text{SO}_3 \longrightarrow \text{H}^+ + \text{HSO}_3^- \\ & \text{H}^+ + \text{HSO}_3^- \longrightarrow \text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ \end{split}$$

วิธีที่ได้ผลในการกำจัด SO₂ ออกจากก๊าซเสีย (flue gas desulfurization) คือ การเพิ่มการละลาย SO₂ ในน้ำ SO₂ ละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีที่ลดความเข้มข้นของ H+ ในน้ำ H+ ทำ ปฏิกิริยาเคมีกับอัลคาไลน์ไอออน (alkaline ion) เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) คาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) ดังนั้นสารเคมีที่มีกับอัลคาไลน์ไอออนจึงมีความสามารถ กำจัด SO₂ สารเคมีสองชนิดที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัด SO₂ ในก๊าซเสียได้แก่หินปูน (limestone) และน้ำทะเล

6.4.1 การกำจัด SO $_2$ ด้วยหินปูน

ระบบกำจัด SO₂ ด้วยหินปูน (CaCO₃) เป็นระบบที่ได้ความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันเพราะ ระบบนี้สามารถกำจัด SO₂ ได้ถึง 95% ถึง 98% และยังได้ผลผลิตเป็นยิบซัมที่นำไปใช้ประโยชน์ ได้ รูปที่ 6.10 แสดงระบบกำจัด SO₂ ด้วยหินปูน หินปูนต้องถูกบดให้ละเอียดก่อนผสมกับน้ำและพ่น เข้าหอปฏิกิริยาโดยมีก๊าซเสียไหลสวนทางกับน้ำผสมหินปูนและทำปฏิกิริยากันดังนี้

$$\begin{split} & \mathsf{CaCO}_3 + \mathsf{SO}_2 + \frac{1}{2}\mathsf{H}_2\mathsf{O} \longrightarrow \mathsf{CaSO}_3.\frac{1}{2}\mathsf{H}_2\mathsf{O} \\ & \mathsf{CaSO}_3.\frac{1}{2}\mathsf{H}_2\mathsf{O} + \frac{3}{2}\mathsf{H}_2\mathsf{O} \longrightarrow \mathsf{CaSO}_4.2\mathsf{H}_2\mathsf{O} \end{split}$$



รูปที่ 6.8: ระบบกำจัด SO₂ ด้วยหินปูน

หอปฏิกิริยาถูกออกแบบให้มีการผสมกันระหว่างน้ำหินปูนกับก๊าซเสียอย่างทั่วถึงเพื่อให้มีเศษ หินปูนเหลือน้อยที่สุดและ SO₂ ถูกกำจัดไปมากที่สุด ผลผลิตจากกระบวนการนี้คือ ยิบซัม (CaSO₄) และแคลเซียมซัลไฟต์ (CaSO₃) ยิบซัมแห้งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างหรือเพื่อการเกษตรได้ แต่แคลเซียมซัลไฟต์มีสภาพเป็นขยะเพราะไม่มีประโยชน์เหมือนยิบซัม ขยะที่เกิดจากแคลเซียมซัล ไฟต์จะเป็นสารแขวนลอย ก่อนการกำจัดทิ้งต้องเพิ่มสัดส่วนของของแข็งโดยเติมขี้เถ้าหรือปูนขาว เข้าไปเพื่อให้ขยะมีสภาพเป็นขยะแข็งที่ค่อนข้างคงรูปและสามารถนำไปฝังกลบได้ การลดปริมาณ ขยะที่เกิดจากแคลเซียมซัลไฟต์กระทำได้โดยการพ่นอากาศเข้าไปในหอเพื่อเพิ่มปฏิกิริยาการเปลี่ยน แคลเซียมซัลไฟต์เป็นยิบซัม

ก๊าซเสียที่ถูกกำจัด SO₂ แล้วจะไหลออกทางด้านบนของหอ ก๊าซเสียนี้เป็นก๊าซเสียในสภาวะ อิ่มตัว (saturated) เนื่องจากมีไอน้ำผสมอยู่ในปริมาณสูงสุด นอกจากนี้ยังมีละอองน้ำจำนวนมาก ปะปนในก๊าซเสีย ละอองน้ำเหล่านี้มีกรดซัลฟูริกเป็นส่วนผสมและมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง ตรงทางออก จากหอของก๊าซเสียจึงควรติดตั้งอีตเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิก๊าซเสียและทำให้ละอองน้ำระเหยเป็น ไอ ความร้อนที่ให้อีตเตอร์อาจได้มาจากก๊าซเสียที่ไหลเข้าหอ นอกจากนี้อาจมีการติดตั้งเครื่องดัก ละอองน้ำ (mist eliminator) ซึ่งอาจทำด้วยแผ่นกั้นเอียงหลายแถว ก๊าซเสียเสียจะสามารถไหลตาม แนวเอียงของแผ่นกั้นได้ แต่ละอองน้ำซึ่งมีความเฉื่อยสูงจะถูกดักโดยแผ่นกั้นและไหลตกกลับลงไป ในหอ

สารแขวนลอยที่ไหลออกทางด้านล่างของหอประกอบด้วยยิบซัมที่มีลักษณะเป็นก้อนของแข็ง และเศษหินปูนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) จะแยกยิบซัมออกจากเศษหินปูน โดยใช้หลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกันระหว่างก้อนยิบซัมขนาดใหญ่กับเศษหินปูนขนาด เล็ก ยิบซัมที่แยกออกมาจะถูกนำไปชะล้างระทำให้แห้งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในขณะที่เศษ หินปูนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการกำจัด SO₂ ใหม่

6.4.2 การกำจัด SO₂ ด้วยน้ำทะเล

น้ำทะเลมีค่า pH ประมาณ 8 และมีไอออน CO₃²⁻ และ HCO₃⁻ จำนวนมาก จึงมีคุณสมบัติ เหมาะสมกับการใช้ในระบบกำจัด SO₂ ข้อได้เปรียบสำคัญของระบบกำจัด SO₂ นี้คือ น้ำทะเลไม่มี ค่าใช้จ่ายและมีปริมาณไม่จำกัด อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าที่ใช้ระบบนี้ต้องอยู่ติดทะเล อุปกรณ์หลัก ของระบบนี้คือ หอปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ภายในหอมีน้ำทะเลไหลเข้าทางด้านบนและก๊าซ เสียไหลเข้าทางด้านล่าง ละอองน้ำทะเลกับ SO₂ ในก๊าซเสียจะผสมกันและทำปฏิกิริยากันดังนี้

$$SO_2 + CO_3^{2-} \longrightarrow SO_3^{2-} + CO_2$$

$$SO_2 + HCO_3^{-} \longrightarrow HSO_3^{-} + CO_2$$

ก๊าซเสียที่ผ่านกระบวนการนี้จะไหลผ่านเครื่องดักละอองน้ำก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมทางปล่อง น้ำทะเลที่ผ่านกระบวนการจะประกอบด้วย SO₃⁻⁻ และ HSO₃⁻⁻ และมีค่าสภาพเป็นกรด จึงยังไม่ สามารถปล่อยกลับสู่ทะเลได้ น้ำทะเลนี้จะผสมกับน้ำทะเลสดจากทะเลเพื่อลดสภาพความเป็นกรด



รูปที่ 6.9: ระบบกำจัด SO₂ ด้วยน้ำทะเล

แล้วจึงไหลเข้าสู่บ่อเติมอากาศเพื่อให้ SO $_3^{2-}$ และ HSO $_3^{-}$ ทำปฏิกิริยากับ O $_2$ ในอากาศดังนี้

$$SO_3^{2-} + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_4^{2-}$$

 $HSO_3^- + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow HSO_4^-$

หลังจากนั้นค่า pH ของน้ำทะเลนี้จะเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 ถึงแม้ว่าค่า pH ยังคงต่ำกว่าค่า pH ของน้ำทะเลสด แต่ก็ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและสามารถปล่อยกลับสู่ทะเลได้

คำถามท้ายบท

- NO_x หมายถึงก๊าซใด
- 2. ฝุ่นละอองในก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้ามีที่มาจากอะไร
- 3. จงอธิบายการทำงานของอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต
- 4. การทำให้ฝุ่นที่เกาะบนผิวของอุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยถุงกรองตกลงสู่ถังพักฝุ่นใช้วิธีใดได้บ้าง
- 5. จงอธิบายการควบคุมการเผาไหม้เพื่อลดการเกิด NO_x
- 6. การรั่วของแอมโมเนียในระบบกำจัด NO_x แบบ SCR ส่งผลกระทบเชิงลบอย่างไร
- 7. ระบบกำจัด NO_x แบบ SNCR ควรติดตั้งที่ตำแหน่งใด
- 8. อะไรคือผลพลอยได้ของการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยหินปูน
- 9. ไฮโดรไซโคลนทำหน้าที่อะไรในระบบกำจัด SO₂ ด้วยหินปูน
- 10. คุณสมบัติข้อใดทำให้น้ำทะเลสามารถใช้การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซเสียได้
- 11. ทำไมน้ำทะเลที่ผ่านกระบวนการกำจัด SO₂ จึงควรเข้าบ่อเติมอากาศก่อนปล่อยทิ้งสู่ทะเล

บทที่ 7 เครื่องกังหันไอน้ำ

7.1 หลักการทำงาน

ไอน้ำที่ไหลเข้าเครื่องกังหันไอน้ำมีความดันและอุณหภูมิสูง การไหลผ่านเครื่องกังหันไอน้ำทำให้ ความดันของไอน้ำลดลง รูปที่ 7.1 แสดงแผนภูมิ h-s ของการขยายตัวของไอน้ำในเครื่องกังหันไอ น้ำ ไอน้ำมีความดัน p_{in} และอุณหภูมิ T_{in} ตรงทางเข้า ไอน้ำมีความดัน p_{out} และอุณหภูมิ T_{out} ตรง ทางออก เอนทัลปีของไอน้ำตรงทางเข้าและทางออกคือ h_{in} และ h_{out} ดังนั้นงานที่ได้จากกังหันคือ $h_{in} - h_{out}$ เส้นการขยายตัวไม่ใช่เส้นตรงแนวดิ่งเนื่องจากความผวนกลับไม่ได้ (irreversibilities) ของกระบวนการขยายตัว เส้นการขยายตัวทำให้สามารถหาค่าเอนทัลปีระหว่างทางเข้าและทางออก $(h_a, h_b$ และ h_c) ถ้าทราบความดัน $(p_a, p_b$ และ p_c)



รูปที่ 7.1: การขยายตัวของไอน้ำในเครื่องกังหันไอน้ำที่มี 4 ขั้นทำงาน

เครื่องกังหันไอน้ำอาจแบ่งเป็นสองประเภทหลักคือ เครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมี (radialflow turbine) และเครื่องกังหันแบบไหลตามแนวแกน (axial-flow turbine) เครื่องกังหันไอน้ำทั้งสอง

บทที่ 7. เครื่องกังหันไอน้ำ

ประเภทประกอบด้วยโรเตอร์ที่มีใบพัดจำนวนมาก ความดันที่สูงของไอน้ำส่งแรงกระทำต่อใบพัดซึ่ง ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงและเกิดการแปลงพลังงานของไอน้ำเป็นพลังงานกลจากการหมุน ของเพลา ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างเครื่องกังหันไอน้ำทั้งสองประเภทคือ ทิศทางการไหลของไอ น้ำ ในกรณีของเครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมี ไอน้ำไหลเข้าโรเตอร์ของทางรัศมีนอกของโรเตอร์ ไหลผ่านโรเตอร์ตามแนวรัศมี และไหลออกจากโรเตอร์ทางรัศมีใน ในกรณีของเครื่องกังหันแบบไหล ตามแนวแกน ไอน้ำไหลเข้าและออกจากโรเตอร์ตามแนวแกนของเพลา เครื่องกังหันแบบไหลตาม แนวรัศมีมีข้อจำกัดที่ขนาดเล็กและอัตราการไหลของไอน้ำต่ำ จึงไม่เหมาะกับการใช้ในโรงไฟฟ้า ใน ทางตรงกันข้าม เครื่องกังหันแบบไหลตามแนวแกนสามารถออกแบบให้มีขนาดใหญ่และอัตราการ ไหลของไอน้ำสูง เครื่องกังหันไอน้ำในโรงไฟฟ้าเกือบทั้งหมดเป็นประเภทนี้

7.2 ขั้นทำงาน

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องกังหันไอน้ำคือใบพัดที่จัดเรียงเป็นแถวโดยมีแถวของใบพัดนิ่ง (fixed blades) สลับกับแถวของใบพัดหมุน (rotating blades) อยู่ในโครงหุ้ม (casing) ดังแสดงใน รูปที่ 7.2 สเตเตอร์ (stator) หมายถึงใบพัดนิ่งที่ยึดติดกับโครงหุ้ม โรเตอร์ (rotor) หมายถึงใบพัดหมุน ที่ยึดติดกับแกนหมุน ฐานของใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนมีลักษณะเป็นสลักเพื่อให้การยึดติดมีความ มั่นคง สเตเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของไอน้ำหรือลดความดันไอน้ำ โรเตอร์ทำหน้าที่ แปลงพลังงานของไอน้ำเป็นพลังงานกลจากการหมุนของใบพัด



รูปที่ 7.2: สเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกังหันไอน้ำ

หนึ่งขั้นทำงาน (stage) ของเครื่องกังหันไอน้ำหมายถึงหนึ่งแถวของใบพัดนิ่งและหนึ่งแถวของ ใบพัดหมุน หนึ่งขั้นทำงานให้กำลังงานไม่มากนัก เครื่องกังหันไอน้ำจึงต้องประกอบด้วยหลายขั้น ทำงานโดยไอน้ำจะขยายตัวในแต่ละขั้นทำงาน รูปที่ 7.1 แสดงการแผนภาพ h-s ของกระบวนการ ขยายตัวของไอน้ำในเครื่องกังหันไอน้ำที่มี 4 ขั้นทำงาน จะเห็นว่ามีการลดลงของเอนทัลปีควบคู่ กับการลดลงของความดันในแต่ละขั้นทำงาน ขั้นทำงานของเครื่องกังหันไอน้ำแบ่งเป็นสองแบบตาม ลักษณะของใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนได้แก่ขั้นทำงานแรงดล (impulse stage) และขั้นทำงานแรง ปฏิกิริยา (reaction stage)

7.2.1 ขั้นทำงานแรงดล

รูปที่ 7.3 แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนในขั้นทำงานแรงดล เป็นที่น่าสังเกตว่า ใบพัดหมุนมี ลักษณะสมมาตรซึ่งทำให้มุมเข้าและมุมออกของใบพัดเท่ากัน ไอน้ำไหลเข้าและออกในทิศทางตั้ง ฉากกับแกนหมุน ทิศทางการไหลของไอน้ำเปลี่ยนเมื่อไอน้ำไหลผ่านใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน รูปที่ 7.3 แสดงให้เห็นอีกด้วยว่า ความดันลดลงและความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อไอน้ำไหลผ่านใบพัดนิ่ง ความเร็ว ไอน้ำลดลงในใบพัดหมุนเนื่องจากมีการแปลงพลังงานซึ่งทำให้พลังงานจลน์ของไอน้ำลดลง



รูปที่ 7.3: ขั้นทำงานแรงดล

การนำขั้นทำงานแรงดลมาต่อกันทำได้สองแบบ การต่อแบบแรกเรียกว่า การต่อแบบความดัน ผสม (pressure compounding) ซึ่งเป็นการนำขั้นทำงานแรงดลที่เหมือนกันนำมาต่อกัน รูปที่ 7.4 แสดงขั้นทำงานแรงดลสองขั้นทำงานแบบความดันผสม (two pressure-compounded impulse stages) จะเห็นว่าไอน้ำไหลเข้าและออกแต่ละขั้นทำงานในทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุน ความดัน ไอน้ำลดลงในใบพัดนิ่งและไม่เปลี่ยนแปลงในใบพัดหมุนของแต่ละขั้นทำงาน โพรไฟล์ความเร็วใน แต่ละขั้นทำงานเหมือนกัน ดังนั้นทุกขั้นทำงานจึงให้กำลังงานเท่ากัน

การต่อแบบที่สองเรียกว่า การต่อแบบความเร็วผสม (velocity compounding) ใบพัดนิ่งของ ทำงานแรกทำหน้าที่เป็นหัวฉีด แต่ใบพัดนิ่งของขั้นทำงานอื่นไม่ได้ทำหน้าที่เป็นหัวฉีด แต่ทำหน้าที่ เปลี่ยนทิศทางการไหลของไอน้ำโดยไม่ได้ลดความดันและเพิ่มความเร็วของไอน้ำรูปที่ 7.5 แสดงขั้น ทำงานแรงดลสองขั้นทำงานแบบความเร็วผสม (two velocity-compounded impulse stages) จะ เห็นว่า ความดันของไอน้ำลดลงในใบพัดนิ่งของทำงานแรกและคงที่ในใบพัดนิ่งในของทำงานที่สอง ความเร็วไอน้ำลดลงในใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรกและขั้นทำงานที่สอง แต่การลดลงในขั้นทำงาน แรกจะมากกว่าในขั้นทำงานที่สอง



7.2.2 ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา

ข้อแตกต่างระหว่างขั้นทำงานแรงปฏิกิริยากับขั้นทำงานแรงดลคือ การเปลี่ยนแปลงของความ ดันไอน้ำที่ไหลผ่านใบพัดหมุน ความดันคงที่เมื่อไอน้ำไหลผ่านใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงดล แต่ ความดันลดลงเมื่อไอน้ำไหลผ่านใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เอนทัลปีลดลงตาม ไปด้วย ใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นหัวฉีดที่หมุนรอบแกนด้วยความเร็วสูง งานที่กระทำโดยโรเตอร์ของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาจึงได้มาจากแรงดันของไอน้ำและพลังงานจลน์ ของไอน้ำ สัดส่วนของงานที่ได้จากแรงดันของไอน้ำเทียบกับงานที่ได้ทั้งหมดคือ ระดับปฏิกิริยา (reaction degree) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรดังนี้

$$R = \frac{\Delta h_r}{\Delta h_s + \Delta h_r} \tag{7.1}$$

โดยที่ ∆h_s เป็นเอนทัลปีที่ลดลงในใบพัดนิ่งและ ∆h_r เป็นเอนทัลปีที่ลดลงในใบพัดหมุน ระดับ ปฏิกิริยามีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นกับการออกแบบใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% หมายถึงขั้นทำงานที่มีการลดลงของเอนทัลปีในใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนเท่ากัน ใบพัดนิ่ง และใบพัดหมุนจึงมีรูปร่างที่เหมือนกัน รูปที่ 7.6 แสดงใบพัดในขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา และการ เปลี่ยนแปลงของความดันและความเร็วไอน้ำในการไหลผ่านขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% เป็นที่น่า สังเกตว่าใบพัดในโรเตอร์ของขั้นทำงานปฏิกิริยามีลักษณะคล้ายแพนอากาศ (air foil)



รูปที่ 7.6: ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50%

7.3 ใบพัดของกังหันไอน้ำ

ใบพัดนิ่งของขั้นทำงานแรกของเครื่องกังหันไอน้ำทำหน้าที่เป็นหัวฉีดเพราะไอน้ำมีความดันลุด ลงและความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านใบพัดนิ่ง กำหนดให้ h₀ และ V₀ เป็นเอนทัลปีและความเร็วไอน้ำ ทางเข้า และ h₁ และ V₁ เป็นเอนทัลปีและความเร็วไอน้ำทางออก ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงานในหัว

้ฉีด ผลบวกของเอนทัลปีและพลังงานจลน์จะไม่เปลี่ยนแปลงในการไหลผ่านใบพัดนิ่ง

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2} = h_1 + \frac{V_1^2}{2}$$

เอนทัลปีของไอน้ำที่ลดลงจึงมีค่าเท่ากับ

$$\Delta h = h_0 - h_1 = \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_0^2}{2}$$

โดยทั่วไป V_0 น้อยกว่า V_1 มาก ดังนั้น

$$\Delta h = \frac{V_1^2}{2} \tag{7.2}$$

$$V_1 = \sqrt{2\Delta h} \tag{7.3}$$

การไหลของไอน้ำผ่านใบพัดหมุนเกี่ยวข้องกับสามความเร็ว กำหนดให้ Vี เป็นเวกเตอร์ความเร็ว สัมบูรณ์ (absolute velocity) ถ้า Uี เป็นเวกเตอร์ความเร็วใบพัด (blade velocity) Wี ซึ่งหมายถึง ความเร็วสัมพัทธ์ไอน้ำเทียบกับใบพัด (relative velocity) คำนวณได้จาก

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \tag{7.4}$$

ความเร็วทั้งสามเวกเตอร์ประกอบกันเป็น สามเหลี่ยมความเร็ว (velocity triangle) รูปที่ 7.7 แสดง สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าและทางออกของใบพัดหมุน จะเห็นว่าความเร็วใบพัดมีค่าคงที่ในขณะ ที่ความเร็วสัมบูรณ์และความเร็วสัมพัทธ์อาจเปลี่ยนแปลง มุมของความเร็วสัมบูรณ์ทางเข้าหรือ V₁ เรียกว่า มุมหัวฉีด (nozzle angle) เนื่องจากไอน้ำที่ไหลเข้าใบพัดหมุนก็คือไอน้ำที่ไหลออกจากหัว ฉีดหรือสเตเตอร์ที่มุมนี้ นอกจากนี้มุมเข้า (ϕ_1) และมุมออก (ϕ_2) ของใบพัดเท่ากับมุมเข้าและมุม ออกของความเร็วสัมพัทธ์เนื่องจากใบพัดมักถูกออกแบบให้ความเร็วสัมพัทธ์เข้าและออกจากใบพัด ในทิศทางสัมผัสกับใบพัด

แรงที่กระทำต่อใบพัดเท่ากับผลต่างระหว่างโมเมนตัมของไอน้ำที่เข้าสู่และออกจากใบพัดใน ทิศทางขนานกับแถวใบพัดหมุน

$$F = \dot{m}(V_1 \cos \theta_1 + V_2 \cos \theta_2) \tag{7.5}$$

้ โดยที่ *m*๋ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ ผลคูณของแรงกับความเร็วใบพัดคือ กำลังงานที่ได้จาก ใบพัดหมุนของโรเตอร์

$$P = \dot{m}U(V_1\cos\theta_1 + V_2\cos\theta_2) \tag{7.6}$$

อีกรูปหนึ่งของกำลังงานได้จากการใช้กฎข้อที่หนึ่งของพลศาสตร์ความร้อน กำลังงานที่กระทำต่อ ใบพัดเท่ากับอัตราการลดลงของเอนทัลปีและพลังงานจลน์ของไอน้ำที่ไหลผ่านใบพัด ดังนั้น

$$P = \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} - h_2 - \frac{V_2^2}{2} \right)$$
(7.7)



รูปที่ 7.7: สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้า (บน) และสามเหลี่ยมความเร็วทางออก (ล่าง)

โดยที่ h_1 และ h_2 คือเอนทัลปีทางเข้าและทางออก ผู้สังเกตการณ์ที่เคลื่อนที่พร้อมกับใบพัดจะเห็น ว่าความเร็วไอน้ำเข้าและออกคือ W_1 และ W_2 ตามลำดับ และกำลังงานที่คำนวณได้ในกรอบอ้างอิง นี้จะเป็นศูนย์เนื่องจากใบพัดไม่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กับกรอบอ้างอิง ดังนั้น

$$0 = \dot{m} \left(h_1 + \frac{W_1^2}{2} - h_2 - \frac{W_2^2}{2} \right)$$
$$\implies h_1 - h_2 = -\frac{1}{2} \left(W_1^2 - W_2^2 \right)$$
(7.8)

แทนค่า $h_1 - h_2$ ลงไปในสมการ (7.7)

$$P = \frac{\dot{m}}{2} \left[\left(V_1^2 - V_2^2 \right) - \left(W_1^2 - W_2^2 \right) \right]$$
(7.9)

สมการ (7.9) อาจเขียนใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติต่อไปนี้

$$V_1^2 = W_1^2 + U^2 + 2W_1U\cos\phi_1$$
$$V_2^2 = W_2^2 + U^2 - 2W_2U\cos\phi_2$$

ซึ่งทำให้สมการ (7.9) กลายเป็น

$$P = \dot{m}U(W_1 \cos \phi_1 + W_2 \cos \phi_2)$$
(7.10)

ถ้านำสามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าใบพัดหมุนและสามเหลี่ยมความเร็วทางออกในรูปที่ 7.7 มาวาง ซ้อนกันโดยทั้งสองสามเหลี่ยมมีฐานเดียวกัน จะพบว่านิพจน์ในวงเล็บของสมการ (7.6) และ (7.10) คือ ระยะห่างระหว่างจุดยอด (vertex) ของสามเหลี่ยมทั้งสอง รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบสามเหลี่ยมความเร็วของขั้นทำงานแรงดลและขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% ใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงดลเป็นใบพัดสมมาตร ดังนั้น $\phi_1 = \phi_2$ ในรูปด้านซ้าย ในทางตรงข้าม ใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% มีมุมเข้าไม่เท่ากับมุมออก อย่างไรก็ตาม การที่ผลต่าง เอนทัลปีในใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% มีค่าเท่ากันทำให้สามเหลี่ยม ความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน ดังนั้น $\phi_1 = \theta_2$ และ $\phi_2 = \theta_1$ ในรูปด้านขวา นอกจากนี้ $W_1 = V_2$ และ $W_2 = V_1$



รูปที่ 7.8: สามเหลี่ยมความเร็วของขั้นทำงานแรงดล (ซ้าย) และขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% (ขวา)

กำลังงานของของขั้นทำงานได้จากไอน้ำที่ไหลเข้าใบพัดหมุนด้วยความเร็วสูง ไอน้ำนี้เป็นไอน้ำ ความดันต่ำซึ่งมาจากไอน้ำความดันสูงที่ไหลเข้าหัวฉีด ดังนั้นจึงมีการแปลงพลังงานศักย์ของไอน้ำ เป็นพลังงานกลในการไหลผ่านขั้นทำงานของเครื่องกังหันไอน้ำ ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงาน คือ ประสิทธิภาพใบพัด (blade efficiency)

$$\eta_B = \frac{P}{\dot{m}\Delta h} \tag{7.11}$$

ในกรณีของขั้นทำงานแรงดล ∆h คือ เอนทัลปีที่ลดลงในหัวฉีดของสเตเตอร์ตามสมการ (7.3) แทน ค่าในสมการ (7.14) จะได้ประสิทธิภาพใบพัดของขั้นทำงานแรงดล

$$\eta_B = \frac{P}{\frac{1}{2}\dot{m}V_1^2} \tag{7.12}$$

ในกรณีของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา Δh เป็นผลรวมของเอนทัลปีที่ลดลงในใบพัดนิ่ง (h_0-h_1) และ เอนทัลปีที่ลดลงในใบพัดหมุน (h_1-h_2)

$$\Delta h = \frac{1}{2} [V_1^2 + (W_2^2 - W_1^2)] \tag{7.13}$$

และประสิทธิภาพใบพัดของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาคือ

$$\eta_B = \frac{P}{\frac{1}{2}\dot{m}[V_1^2 + (W_2^2 - W_1^2)]}$$
(7.14)

ตัวอย่าง เครื่องกังหันไอน้ำประกอบด้วยแรงปฏิกิริยา 50% หนึ่งขั้น มุมของหัวฉีดเท่ากับ 20°C ความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำที่ไหลเข้าโรเตอร์เท่ากับ 50 m/s และความเร็วใบพัดเท่ากับ 30 m/s ถ้าไอ น้ำมีอัตราการไหล 8 kg/s จงหากำลังงานของเครื่องกังหันและประสิทธิภาพใบพัด

วิธีทำ

ขั้นตอนแรกคือ การหามุมเข้าของใบพัด (φ₁) ซึ่งหาได้จากมุมของหัวฉีด (θ₁) ที่โจทย์ระบุค่ามา ให้

$$W_1 \sin \phi_1 = V_1 \sin \theta_1$$
$$W_1 \cos \phi_1 = V_1 \cos \theta_1 - U$$
$$\phi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{V_1 \sin \theta_1}{V_1 \cos \theta_1 - U} \right]$$
$$= \tan^{-1} \left[\frac{50 \sin 20^\circ}{50 \cos 20^\circ - 30} \right]$$
$$= 45.2^\circ$$

ขั้นตอนต่อมาคือ การคำนวณ W_1 ได้จาก

$$W_1 = \frac{V_1 \sin \theta_1}{\sin \phi_1}$$
$$= \frac{50 \sin 20^\circ}{\sin 45.2^\circ}$$
$$= 24.1 \text{ m/s}$$

ขั้นตอนสุดท้ายคือ การคำนวณ P จากสมการ (7.11) และ η_B จากสมการ (7.15) โดยใช้ลักษณะ เฉพาะของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% ($\phi_2= heta_1$ และ $W_2=V_1$)

$$\begin{split} P &= 8 \times 30(24.1 \sin 45.2^\circ + 50 \sin 20^\circ) \\ &= 15.4 \; \mathrm{kW} \\ \eta_B &= \frac{1.54 \times 10^4}{\frac{1}{2} \times 8[50^2 + (50^2 - 24.1^2)]} \\ &= 0.87 \end{split}$$

7.4 ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุด

กำลังงานจะขึ้นกับความเร็วใบพัดโดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อความเร็วใบพัดมีค่าเหมาะสมที่สุดค่า หนึ่ง ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดมีค่าต่างกันในขั้นทำงานแรงดลและขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา

7.4.1 ขั้นทำงานแรงดล

ในกรณีของขั้นทำงานแรงดลในอุดมคติ ไอน้ำผ่านใบพัดหมุนที่สมมาตร (φ₁ = φ₂) และไม่มี ความเสียดทาน (W₁ = W₂) ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดจะทำให้ส่วนประกอบแนวนอนของ V₂ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสามเหลี่ยมความเร็วทางออกจากใบพัดเป็นสามเหลี่ยมมุมฉาก (θ₂ = 90°) ดังแสดงในรูปที่ 7.9 สามเหลี่ยมความเร็วทางออกแสดงให้เห็นว่า ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุด (U_{opt}) มีความสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์ทางออกดังนี้

$$U_{opt} = W_2 \cos \phi_2$$

นอกจากนี้สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าแสดงให้เห็นว่า

$$V_1 \cos \theta_1 = W_1 \cos \phi_1 + U_{opt}$$

สมการทั้งสองสมการข้างต้นให้ค่าความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดที่ขึ้นกับความเร็วสัมบูรณ์ของไอ น้ำ

$$U_{opt} = \frac{V_1 \cos \theta_1}{2} \tag{7.15}$$

แทนค่า Uopt ลงในสมการ (7.6) จะพบว่า กำลังงานสูงสุดคือ

$$P_{max} = \frac{\dot{m}}{2} \left(V_1 \cos \theta_1 \right)^2$$
(7.16)

แทนค่า P_{max} ในสมการ (7.12) จะได้ประสิทธิภาพใบพัดสูงสุดของขั้นทำงานแรงดล

$$\eta_{B,max} = \cos^2 \theta_1 \tag{7.17}$$



รูปที่ 7.9: สามเหลี่ยมความเร็วในโรเตอร์ของขั้นทำงานแรงดลที่ใบพัดมีความเร็วที่เหมาะสมที่สุด
สมการ (7.17) บอกว่าประสิทธิภาพใบพัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1 ถ้า $\theta_1 = 0^\circ$ กล่าวคือใบพัดหมุนมี รูปคล้ายเกือกม้า แต่การออกแบบสเตเตอร์เพื่อพ่นไอน้ำสู่ใบพัดหมุนดังกล่าวจะประสบความยาก ลำบากอย่างยิ่ง ดังนั้นในทางปฏิบัติ θ_1 จึงมากกว่า 0° เครื่องกังหันไอน้ำโดยทั่วไปมีค่า θ_1 ประมาณ 10° ถึง 15°

ตัวอย่าง ไอน้ำไหลเข้าใบพัดหมุนด้วยความเร็ว 600 m/s มุมหัวฉีดเท่ากับ 15° จงหาความเร็ว ใบพัดที่เหมาะสมที่สุดและประสิทธิภาพใบพัดสูงสุด

ผลเฉลย ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคำนวณด้วยสมการ (7.15)

$$U_{opt} = \frac{600 \times \cos 15^{\circ}}{2}$$
$$= 290 \text{ m/s}$$

ประสิทธิภาพใบพัดคำนวณด้วยสมการ (7.17)

$$\eta_B = \cos^2 15^\circ$$
$$= 0.93$$

ตัวอย่างที่แล้วแสดงให้เห็นว่า ขั้นทำงานแรงดลมีความเร็วใบพัดสูงมาก ผลเสียที่เกิดขึ้นคือ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากจะมีความเสียดทานมากและความเค้นในใบพัดหมุนที่เกิดจากแรงหนี ศูนย์กลางก็จะมากเช่นกัน การลดความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดสามารถกระทำได้โดยการใช้ขั้น ทำงานแรงดลมากกว่าหนึ่งขั้น

รูปที่ 7.10 แสดงสามเหลี่ยมความเร็วของขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมสองขั้นที่ใบพัดมีความ เร็วที่เหมาะสมที่สุด สามเหลี่ยมความเร็วทางออกของขั้นทำงานที่สองแสดงให้เห็นว่า ความเร็วใบพัด ที่เหมาะสมที่สุด (U_{opt}) มีความสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์ทางออก (W₄) ดังนี้

$$U_{opt} = W_4 \cos \phi_2$$

นอกจากนี้สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าของขั้นทำงานที่สองแสดงให้เห็นว่า

$$V_3\cos\theta_2 = W_3\cos\phi_2 + U_{opt}$$

สมมุติว่าใบพัดของขั้นทำงานที่สองไม่มีความเสียดทาน ($W_3=W_4$) ดังนั้น

$$V_3 \cos \theta_2 = 2U_{opt} \tag{7.18}$$

รูปที่ 7.10 แสดงให้เห็นว่าระหว่าง V_2 และ V_3 มีใบพัดนิ่งซึ่งเป็นใบพัดสมมาตรทำหน้าที่เปลี่ยน ทิศทางการไหลของไอน้ำ สมมุติว่าไม่มีความเสียดทานในใบพัดนี้ ($V_2=V_3$) ดังนั้น

$$V_2 \cos \theta_2 = 2U_{opt} \tag{7.19}$$



รูปที่ 7.10: สามเหลี่ยมความเร็วในขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมสองขั้นที่ใบพัดมีความเร็วเหมาะ สมที่สุด

สามเหลี่ยมความเร็วทางออกของขั้นทำงานที่หนึ่งแสดงให้เห็นว่า U_{opt} มีความสัมพันธ์กับ W_2 ดังนี้

$$W_2 \cos \phi_1 = V_2 \cos \theta_2 + U_{opt}$$
$$= 3U_{opt}$$

สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าของขั้นทำงานที่หนึ่งแสดงให้เห็นว่า

$$V_1 \cos \theta_1 = W_1 \cos \phi_1 + U_{opt}$$

สมมุติว่าใบพัดของขั้นทำงานที่สองไม่มีความเสียดทาน ($W_1=W_2$) ดังนั้น

$$V_1 \cos \theta_1 = 4U_{opt} \tag{7.20}$$

ค่าความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดที่ขึ้นกับความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำจึงเท่ากับ

$$U_{opt} = \frac{V_1 \cos \theta_1}{4}$$

การวิเคราะห์หาค่าความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดในกรณีของขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมที่ มี *n* ขั้นทำงานอาจใช้วิธีเหมือนกับการวิเคราะห์ข้างต้น ผลที่ได้คือ

$$U_{opt} = \frac{V_1 \cos \theta_1}{2n} \tag{7.21}$$

ถึงแม้ว่าขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมสามารถลดความเร็วที่เหมาะสมที่สุดของใบพัดได้อย่าง มาก แต่ใบพัดหมุนในแต่ละขั้นจะทำงานไม่เท่ากัน ในกรณีที่มีสองขั้นทำงาน กำลังงานในขั้นทำงาน ที่หนึ่ง (P₁) และขั้นทำงานที่สอง (P₂) ตามสมการ (7.6) คือ

$$P_1 = \dot{m}U_{opt}(V_1\cos\theta_1 + V_2\cos\theta_2)$$
$$P_2 = \dot{m}U_{opt}(V_3\cos\theta_2)$$

แทนค่า $V_1 \cos \theta_1, V_2 \cos \theta_2$ และ $V_3 \cos \theta_2$ จากสมการ (7.20), (7.19) และ (7.18) ตามลำดับ

$$P_1 = 6\dot{m}U_{opt}^2 \tag{7.22}$$

$$P_2 = 2\dot{m}U_{opt}^2 \tag{7.23}$$

สมการ (7.22) และ (7.23) แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของงานที่ทำโดยขั้นทำงานที่หนึ่งต่องานที่ทำ โดยขึ้นทำงานที่สองเท่ากับ 3 : 1 การที่แต่ละขั้นของขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมทำงานไม่เท่ากัน นับเป็นข้อเสียเปรียบของขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมเนื่องจากค่าใช้จ่ายของแต่ละขั้นทำงานใกล้ เคียงกันแต่ขั้นทำงานทายกลับให้งานที่น้อยมากเมื่อเทียบกับขั้นทำงานแรก ในกรณีที่มี 3 ขั้นทำงาน การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของงานที่ทำในแต่ละขั้นคือ 5 : 3 : 1 ดังนั้นการใช้ขั้นทำงาน แรงดลุความเร็วผสมมากกว่า 2 ขั้นทำงานจึงไม่เป็นที่นิยม

เพื่อลดความเร็วใบพัดและแบ่งงานใบพัดให้เท่า ๆ กัน การลดความเร็วที่เหมาะสมที่สุดอาจใช้ ขั้นทำงานแรงดลความดันผสม ตามที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ว่าแต่ละขั้นทำงานของขั้นทำงานแรงดล ความดันผสมประกอบด้วยหัวฉีดและใบพัดหมุนเหมือนกัน ดังนั้นเอนทัลปีจึงลดลงเท่ากับในแต่ละ ขั้นทำงาน ถ้าเอนทัลปีไอน้ำลดลงรวมทั้งสิ้น Δh จากการไหลผ่านขั้นทำงานแรงดลความดันผสมมี n ขั้นทำงานเอนทัลปีที่ลดลงในแต่ละขั้นจะเท่ากับ Δh/n ความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำที่ไหลเข้าใบพัด หมุนในแต่ละขั้นทำงานจึงมีค่าเท่ากับ

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\Delta h}{n}} \tag{7.24}$$

เมื่อคำนวณความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดด้วยสมการ (7.15) จะพบว่า U_{opt} ลดลงตาม n แต่ลด ลงในอัตราที่น้อยกว่าขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมที่มีจำนวนขั้นทำงานเท่ากัน นอกจากนี้รูปที่ 7.4 ยังแสดงให้เห็นว่ามีความดันตกคร่อมหัวฉีดในแต่ละขั้นทำงานของขั้นทำงานแรงดลความดันผสมซึ่ง ทำให้ไอน้ำบางส่วนอาจไหลอ้อมหัวฉีด สิ่งนี้เป็นสาเหตุหนึ่งของการสูญเสียพลังงานและนับเป็นข้อ เสียของขั้นทำงานแรงดลความดันผสม

7.4.2 ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา

ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนปฏิกิริยา 50% มีสามเหลี่ยมความเร็วเข้าเหมือนกับสาม เหลี่ยมความเร็วออก ในกรณีที่ความเร็วใบพัดมีค่าเหมาะสมที่สุดทั้งสามเหลี่ยมความเร็วเข้าและ ออกเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในรูปที่ 7.11 ซึ่งทำให้ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดมีค่า เท่ากับ

$$U_{opt} = V_1 \cos \theta_1 \tag{7.25}$$

แทนค่า U_{opt} และ $\theta_2 = 90^\circ$ ในสมการ (7.11) จะพบว่ากำลังงานสูงสุดคือ

$$P_{max} = \dot{m} \left(V_1 \cos \theta_1 \right)^2 \tag{7.26}$$

ประสิทธิภาพสูงสุดได้จากการแทนค่า P_{max} จากสมการ (7.27) ในสมการ (7.15) หลังจากการจัดรูป สมการที่ได้พบว่า

$$\eta_{B,max} = \frac{2\cos^2\theta_1}{1+\cos^2\theta_1}$$
(7.27)



รูปที่ 7.11: สามเหลี่ยมความเร็วในขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% เมื่อความเร็วใบพัดมีค่าเหมาะสม ที่สุด

ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยามีความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดสูงกว่าขั้นทำงานแรงดล นอกจากนี้ขั้น ทำงานแรงปฏิกิริยายังมีข้อเสียที่เหมือนขั้นทำงานแรงดลความดันผสมคือ ความดันที่ลดลงในใบพัด นิ่งและใบพัดหมุนจะทำให้ไอน้ำรั่วผ่านใบพัด แต่ปัญหานี้ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาจะรุนแรงกว่า ดังนั้น ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาจึงนิยมใช้กับไอน้ำความดันต่ำที่ป้องกันการรั่วไหลได้ง่าย และจากการที่ไอ น้ำมีความดันต่ำ ความหนาแน่นก็ต่ำตามไปด้วย ใบพัดของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาจึงต้องมีความสูง พอสมควรเพื่อให้มีพื้นที่สำหรับไอน้ำไหลผ่านมากพอ ผลที่ตามมาคือความเร็วใบพัดจะเปลี่ยนแปลง ค่อนข้างมากจากฐานของโรเตอร์สู่ยอดของโรเตอร์ กล่าวคือ ความเร็วใบพัดที่ยอดอาจเป็นสองเท่า ของความเร็วใบพัดที่ฐาน ในขณะที่ความเร็วสัมบูรณ์ไอน้ำคงที่ ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของใบพัด มีค่าสูงสุดตลอดความสูงของใบพัด ใบพัดจึงควรบิดตัวให้มุมทางเข้าใบพัดเพิ่มขึ้นจากฐานใบพัดสู่ ยอดใบพัด

138

7.5 ประสิทธิภาพขั้นทำงาน

กำลังงานสูงสุดที่จะได้จากขั้นทำงานคือ m∆h_s โดย ∆h_s คือ เอนทัลปีที่ลดลงในขั้นทำงานโดย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี กำลังงานที่ได้จริงจะน้อยกว่านี้เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานใน ขั้นทำงานจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- 1. ไอน้ำที่ออกจากขั้นทำงานจะมีความเร็วและพลังงานจลน์เหลืออยู่ ซึ่งหมายความว่า เอนทัล-ปีที่ลดลงในขั้นทำงานไม่สามารถแปลงเป็นพลังงานกลได้ทั้งหมด
- 2. ภายในหัวฉีดมีความเสียดทานระหว่างไอน้ำกับผนังของหัวฉีดและมีการไหลแบบปั้นป่วน (turbulence) ซึ่งส่งผลเอนทัลปีที่ลดลงในหัวฉีดน้อยกว่า $\dot{m}\Delta h_s$
- การไหลของไอน้ำในโรเตอร์ไม่ใช่การไหลสองมิติดังแสดงในรูปที่ 7.7 การไหลจริงจะเป็นการ ไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ ความเสียดทานระหว่างใบพัดกับไอน้ำอาจทำให้เกิดการไหลวน ภายในช่องว่างระหว่างใบพัด การไหลจริงจึงมีการสูญเสียพลังงานของไอน้ำซึ่งทำให้กำลัง งานที่ได้จริงจากขั้นทำงาน (P_S) น้อยกว่า P จากสมการ (7.6) หรือ (7.10)
- ความดันคร่อมใบพัดทำให้ไอน้ำบางส่วนไม่ไหลผ่านใบพัด แต่ไหลอ้อมผ่านช่องว่างระหว่าง ปลายใบพัดกับโครงหุ้ม กำลังงานที่ได้จากเครื่องกังหันน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากกำลัง งานของเครื่องกังหันแปรผันตามอัตราการไหลของไอน้ำผ่านใบพัด
- 5. การควบแน่นของไอน้ำซึ่งทำให้มีละอองน้ำไหลปะปนไปกับไอน้ำ ละอองน้ำมีความเร็วต่ำ กว่าไอน้ำ ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์ของไอน้ำและละอองน้ำจึงไม่เท่ากัน รูปที่ 7.12 แสดงให้ เห็นว่า ความเร็วสัมพัทธ์ของไอน้ำ (W) มีทิศทางเดียวกับมุมเข้าของใบพัด ใขณะที่ความเร็ว สัมพัทธ์ของละอองน้ำ (W_m) มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของใบพัดซึ่งทำให้ละออง น้ำขัดขวางการหมุนของโรเตอร์และทำให้ P_S น้อยกว่า P นอกจากนี้การปะทะใบพัดของ ละอองน้ำหลายครั้งยังจะกัดเซาะใบพัดอีกด้วย



รูปที่ 7.12: สามเหลี่ยมความเร็วในโรเตอร์ของไอน้ำที่มีละอองน้ำปะปน

ประสิทธิภาพขั้นทำงาน (stage efficiency) คือ อัตราส่วนของกำลังงานที่ได้จริงจากขั้นทำงาน ต่อกำลังงานสูงสุดที่จะได้จากขั้นทำงาน

$$\eta_S = \frac{P_S}{\dot{m}\Delta h_s} \tag{7.28}$$

สมการ (7.31) อาจเขียนใหม่ดังนี้

$$\eta_S = \left(\frac{\Delta h}{\Delta h_s}\right) \cdot \left(\frac{P}{\dot{m}\Delta h}\right) \cdot \left(\frac{P_S}{P}\right)$$

พจน์แรกทางด้านขวาของสมการคือ ประสิทธิภาพหัวฉีดซึ่งจะน้อยกว่า 100% เนื่องจากการสูญเสีย พลังงานภายในใบพัดนิ่ง พจน์ที่สองคือ ประสิทธิภาพใบพัดตามสมการ (7.12) หรือ (7.14) พจน์ที่ สามหมายถึงการสูญเสียพลังงานจากสาเหตุอื่น ๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{P_S}{P} = 1 - f_L \tag{7.29}$$

โดย f_L คือ แฟกเตอร์การสูญเสียพลังงาน (energy loss factor) เพราะฉะนั้น

$$\eta_S = \eta_N \eta_B (1 - f_L) \tag{7.30}$$

ค่า η_S จะหาได้ถ้าทราบสภาวะไอน้ำทางเข้าและทางออกกังหันเพื่อคำนวณค่า Δh_s ค่า P_S คำนวณจากการวัดความเร็วรอบ (ω) และแรงบิดของเครื่องกังหัน (au) สูตรคำนวณ P_S คือ

$$P_S = \dot{m}\tau\omega \tag{7.31}$$

โดยที่ \dot{m} แทนค่า P_S ในสมการ (7.28) ผลที่ได้คือ

$$\eta_S = \frac{\tau\omega}{\Delta h_s} \tag{7.32}$$

ตัวอย่าง ไอน้ำที่มีความดัน 0.7 MPa และอุณหภูมิ 800 K ไหลเข้าขั้นทำงานหนึ่งของเครื่อง กังหันไอน้ำ ไอน้ำที่ไหลออกมีความดัน 0.4 MPa จากการทดสอบขั้นทำงานนี้ พบว่า มีความเร็วรอบ 1500 rpm และแรงบิด 1000 N.m จงหาประสิทธิภาพขั้นทำงาน

วิธีทำ

้จากแผนภูมิไอน้ำพบว่าที่ความดัน 0.7 MPa และอุณหภูมิ 800 K ไอน้ำยวดยิ่งมีค่าเอนทัลปี h_0 = 3540 kJ/kg ที่ความดัน 0.4 MPa และ s_{1s} = s_0 ไอน้ำมีค่าเอนทัลปี h_{1s} = 3347 kJ/kg ดังนั้น

$$\Delta h_s = (3540 - 3347) \times 10^5 = 1.93 \times 10^5 \text{ J/kg}$$

7.6. เครื่องกังหันไอน้ำหลายขั้นทำงาน

ความเร็วรอบ (N) มีหน่วยเป็น rpm แปลงเป็น ω ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = 157 \text{ rad/s}$$

ประสิทธิภาพขั้นทำงานคำนวณจากสมการ (7.32)

$$\eta_S = \frac{1000 \times 157}{1.93 \times 10^5} = 0.81$$

7.6 เครื่องกังหันไอน้ำหลายขั้นทำงาน

กำลังงานที่ได้จากขั้นทำงานหนึ่งของเครื่องกังหันไอน้ำถูกจำกัดโดยความเร็วรอบและขนาดของ เครื่อง เครื่องกังหันไอน้ำที่มีเพียงขั้นทำงานเดียวจึงให้มีกำลังงานน้อย เครื่องกังหันไอน้ำในโรงไฟฟ้า พลังความร้อนมีขนาดใหญ่ จึงต้องประกอบด้วยหลายขั้นทำงาน ถ้ากำลังงานของเครื่องกังหันคือ P_T และเครื่องกังหันประกอบด้วยหลายขั้นทำงานที่ให้กำลังงานเท่ากัน จำนวนขั้นทำงานของเครื่อง กังหันจะเท่ากับ

$$n = \frac{P_T}{P_S} \tag{7.33}$$

รูปที่ 7.13 แสดงการขยายตัวของไอน้ำในเครื่องกังหันที่มี 4 ขั้นทำงาน ประสิทธิภาพโดยรวมของ เครื่องกังหันไอน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_T = \frac{P_T}{\dot{m}(h_1 - h_{5ss})}$$
(7.34)

โดยที่ P_T เป็นผลรวมของกำลังงานที่ได้จาก 4 ขั้นทำงาน ดังนั้น

$$P_T = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} + P_{S4}$$

้สมมุติว่าทุกขั้นทำงานมี η_S เท่ากัน สมการ (7.35) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_T = \dot{m}\eta_S[(h_1 - h_{2s}) + (h_2 - h_{3s}) + (h_3 - h_{4s}) + (h_4 - h_{5s})]$$
(7.35)

สมการ (7.34) และ (7.35) รวมกันได้ความสัมพันธ์ระหว่าง η_T และ η_S ดังนี้

$$\eta_T = \eta_S \left[\frac{(h_1 - h_{2s}) + (h_2 - h_{3s}) + (h_3 - h_{4s}) + (h_4 - h_{5s})}{h_1 - h_{5ss}} \right]$$

$$\eta_T = f_R \eta_S$$
(7.36)

โดยที่ f_R คือ แฟกเตอร์การให้ความร้อนซ้ำ (reheat factor) จากการตราวสอบรูปที่ 7.14 พบว่าเส้น ความดันคงที่ในแผนภูมิไอน้ำมีลักษณะลู่ออก ดังนั้น

$$(h_1 - h_{2s}) + (h_2 - h_{3s}) + (h_3 - h_{4s}) + (h_4 - h_{5s}) > h_1 - h_{5ss}$$



รูปที่ 7.13: การขยายตัวของไอน้ำในเครื่องกังหันที่มี 4 ขั้นทำงาน

ซึ่งหมายความว่า f_R มีค่ามากกว่า 1 เครื่องกังหันไอน้ำหลายขั้นทำงานมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่อง กังหันไอน้ำขั้นทำงานเดียว หรืออาจกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน ขั้นทำงานมากขึ้น

ขั้นทำงานของเครื่องกังหันไอน้ำมีหลายแบบ ขั้นทำงานที่ให้กำลังงานสูงกว่ามีข้อได้เปรียบ เนื่องจากทำให้เครื่องกังหันมีจำนวนขั้นทำงานที่น้อยกว่า กำหนดให้เครื่องกังหันไอน้ำสามเครื่อง ประกอบด้วยขั้นทำงานสามแบบ เครื่องที่หนึ่งประกอบด้วยขั้นทำงานแรงดลความดันผสม 2 ขั้น ทำงาน เครื่องที่สองประกอบด้วยขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสม 2 ขั้นทำงาน และเครื่องที่สาม ประกอบด้วยขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% 2 ขั้นทำงาน เครื่องกังหันไอน้ำทั้งสามเครื่องมีมุมหัวฉีด (θ₁) เท่ากันและความเร็วรอบเท่ากัน นอกจากนี้ความเร็วใบพัดหมุนของทุกเครื่องเป็นความเร็วที่ เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันแต่ละเครื่องมีค่าสูงสุด เครื่องกังหันไอน้ำทั้ง สามเครื่องจะแต่จะให้กำลังงานต่างกันดังนี้

 เอนทัลปีไอน้ำลดลง $\Delta h_{(1)}$ เมื่อไหลผ่าน 2 ขั้นทำงานของเครื่องกังหันไอน้ำเครื่องที่หนึ่งโดย แต่ละขั้นทำงานมีเอนทัลปีลดลง $\Delta h_{(1)}/2$ ความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำมีค่าตามสมการ (7.4)

$$V_1 = \sqrt{\Delta h_{(1)}}$$

ความเร็วใบพัดหมุนที่เหมาะสมที่สุดคือสมการ (7.16) ดังนั้น

$$V_1 = \frac{2U}{\cos \theta_1}$$
$$\implies \Delta h_{(1)} = 4 \left(\frac{U}{\cos \theta_1}\right)^2$$

เอนทัลปีไอน้ำลดลง $\Delta h_{(2)}$ เมื่อไหลผ่านขั้นทำงานแรกของเครื่องกังหันไอน้ำเครื่องที่สอง

7.6. เครื่องกังหันไอน้ำหลายขั้นทำงาน

ความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำมีค่าตามสมการ (7.4)

$$V_1 = \sqrt{2\Delta h_{(2)}}$$

ความเร็วใบพัดหมุนที่เหมาะสมที่สุดคำนวณจากสมการ (7.22)

$$V_1 = \frac{4U}{\cos \theta_1}$$
$$\implies \Delta h_{(2)} = 8 \left(\frac{U}{\cos \theta_1}\right)^2$$

 เอนทัลปีไอน้ำลดลง Δh₍₃₎ เมื่อไหลผ่านเครื่องกังหันไอน้ำเครื่องที่สามโดยเอนทัลปีลดลง Δh₍₃₎/2 ในแต่ละขั้นทำงาน สำหรับขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% ครึ่งหนึ่งของเอนทัลปีไอน้ำ ที่ลดลงในแต่ละขั้นทำงานลดลงในสเตเตอร์ ดังนั้น

$$V_1 = \sqrt{\frac{\Delta h_{(3)}}{2}}$$

ความเร็วใบพัดหมุนที่เหมาะสมที่สุดคือสมการ (7.23) ดังนั้น

$$V_1 = \frac{U}{\cos \theta_1}$$
$$\implies \Delta h_{(3)} = 2\left(\frac{U}{\cos \theta_1}\right)^2$$

อัตราส่วน $\Delta h_{(1)}$: $\Delta h_{(2)}$: $\Delta h_{(3)} = 2$: 4 : 1 แสดงให้เห็นว่าเครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้ขั้นทำงาน แรงดลความเร็วผสมให้กำลังงานมากที่สุด รองลงมาคือ เครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้ขั้นทำงานแรงดล ความดันผสม ส่วนเครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% ให้กำลังงานน้อยที่สุด ถ้า ต้องการให้เครื่องกังหันไอน้ำทั้งสามแบบผลิตกำลังงานเท่ากัน เครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้ขั้นทำงานแรง ปฏิกิริยา 50% จะต้องมีขนาดใหญ่ที่สุดและเครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้ขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมจะ มีขนาดเล็กที่สุด

นอกเหนือ^จากกำลังงานของขั้นทำงาน อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้ขั้นทำงานใน เครื่องกังหันไอน้ำคือ ประสิทธิภาพขั้นทำงาน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของขั้น ทำงานแรงปฏิกิริยาสูงกว่าประสิทธิภาพของขั้นทำงานแรงดลคือ การออกแบบเชิงอากาศพลศาสตร์ ของใบพัดหมุนในขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาดีกว่าของใบพัดหมุนในขั้นทำงานแรงดล อย่างไรก็ตามขั้น ทำงานแรงปฏิกิริยามีข้อเสียเปรียบที่มีการรั่วของไอน้ำเมื่อไหลผ่านใบพัดหมุนมากกว่าขั้นทำงาน แรงดล ผลกระทบของการรั่วของไอน้ำต่อประสิทธิภาพขั้นทำงานไม่มากนักในกรณีที่ใบพัดหมุน ของขั้นทำงานมีความยาวมาก แต่ถ้าใบพัดหมุนมีความยาวไม่มากพอ ประสิทธิภาพของขั้นทำงาน แรงปฏิกิริยาก็อาจจะต่ำกว่าประสิทธิภาพของขั้นทำงานแรงดลได้ ดังนั้นขั้นทำงานในช่วงความดัน สูงจึงควรเป็นขั้นทำงานแรงดลซึ่งมีปัญหาการรั่วของไอน้ำน้อยกว่า ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยามีความ เหมาะสมในช่วงความดันต่ำเพราะใบพัดได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูง และการที่ใบพัด มีความยาวมากทำให้การรั่วของไอน้ำมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของไอน้ำและไม่ส่ง ผลมากนักต่อประสิทธิภาพ เครื่องกังหันไอน้ำที่ใช้โรงไฟฟ้าสมัยใหม่จึงประกอบด้วยขั้นทำงานแรง ดลและขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา ขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมเป็นขั้นทำงานแรก ๆ ซึ่งมีความดันสูง และขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาในขั้นท้าย ๆ ซึ่งมีความดันต่ำ การใช้ขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมช่วย ลดจำนวนขั้นทำงานและลดขนาดของโรเตอร์ การใช้ขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาในขั้นท้าย ๆ ช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพให้เครื่องกังหันไอน้ำ

7.7 แรงดันแนวแกน

กำลังงาน P เกิดจากแรง F ที่กระทำต่อใบพัดในทิศทางขนานกับแถวใบพัดหมุน แต่การไหล ผ่านขั้นทำงานของไอน้ำทำให้เกิดแรงที่ตั้งฉากกับแถวใบพัดหมุนหรือขนานกับเพลาของเครื่องกังหัน แรงนี้เรียกว่าแรงดันแนวแกน (axial thrust) แรงดันแนวแกนประกอบด้วยสองส่วนคือ ผลต่างระหว่าง แรงดันทางด้านเข้าและด้านออกจากใบพัดหมุน และผลต่างระหว่างโมเมนตัมของไอน้ำที่เข้าสู่และ ออกจากใบพัดหมุนในทิศทางตั้งฉากกับแถวใบพัดหมุน

$$T = (p_1 - p_2)A - \dot{m}(W_1 \sin \phi_1 - W_2 \sin \phi_2)$$
(7.37)

โดย A ตือพื้นที่หน้าตัดของใบพัดหมุนในโรเตอร์ นิพจน์ที่สองในสมการ (7.39) มีค่าน้อยมากเมื่อ เทียบกับนิพจน์แรก ในกรณีของขั้นทำงานแรงดล รูปที่ 7.3 แสดงให้เห็นว่า p₁ มีค่าใกล้เคียงกับ p₂ ดังนั้นจึงมีแรงดันแนวแกนที่น้อยมากกระทำต่อใบพัดหมุน ในทางตรงข้าม รูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นว่า p₁ มีค่ามากกว่า p₂ ในกรณีของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าแรงดันแนวแกนอาจมีค่าไม่มากนัก ในหนึ่งขั้นทำงาน แต่เครื่องกังหันไอน้ำมักประกอบด้วยหลายขั้นทำงานซึ่งทำให้แรงดันแนวแกนรวม มีค่ามากได้

แรงดันแนวแกนเป็นผลเสียต่อเครื่องกังหันเพราะมันจะดันโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ออกจากเพลา เครื่องกังหันจึงได้รับการออกแบบให้แรงดันแนวแกนมีค่าน้อยที่สุด วิธีหนึ่งคือ การออกแบบเครื่อง กังหันให้ไอน้ำความดันสูงไหลเข้าตรงกลางและไอน้ำความดันต่ำไหลออกทางด้านซ้ายและด้านขวา ดังแสดงในรูปที่ 7.14 ถ้าขั้นทำงานทางด้านซ้ายเหมือนกับขั้นทำงานทางด้านขวาและอัตราการไหล ทั้งสองด้านเท่ากับ แรงดันแนวแกนจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าขั้นทำงานทางด้านซ้ายอาจแตกต่างกับขั้น ทำงานทางด้านขวา อัตราการไหลทั้งสองด้านอาจไม่เท่ากันเพื่อให้แรงดันแนวแกนที่เกิดขึ้นทางด้าน ซ้ายและขวามีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด



รูปที่ 7.14: เครื่องกังหันไอน้ำที่ออกแบบให้ลดแรงดันแนวแกน

7.8 การควบคุมเครื่องกังหัน

ความเร็วของเครื่องกังหันจะเปลี่ยนแปลงไปตามภาระกำลังของเครื่องถ้าปราศจากการควบคุม เมื่อพิจารณารูปที่ 7.7 พบว่า

$$V_1 \cos \theta_1 = W_1 \cos \phi_1 + U$$
$$V_2 \cos \theta_2 = W_2 \cos \phi_2 - U$$

ใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงดลมีความสมมาตร ($\phi_1=\phi_2$) นอกจากนี้สมมุติว่าไม่มีความเสียดทาน ($W_1=W_2$) ดังนั้น สมการ (7.6) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P = 2\dot{m}U(V_1\cos\theta_1 - U) \tag{7.38}$$

สมการ (7.38) แสดงให้เห็นว่า กำลังงานของเครื่องกังหันที่ลดลงทำให้เครื่องกังหันหมุนเร็วขึ้น ถ้า ความเร็วของการหมุนมีค่ามากเกินไปก็อาจเกิดผลเสียต่อเครื่องได้

กัฟเวอร์เนอร์ (governor) ทำหน้าที่ควบคุมให้ความเร็วของเครื่องกังหันคงที่เมื่อภาระเปลี่ยน โดยการลดอัตราการไหลของไอน้ำ กัฟเวอร์เนอร์จะตรวจวัดความเร็วของเครื่องพร้อมกับเพิ่มหรือ ลดอัตราการไหลของไอน้ำตามความเหมาะสม รูปที่ 7.15 แสดงแผนภาพของกัฟเวอร์เนอร์แบบลูก ถ่วง (fly-ball governor) เมื่อความเร็วรอบของเพลาเพิ่มขึ้น ลูกถ่วงสองลูกซึ่งต่ออยู่กับปลอกเลื่อน (sleeve) จะดึงปลอกเลื่อนลงด้วยแรงหนีศูนย์กลางและทำให้ช่องเปิดของวาล์วแคบลงและไอน้ำไหล ผ่านได้น้อยลง ถ้าต้องการการควบคุมความเร็วที่แม่นยำมากขึ้นก็ต้องใช้กัฟเวอร์เนอร์แบบไฮดรอ-ลิกซึ่งมีเครื่องสูบน้ำมันกัฟเวอร์เนอร์ (governor oil pump) ทำหน้าที่ส่งน้ำมันความดันสูงไปยังปิด วาล์วควบคุมการไหลของไอน้ำ ความเร็วรอบของเครื่องกังหันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันของน้ำมัน เพิ่มตามและดันวาล์วให้ปิดเพื่อลด อัตราการไหลของไอน้ำ



รูปที่ 7.15: กัฟเวอร์เนอร์แบบลูกถ่วง

นอกจากกัฟเวอร์เนอร์แล้ว เครื่องกังหันทุกเครื่องจะติดตั้งอุปกรณ์นิรภัยซึ่งจะหยุดการทำงาน ของเครื่องกังหันถ้าความเร็วเกินค่าที่กำหนด ถ้าไม่มีอุปกรณ์นิรภัยและกำลังของเครื่องกังหันลดลง อย่างกระทันหันจนกัฟเวอร์เนอร์ไม่สามารถปิดวาล์วได้ทัน เครื่องกังหันจะหมุนเร็วขึ้นอย่างรวดเร็ว จนอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ อุปกรณ์นิรภัยนี้จะทำงานโดยการปิดวาล์วให้สนิทเพื่อหยุดการไหลของ ไอน้ำ กลไกการทำงานของตัวหยุดความเร็วเกินจะไม่ขึ้นกับกัฟเวอร์เนอร์ ดังนั้นมันจะทำงานแม้ ว่ากัฟเวอร์เนอร์จะใช้การไม่ได้แล้ว โดยทั่วไปอุปกรณ์นิรภัยจะทำงานเมื่อความเร็วของเครื่องกังหัน มากกว่าความเร็วที่กำหนดไว้ 10% ตัวอย่างเช่นถ้ากำหนดให้ความเร็วเท่ากับ 3000 rpm อุปกรณ์ นิรภัยจะทำงานเมื่อความเร็วเท่ากับ 3300 rpm นอกจากนี้อุปกรณ์นิรภัยยังอาจทำงานในกรณีอื่น ๆ เช่น ระบบหล่อลื่นล้มเหลว เครื่องกังหันเสียสมดุลทางสถิตศาสตร์หรือพลศาสตร์ และระบบหล่อเย็น ของเครื่องควบแน่นล้มเหลว

7.8. การควบคุมเครื่องกังหัน

คำถามท้ายบท

- ทำไมเครื่องกังหันไอน้ำแบบไหลตามแนวแกนจึงนิยมมากกว่าครื่องกังหันไอน้ำแบบไหลตาม แนวรัศมีในโรงไฟฟ้า
- 2. เขียนโพรไฟล์ความเร็วและความดันไอน้ำที่ไหลผ่านขั้นทำงานแรงดล
- 3. อะไรคือข้อเสียที่สำคัญของขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสม
- ใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงดลแตกต่างกับใบพัดหมุนของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% อย่างไร
- เขียนสามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าและออกจากโรเตอร์ของกังหันแรงปฏิกิริยา 50% ที่มีความ เร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุด
- ขั้นทำงานแรงดลความเร็วผสมที่มีสองขั้นทำงานมีความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่สุดเท่าไรถ้า ไอน้ำมีความเร็ว V₁ และมุมหัวฉีดคือ θ₁
- 7. ระบุสาเหตุการสูญเสียพลังงานในเครื่องกังหันไอน้ำมาสามประการ
- 8. ทำไมเครื่องกังหันไอน้ำจึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถ้ามีจำนวนขั้นทำงานมากขึ้น
- ทำไมเครื่องกังหันไอน้ำความดันต่ำที่ประกอบด้วยขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาจึงมีลักษณะสม-มาตร กล่าวคือ ไอน้ำจะเข้าเครื่องกังหันที่กึ่งกลางของเครื่องกังหันแล้วขยายตัวออกทางด้าน ซ้ายและด้านขวาเท่า ๆ กัน
- 10. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกังหันไอน้ำเรียกว่าอะไร
- 11. ไอน้ำที่มีเอนทัลปี 3100 kJ/kg ไหลเข้าหัวฉีดด้วยความเร็วที่น้อยมาก ไอน้ำที่ไหลออกมี เอนทัลปี 3000 kJ/kg อยากทราบว่าไอน้ำที่ไหลออกมีความเร็วเท่าไร
- 12. โรเตอร์ของเครื่องกังหันไอน้ำขั้นทำงานเดียวมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 500 mm และ หมุนด้วยความเร็วรอบ 3600 rpm จงคำนวณหาความเร็วของใบพัดหมุน
- 13. ไอน้ำออกจากหัวฉีดเข้าหาใบพัดหมุนด้วยความเร็ว 900 m/s โดยมุมของหัวฉีดเท่ากับ 20° ถ้าความเร็วของใบพัดหมุนคือ 300 m/s จงคำนวณหามุมเข้าของใบพัดหมุน
- 14. ไอน้ำมีเอนทัลปิลดลง 150 kJ/kg จากการไหลผ่านกังหันไอน้ำซึ่งประกอบด้วยขั้นทำงานแรง ดลแบบความดันผสมสองขั้นทำงาน จงหากำลังงานสูงสุดที่ผลิตโดยกังหันไอน้ำถ้าอัตราการ ไหลของไอน้ำเท่ากับ 5 kg/s และมุมของหัวฉีดเท่ากับ 20°
- 15. ถ้ามุมหัวฉีดของขั้นทำงานแรงปฏิกิริยา 50% คือ 15° อยากทราบว่าประสิทธิภาพใบพัดของ ขั้นทำงานนี้มีค่าสูงสุดเท่าไร

บทที่ 8 ระบบน้ำป้อนและน้ำหล่อเย็น

8.1 อุปกรณ์หลักในระบบน้ำป้อนและน้ำหล่อเย็น

ระบบน้ำป้อนคือ ระบบที่เกี่ยวข้องกับสำหรับการผลิตน้ำป้อนสำหรับหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า อุปกรณ์สำคัญในระบบได้แก่เครื่องควบแน่นซึ่งทำหน้าที่ควบแน่นไอน้ำจากเครื่องกังหันทำให้ได้น้ำ ป้อนกลับเข้าสู่ระบบและเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็นคือ ระบบที่จ่ายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อระบายความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น อุปกรณ์สำคัญในระบบคือ หอหล่อเย็น (cooling tower) รูปที่ 8.1 แสดงการไหลเวียนของน้ำป้อน และน้ำหล่อเย็นในโรงไฟฟ้า จะเห็นว่ามีการสูญเสียน้ำป้อนที่เครื่องกำเนิดไอน้ำและน้ำหล่อเย็น ที่หอหล่อเย็น ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยน้ำที่สูญเสียไปเพื่อให้ปริมาณน้ำป้อนและน้ำหล่อเย็นใน ระบบคงที่ น้ำที่ใช้ในการชดเชยเป็นน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบปรับสภาพน้ำจะทำหน้าที่ แปรสภาพน้ำดิบให้มีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นน้ำป้อนและน้ำหล่อเย็น

8.2 เครื่องควบแน่น

เครื่องควบแน่นติดตั้งใกล้กับเครื่องกังหันไอน้ำ และอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่งเครื่อง ถึงแม้ว่า เครื่องควบแน่นอาจใช้อากาศระบายความร้อนจากไอน้ำ แต่เครื่องควบแน่นในโรงไฟฟ้านิยมใช้น้ำ ระบายความร้อนเนื่องจากน้ำระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศหลายเท่า เครื่องควบแน่นเป็นอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell-and-tube heat exchanger) ที่มีรูปร่างคล้ายกล่อง สี่เหลี่ยมขนาดใหญ่และมีจำนวนท่อนับหมื่นท่อ น้ำหล่อเย็นจะไหลภายในท่อและไอน้ำจะควบแน่น นอกท่อ การจัดเรียงตัวของท่อมักเป็นแบบน้ำหล่อเย็นไหลผ่านครั้งเดียว (one-pass) หรือสองครั้ง (two-pass) รูปที่ 8.2 แสดงเครื่องควบแน่นแบบแรกน้ำหล่อเย็นไข้ไฟ้านดี่มท่อที่ใช้มีลักษณะ คล้ายตัว U ถึงแม้ว่าเครื่องควบแน่นสามารถถูกออกแบบให้น้ำไหลผ่านได้ถึงสี่ครั้ง (four-pass) แต่ก็ ไม่คุ้มค่า จึงไม่เป็นที่นิยม



รูปที่ 8.3 แสดงโพรไฟล์อุณหภูมิในเครื่องควบแน่นที่มีการไหลผ่านของน้ำหล่อเย็นเพียงครั้ง เดียว น้ำหล่อเย็นจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากทางเข้าเครื่องไปทางออก ในขณะที่อุณหภูมิ ของไอน้ำที่ควบแน่นจะคงที่เนื่องจากมีการเปลี่ยนสถานะ การออกแบบเครื่องควบแน่นต้องอาศัย 8.2. เครื่องควบแน่น

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเพื่อหาจำนวนท่อและพื้นที่ผิวทั้งหมดของเครื่องควบแน่นที่ต้อง ใช้ควบแน่นไอน้ำที่มาจากเครื่องกังหันไอน้ำ วิธีผลต่างอุณหภูมิเชิงล็อก (log-mean temperature difference method) อาจใช้เพื่อการวิเคราะห์นี้

$$Q = UA\Delta T_{lm} \tag{8.1}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\text{ITD} - \text{TTD}}{\ln(\text{ITD}/\text{TTD})}$$
(8.2)

โดยที่ ITD คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า TTD คือผลต่างระหว่าง อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนซึ่งก็คือพื้นที่ผิวของท่อ สมการ (8.1) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิน้ำ หล่อเย็นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของเครื่องควบแน่น ถ้าอุณหภูมินี้สูงขึ้น ค่า ITD และ TTD จะลด ลงและทำให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้ Q มีค่าคงที่ ซึ่งหมายถึงราคาของ เครื่องควบแน่นที่ต้องเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 8.3: โพรไฟล์อุณหภูมิในเครื่องควบแน่น

สมรรถนะของเครื่องควบแน่นที่ลดลงจะส่งผลลบต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า ดังนั้นเครื่อง ควบแน่นเป็นอุปกรณ์ที่ต้องได้รับการบำรุงรักษาเป็นอย่างดี ปัญหาหลักที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งาน เครื่องควบแน่นมี 4 ประการได้แก่ การเกิดฟาวลิ่ง การกัดกร่อนท่อ การรั่วไหลเข้าของน้ำหล่อเย็นมา ปะปนกับไอน้ำ และการรั่วไหลเข้าของอากาศ

 การเกิดฟาวลิ่งหมายถึง การที่มีคราบตะกรันหรือสารอื่นมาเกาะติดพื้นผิวด้านในของท่อ คราบเหล่านี้น้ำความร้อนไม่ดีเมื่อเทียบกับโลหะที่เป็นวัสดุท่อ ดังนั้นฟาวลิ่งจึงทำให้ค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องควบแน่นลดลง ฟาวลิ่งเป็นสิ่งที่ป้องกันไม่ให้ เกิดได้ค่อนข้างยากเพราะน้ำหล่อเย็นมาจากแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งมีสารแปลกปลอมปะปน อยู่ไม่มากก็น้อย การเติมสารเคมีในน้ำหล่อเย็นช่วยลดการสะสมของสารอินทรีย์บนผิวท่อได้ แต่วิธีแก้ปัญหาฟาวลิ่งที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้าคือ การทำความสะอาดเครื่องควบแน่นโดยสูบ น้ำให้ไหลย้อนกลับ รูปที่ 8.4 แสดงทิศทางการไหลของน้ำในสภาวะเดินเครื่องควบแน่นตาม ปกติและสภาวะทำความสะอาดเครื่องควบแน่น น้ำที่ใช้กำจัดคราบสิ่งแปลกปลอมภายใน ท่อของเครื่องควบแน่นจะมีลูกบอลทำด้วยฟองน้ำลูกเล็ก ๆ จำนวนมาก ลูกบอลเหล่านี้จะขูด ผิวในของท่อเมื่อไหลผ่านท่อพร้อมกับชะล้างสิ่งสกปรกออกไป



รูปที่ 8.4: วงจรการไหลของเครื่องควบแน่นในสองสภาวะ

- การกัดกร่อนท่อเกิดจากทราย ก้อนกรวด และสิ่งแปลกปลอมในน้ำหล่อเย็นที่เคลื่อนที่ด้วย ความเร็วสูงมาปะทะกับท่อของเครื่องควบแน่น ถึงแม้ว่าความเร็วของน้ำหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เครื่องควบแน่นมีสมรรถนะดี ขึ้นและช่วยชะล้างคราบตะกรันที่เกาะผิวท่อ แต่ก็ทำให้เครื่องสูบทำงานหนักขึ้นและเพิ่มการ กัดกร่อนซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานของท่อลดลง ดังนั้นความเร็วของน้ำจึงถูกจำกัดให้อยู่ ระหว่าง 1.8 ถึง 3 m/s โดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำท่อ
- การรั่วไหลเข้าของน้ำหล่อเย็นมาปะปนกับไอน้ำมีสาเหตุการที่ความดันของน้ำหล่อเย็นซึ่ง ใหลในท่อสูงกว่าความดันไอน้ำนอกท่อ การกัดกร่อนและการสั่นสะเทือนเป็นเวลานานอาจ ทำให้เกิดรอยแตกร้าวในท่อได้ น้ำหล่อเย็นอาจจะซึมผ่านรอยแตกร้าวไปปะปนกับไอน้ำ ไอน้ำต้องความบริสุทธิ์สูงเพราะมันจะกลายเป็นน้ำป้อนหลังจากการควบแน่น เนื่องจากมี เกลือแร่ละลายในน้ำหล่อเย็นการปะปนระหว่างไอน้ำกับน้ำหล่อเย็นจะนำไปสู่น้ำป้อนที่ ด้อยคุณภาพ การแก้ปัญหานี้ที่ดีที่สุดคือ การตรวจสอบหารอยแตกและรอยร้าวในท่อเพื่อ ซ่อมแซมให้หมดไป แต่การตรวจสอบเครื่องควบแน่นที่มีท่อหลายพันท่อเป็นงานที่หนัก วิธี ตรวจสอบมีหลายวิธีเช่น วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนและเปรียบเทียบกับค่าปกติ ถ้ามีน้ำ หล่อเย็นปะปนกับน้ำป้อนค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเพราะเกลือแร่ที่ละลายในน้ำหล่อเย็น แตกตัวเป็นไอออนซึ่งนำไฟฟ้าได้ดีกว่าน้ำบริสุทธิ์

8.3. เครื่องอุ่นน้ำป้อน

 การรั่วไหลเข้าของอากาศเกิดจากการที่ความดันของไอน้ำในเครื่องควบแน่นต่ำกว่าความ ดันบรรยากาศ อากาศที่ไหลเข้าเครื่องควบแน่นจะล้อมรอบท่อ สภาพฉนวนความร้อนของ อากาศทำให้การถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำสู่น้ำหล่อเย็นลดลง ผลที่ตามมาคือไอน้ำควบแน่น ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและความดันไอน้ำก็สูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งทำให้งานที่ได้จากเครื่องกังหันไอน้ำ ลดลง การออกแบบเครื่องควบแน่นเพื่อป้องกันการรั่วไหลเข้าของอากาศไม่อาจรับประกันว่า จะไม่มีการรั่วไหลเข้าของอากาศตลอดอายุการใช้งานของเครื่องควบแน่นเนื่องจากอากาศ อาจเล็ดลอดผ่านรอยต่อหรือรอยร้าวที่อาจขึ้นได้ตลอดเวลา ดังนั้นการสูบอากาศออกจึงเป็น สิ่งที่จำเป็น อุปกรณ์ที่ใช้สูบอากาศออกคือ เครื่องสูบสุญญากาศ (vacuum pump) และอีเจ็ก-เตอร์ (ejector)

8.3 เครื่องอุ่นน้ำป้อน

เครื่องอุ่นน้ำป้อนทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงโดยใช้ไอน้ำที่ดึง มาจากเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องอุ่นน้ำป้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เพราะ ฉะนั้นเครื่องอุ่นน้ำป้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบ่งเป็น เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดและแบบเปิด

8.3.1 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดผสมน้ำป้อนกับไอน้ำจากเครื่องกังหันซึ่งทำให้น้ำป้อนที่ไหลออก มีอุณหภูมิเพิ่มถึงอุณหภูมิน้ำอิ่มตัว นอกจากนี้การที่ความสามารถละลายน้ำของก๊าซลดลงตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดทำหน้าที่เป็นเครื่องกำจัดก๊าซ (deaerator) อุณห-ภูมิของน้ำป้อนที่สูงทำให้ก๊าซที่ละลายในน้ำป้อนอันได้แก่ O₂ และ CO₂ ระเหยออกไป ความสามารถ กำจัดก๊าซของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดวัดจากปริมาณ O₂ และ CO₂ ในน้ำป้อนที่ไหลออกจาก เครื่อง

รูปที่ 8.5 แสดงส่วนประกอบสำคัญสามส่วนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดสามส่วนคือ ฮีต-เตอร์ (heater) ถังเก็บน้ำป้อน (storage tank) และเครื่องควบแน่น (condenser) น้ำจากเครื่องควบ แน่นและไอน้ำจากเครื่องกังหันจะมาผสมกันที่ส่วนให้ความร้อน ทำให้ได้น้ำป้อนอุณหภูมิสูง การ ผสมน้ำป้อนกับไอน้ำมีสองวิธี วิธีแรกพ่นน้ำป้อนเป็นสเปรย์เข้าไปผสมกับไอน้ำ วิธีที่สองปล่อยให้น้ำ ป้อนไหลลงบนถาด (trays) ที่วางเรียงกันหลายชั้นโดยไหลสวนทางกับไอน้ำที่ไหลขึ้น น้ำอิ่มตัวที่ได้ จากฮีตเตอร์จะไหลลงสู่ถังเก็บน้ำป้อนก่อนที่จะไหลต่อไปหม้อไอน้้ำ เครื่องอุ่นน้ำป้อนขนาดเล็กอาจ มีถังเก็บน้ำป้อนเป็นส่วนหนึ่งของฮีตเตอร์ แต่เครื่องขนาดใหญ่จะแยกสองส่วนออกจากกัน น้ำป้อน ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ก๊าซละลายน้ำได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนถึงจุดอิ่มตัวจะไม่มีก๊าซหลง เหลืออยู่ในน้ำป้อน ก๊าซที่ระเหยจะไหลออกทางด้านบนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งมีช่องระบายก๊าซ แต่จะมีไอน้ำลอยปะปนออกจากช่องนี้ไปด้วย เพื่อป้องกันการสูญเสียไอน้ำ เครื่องควบแน่นจึงถูกใช้ ความร้อนแบบเปลือกและท่อ เครื่องควบแน่น ______ ก๊าซ ▲ ___น้ำจากเครื่องควบแน่น

ควบแน่นไอน้ำโดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำป้อน ลักษณะของเครื่องอาจเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยน



รูปที่ 8.5: เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด

8.3.2 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ไอน้ำจากเครื่อง กังหันจะไหลนอกท่อและจะควบแน่นภายนอกท่อ ส่วนน้ำป้อนจะไหลในท่อ ไอน้ำอาจเป็นไอน้ำอิ่ม ตัวหรือไอน้ำยวดยิ่งขึ้นอยู่กับความดันของไอน้ำที่ดึงจากกังหันไอน้ำ ถ้าความดันสูง ไอน้ำจะเป็นไอ น้ำยวดยิ่ง รูปที่ 8.6 แสดงเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดความดันสูง (high-pressure feed water heater) ซึ่งมีสามส่วนได้แก่ เครื่องลดความเป็นไอน้ำยวดยิ่ง (desuperheater) เครื่องควบแน่น (condenser) และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำควบแน่น (drain cooler) อุณหภูมิไอน้ำจะลดลงถึงจุดอิ่มตัวในส่วนแรก ไอ น้ำอิ่มตัวจะควบแน่นในส่วนที่สอง และอุณหภูมิของน้ำอิ่มตัวจะลดลงในส่วนที่สาม ถ้าความดันต่ำ ไอน้ำจะเป็นไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำจะควบแน่นและอุณหภูมิของน้ำอิ่มตัวจะลดลงในเครื่องอุ่นน้ำป้อน แบบปิดความดันต่ำ (low-pressure feed water heater) ซึ่งมีเพียงส่วนการควบแน่นและเครื่องลด อุณหภูมิน้ำควบแน่น

รูปที่ 8.7 แสดงโพรไฟล์อุณหภูมิของไอน้ำและน้ำป้อนในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด ไอน้ำและ น้ำป้อนไหลสวนทางกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าอุหณภูมิของไอน้ำคงที่ในเครื่องควบแน่น แต่นำป้อนมี อุณหภูมิสูงขึ้น พื้นที่ผิวของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดขึ้นกับผลต่างอุณหภูมิสองค่า ผลต่างอุณหภูมิ แรกเป็นผลต่างของอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิน้ำป้อนทางออกของเครื่องควบแน่น ผลต่าง อุณหภูมิที่สองเป็นผลต่างของอุณหภูมิน้ำควบแน่นทางออกของเครื่องลดอุณหภูมิน้ำควบแน่นกับ อุณหภูมิน้ำป้อนทางเข้าของเครื่องลดอุณหภูมิน้ำควบแน่น พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นถ้าผลต่างอุณหภูมิค่า ใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าลดลง



รูปที่ 8.7: โพรไฟล์อุณหภูมิในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิด

8.3.3 การเลือกใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อน

การเพิ่มจำนวนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรเพิ่มตามไปด้วย อย่าง ไรก็ตามถึงแม้ว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องแรกจะเพิ่มประสิทธิภาพมาก แต่เครื่องต่อมาจะเพิ่มประสิทธิ ภาพน้อยลงเรื่อย ๆ ดังนั้นการเพิ่มเครื่องอุ่นน้ำป้อนจึงควรยุติลงเมื่อพบว่าผลประโยชน์ที่ได้จาก ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนด้วย จำนวนเครื่อง อุ่นน้ำป้อนในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนขึ้นกับกำลังการผลิต ตารางที่ 8.1 แสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไป โรงไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 200 MW มีเครื่องอุ่นน้ำป้อน 3 ถึง 8 เครื่อง จำนวนเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะเพิ่ม ขึ้นกว่านี้ถ้าโรงไฟฟ้ามีใหญ่กว่า 200 MW เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดได้รับความนิยมมากกว่าเครื่อง อุ่นน้ำป้อนแบบเปิดเนื่องจากจากจำนวนเครื่องสูบที่ต้องใช้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม จะมีเครื่องอุ่นน้ำ ป้อนแบบเปิดติดตั้งในระบบหนึ่งเครื่องเพราะมีความสามารถในการกำจัดก๊าซที่ละลายในน้ำป้อน ้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดจะติดตั้งตรงกลางของขบวนเครื่องอุ่นน้ำป้อน

กำลังการผลิต (MW)	จำนวนเครื่องอุ่นน้ำป้อน
0 ถึง 50	3 ถึง 5
50 ถึง 100	5 หรือ 6
100 ถึง 200	5 ถึง 7
มากกว่า 200	6 ถึง 8

ตารางที่ 8.1: จำนวนเครื่องอุ่นน้ำป้อนในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

8.4 หอหล่อเย็น

รูปที่ 8.2 แสดงให้เห็นว่า เครื่องควบแน่นต้องระบายความร้อนให้น้ำหล่อเย็น แหล่งน้ำธรรมชาติ มีน้ำหล่อเย็นในปริมาณมหาศาลซึ่งอาจใช้ระบายความร้อนให้เครื่องควบแน่นได้ ระบบหล่อเย็น แบบไหลผ่านครั้งเดียว (once-through cooling system) เป็นการสูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติไป ยังเครื่องควบแน่นและปล่อยน้ำร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่นกลับคืนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ถึงแม้ว่า ระบบนี้จะเป็นระบบที่ค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ก็ทำให้เกิดมลภาวะทางความร้อน (thermal pollution) เนื่อง จากแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นโรงไฟฟ้าสมัยใหม่จึงใช้ ระบบหล่อเย็นแบบปิด (closed-loop cooling system)

ส่วนประกอบหลักของระบบหล่อเย็นแบบปิดคือ หอหล่อเย็น (cooling tower) การผสมกัน ของน้ำและอากาศทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนในหอหล่อเย็น การระเหยของ น้ำทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เหลือลดลงและอากาศมีอุณหภูมิและความชื้นสูงขึ้น น้ำเย็นจะส่งไป เครื่องควบแน่น และอากาศที่ร้อนชื้นจะระบายสู่บรรยากาศ ประสิทธิภาพของหอหล่อขึ้นกับการใช้ วัสดุพรุนที่เรียกว่า ฟิล (fill) หรือแพ็กกิ้ง (packing) วัสดุพรุนนี้ทำให้น้ำและอากาศไหลผ่านด้วย ความเร็วต่ำซึ่งจะเพิ่มเวลาของการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ หอหล่อ เย็นอาจแบ่งเป็นสองแบบตามวิธีการทำให้อากาศไหลเข้าหอหล่อเย็นคือ หอหล่อเย็นแบบดราฟต์ ธรรมชาติ (natural draft) และแบบดราฟต์เชิงกล (mechanical draft)

หอหล่อเย็นแบบดราฟต์ธรรมชาติทำให้อากาศไหลโดยอาศัยความหนาแน่นที่ต่างกันของอากาศ ภายในหอ (ρ_i) และอากาศแวดล้อม (ρ_o) ในกรณีของหอที่สูง H ความดันขับเคลื่อนอากาศ (Δp) ที่ เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$\Delta p = (\rho_o - \rho_i)gH \tag{8.3}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า Δp ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม หอหล่อเย็นแบบดราฟต์ธรรมชาติทำงานได้ดีใน อากาศเย็นและแห้งเนื่องจาก ρ_o จะมีค่าสูง ในทางตรงข้าม ρ_o มีค่าต่ำในสภาวะที่อากาศร้อนและ ชื้น ดังนั้นหอหล่อเย็นแบบนี้อาจทำงานได้ไม่ดีในสภาวะดังกล่าว สมการ (8.3) แสดงให้เห็นอีกด้วย ้ว่า ความดันขับเคลื่อนอากาศเพิ่มขึ้นตาม H ดังนั้นหอหล่อเย็นแบบดราฟต์ธรรมชาติจึงมีความสูงที่ มาก ค่าก่อสร้างจึงแพง อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการใช้งานหอหล่อเย็นแบบนี้ค่อนข้างต่ำเพราะไม่ ได้ใช้พัดลม รูปที่ 8.8 แสดงหอหล่อเย็นแบบดราฟต์ธรรมชาติ



ฐปที่ 8.8: หอหล่อเย็นเปียกแบบดราฟต์ธรรมชาติ

หอหล่อเย็นแบบดราฟต์เชิงกลใช้พัดลมทำให้อากาศไหลผ่านหอหล่อเย็น หอหล่อเย็นที่ใช้วิธี ดราฟต์เชิงกลมีข้อได้เปรียบเหนือวิธีดราฟต์ธรรมชาติหลายประการเช่น สร้างได้ง่ายกว่า ลงทุนต่ำ กว่า ขนาดเล็กกว่า ตอบสนองต่อความต้องการน้ำหล่อเย็นรวดเร็วกว่า มีความยืดหยุ่นในการออก แบบสูงกว่า แต่ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาจะสูงกว่าเนื่องจากต้องควบคุมการทำงานของพัดลมและ มอเตอร์ พัดลมอาจจะถูกติดตั้งที่บริเวณฐานของหอเพื่อเป่าอากาศเข้าหอ (forced draft) การติด ตั้งพัดลมแบบนี้มีข้อดีคือความง่ายในการดูแลรักษาทั้งพัดลมและมอเตอร์ที่อยู่นอกหอ นอกจาก นี้พัดลมไม่ต้องประสบกับภาวะที่อากาศมีอุณหภูมิสูงและความขึ้นสูงอันจะทำให้พัดลมสึกกร่อน อย่างไรก็ตามการเป่าอากาศจะทำให้อากาศกระจายไม่ทั่วหอ อีกทั้งยังทำให้เกิดการรั่วไหลของ อากาศออกจากหอได้ ข้อเสียที่สำคัญที่สุดคืออากาศที่ร้อนและขึ้นที่ออกจากหออาจไหลกลับเข้า หอใหม่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของหอด้อยลง ปัญหานี้จะบรรเทาลงไปมากถ้าติดตั้งพัดลมที่ บริเวณด้านบนของหอเพื่อดูดอากาศเข้าหอ (induced draft) นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้การติดตั้งพัดลม แบบนี้ได้รับความนิยมสูงกว่าแบบแรก ทิศทางการไหลของละอองน้ำและอากาศอาจเป็นลักษณะ ไหลสวนทางกัน (counter-flow) ดังแสดงในรูปที่ 8.9 หรือไหลตัดกัน (cross-flow) ดังแสดงในรูปที่ 8.10

หอหล่อเย็นเปียกต้องการน้ำทดแทน (makeup water) เนื่องจากหอหล่อเย็นเปียกจะสูญเสีย อย่างต่อเนื่องด้วยสาเหตุต่าง ๆ สาเหตุหลักคือ การระเหยของน้ำซึ่งทำให้ระบบสูญเสียน้ำไปในปริ มาณ 1% ถึง 1.5% ของปริมาณน้ำที่ไหลเวียนในระบบ การสูญเสียน้ำด้วยสาเหตุนี้เป็นสิ่งจำเป็น เพราะการระเหยทำให้น้ำหล่อเย็นที่ไหลออกมีอุณหภูมิต่ำ แต่ยังมีการสูญเสียน้ำจากสาเหตุอื่นที่ไม่



รูปที่ 8.10: การไหลแบบตัดกันของอากาศและน้ำในหอหล่อเย็นเปียก

ได้ลดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากหอหล่อเย็นเบียกเหมือนการระเหยของน้ำ ได้แก่

 การสูญเสียน้ำในรูปของละอองน้ำที่ปนไปกับอากาศ (drift) อุปกรณ์กำจัดละอองน้ำ (drift eliminator) ซึ่งติดตั้งบริเวณทางออกจากหอหล่อเย็นเปียกทำให้การสูญเสียน้ำแบบนี้มีปริ

8.4. หอหล่อเย็น

มาณเพียง 0.03% ของปริมาณน้ำที่ไหลเวียน อุปกรณ์นี้มีแผ่นกั้น (baffle) ซึ่งทำหน้าที่บังคับ ให้อากาศไหลอ้อม ละอองน้ำที่มีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศมากก็จะโดนดักโดยแผ่นกั้น เหล่านี้แล้วรวมตัวกันเป็นหยดน้ำตกลงสู่หอ

- การระบายน้ำบางส่วนออกจากหอ (blowdown) เหตุผลของการกระทำเช่นนี้ก็เพื่อลดความ เข้มข้นของสารแปลกปลอมในน้ำ ทำนองเดียวกับการระบายน้ำออกจากถังพักไอน้ำในเครื่อง กำเนิดไอน้ำ น้ำที่ระบายออกคิดเป็น 1% ถึง 1.5% ของน้ำที่ไหลเวียน
- การรั่วออกของน้ำ ซึ่งมีเกิดจากอายุการใช้งานที่มากของหอหล่อเย็นเปียกจะทำให้เกิดรอยรั่ว ปัญหาการสูญเสียน้ำจากการรั่วจะไม่รุนแรงถ้าหอหล่อเย็นได้รับการบำรุงรักษาที่ดี

หอหล่อเย็นที่กล่าวถึงข้างต้นอาจเรียกว่า หอหล่อเย็นแบบเปียก (wet cooling tower) เนื่องจาก ตัวกลางในการหล่อเย็นคือน้ำ หอหล่อเย็นแบบเปียกอาจจะไม่เหมาะกับโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ ไม่มีแหล่งน้ำธรรมชาติ ในกรณีนี้หอหล่อเย็นแบบแห้ง (dry cooling tower) ซึ่งใช้อากาศเป็นสารหล่อ เย็นเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับระบายความร้อนให้โรงไฟฟ้า การหล่อเย็นของเครื่องควบแน่นด้วย อากาศอาจเป็นการระบายความร้อนโดยตรงหรือการระบายความร้อนทางอ้อม รูปที่ 8.11 แสดงรูป ของหอหล่อเย็นแบบแห้งที่ระบายความร้อนโดยตรง จะเห็นว่าไอน้ำไหลเข้าท่อติดครีบในเครื่องควบ แน่น ด้านนอกของท่อมีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ดังนั้นจึงต้องมีพัดลมกำลังสูงติดตั้งในหอ หล่อเย็น



รูปที่ 8.11: หอหล่อเย็นแบบแห้งที่ระบายความร้อนโดยตรง

รูปที่ 8.12 แสดงรูปของหอหล่อเย็นแบบแห้งที่ระบายความร้อนทางอ้อม จะเห็นว่าเครื่องควบ แน่นอยู่ภายนอกหอหล่อเย็น การระบายความร้อนในเครื่องควบแน่นใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น หอหล่อ เย็นแบบนี้มีท่อติดครีบจำนวนมาก น้ำไหลในท่อและอากาศไหลนอกท่อ พัดลมที่มีกำลังมากติด ตั้งด้านบนของหอเพื่อดูดอากาศให้ไหลผ่านท่อ การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศทำให้น้ำ มีอุณหภูมิลดลงและอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น การระบายความร้อนด้วยอากาศในหอหล่อเย็นแบบ แห้งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำในหอหล่อเย็นแบบเปียกมาก ดังนั้นความ สามารถในการหล่อเย็นของหอหล่อเย็นแบบแห้งจึงค่อนข้างจำกัด



รูปที่ 8.12: หอหล่อเย็นแบบแห้งที่ระบายความร้อนทางอ้อม

8.5 ระบบปรับสภาพน้ำ

น้ำดิบจากแหล่งน้ำในธรรมชาติจะมีสารแปลกปลอมเช่น สารแขวนลอย สารละลาย และก๊าซ ปะปนอยู่ด้วย ถ้าน้ำดิบถูกปล่อยให้ไหลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำโดยไม่ได้รับการปรับสภาพจะเกิดผล เสียต่อเครื่องกำเนิดไอน้ำดังนี้

- สารแขวนลอยอาจไปอุดตันท่อหรือไปเกาะผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และทำให้ประ-สิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลง
- สารอนินทรีย์ที่ละลายในน้ำประกอบด้วยไอออนบวก 3 ตัวได้แก่ Ca⁺, Mg²⁺ และ Na⁺ และ ไอออนลบ 3 ตัวได้แก่ HCO₃⁻, Cl⁻ และ SO₄²⁻ ไอออนเหล่านี้ละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ไอออนเหล่านี้จะกลายสภาพเป็นตะกรัน (scale) ไปสะสมที่ผิวท่อ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันมีสภาพเป็นฉนวนซึ่งนอกจากจะลดประสิทธิภาพ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ยังอาจส่งผลให้ท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีอุณหภูมิสูงจนอาจเกิดความเสียหายได้
- ก๊าซที่ละลายในน้ำซึ่งได้แก่ CO₂ และ O₂ จะทำปฏิกิริยาเคมีกับเหล็กซึ่งกัดกร่อนชิ้นส่วนที่ เป็นเหล็กในเครื่องกำเนิดไอน้ำได้

ความเสียหายเหล่านี้หลีกเลี่ยงได้ถ้ามีระบบปรับสภาพน้ำที่นำสารแปลกปลอมออกจากน้ำดิบ การปรับสภาพน้ำเริ่มจากการทำให้สารแขวนลอยในน้ำตกตะกอนเอง (sedimentation) หรือใช้ สารเคมีไปทำให้สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและไม่ตกตะกอนเองจับตัวกันเป็นสารแขวนลอยขนาด

8.5. ระบบปรับสภาพน้ำ

ใหญ่เพื่อเร่งการตกตะกอน (coagulation) หลังจากนั้นน้ำที่ได้จะไหลผ่านเครื่องกรองน้ำเพื่อให้ได้ น้ำดิบที่ปราศจากสารูแขวนลอยูสำหรับการปรับสภาพน้ำขั้นต่อไป

การปรับสภาพน้ำดิบเป็นน้ำป้อนแบ่งเป็นการปรับสภาพแบบภายใน (internal treatment) และ การปรับสภาพแบบภายนอก (external treatment) ในการปรับสภาพแบบภายใน จะมีการเติมสาร เคมีเข้าไปผสมกับน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ในน้ำทำให้เกิดตะกอน ซึ่งตะกอนนี้จะถูกดักไว้ ที่ถังพักไอน้ำและถูกระบายออกจากถังพักไอน้ำต่อไป การปรับสภาพน้ำด้วยวิธีนี้มีต้นทุนต่ำจึงนิยม ใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจลดความกระด้างของน้ำได้ไม่มากนักและไม่สามารถ ปรับสภาพน้ำที่มีความกระด้างมาก ๆ ได้

วิธีการปรับสภาพแบบภายนอกที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange process) กระบวนการนี้ใช้เรซินไอออนบวก (cation resin) และเรซินไอออนลบ (anion resin) ในการกำจัดไอออนบวก (เช่น Ca⁺, Mg²⁺ และ Na⁺) และไอออนลบ (เช่น HCO₃⁻, CI⁻ และ SO₄²⁻) ออกจากน้ำ เมื่อน้ำที่มีไอออนบวกและไอออนลบไหลผ่านก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนี้ที่ เรซินไอออนบวก

$$R^-H^+ + C^+ \longrightarrow R^-C^+ + H^+$$
$$2R^-H^+ + C^{2+} \longrightarrow R^-_2C^{2+} + 2H^+$$

และปฏิกิริยาเคมีดังนี้ที่เรซินไอออนลบ

$$R^{+}OH^{-} + A^{-} \longrightarrow R^{+}A^{-} + OH^{-}$$
$$2R^{+}OH^{-} + A^{2-} \longrightarrow R_{2}^{+}A^{2-} + 2OH^{-}$$

โดยที่

R หมายถึงเรซิน

C หมายถึงไอออนบวกเช่น Ca^+, Mg^{2+}, Na^+

A หมายถึงไอออนลบเช่น HCO_3^- , CI^- , SO_4^{2-}

ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้ไอออนหายไปและถูกแทนที่ด้วย H⁺ และ OH⁻ ซึ่งจะกลายเป็นน้ำบริสุทธิ์ (H₂O) ในที่สุด

เรซินประกอบเม็ดเรซินที่มีความพรุนและมีขนาดเล็กมากจำนวนมาก เม็ดเรซินที่ถูกใช้งานไป แล้วจะหมดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจำนวนเม็ดเรซินจึงลดลงเมื่ออายุการใช้ งานของเรซินเพิ่มขึ้น หลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง เรซินจะต้องผ่านกระบวนการคืนสภาพ (regeneration) เพื่อคืนความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน กระบวนการคืนสภาพของเรซินไอออน บวกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างเรซินที่หมดสภาพกับกรดซัลฟูริก ดังนี้

$$2\mathsf{R}^{-}\mathsf{C}^{+} + \mathsf{H}_{2}\mathsf{SO}_{4} \longrightarrow 2\mathsf{R}^{-}\mathsf{H}^{+} + \mathsf{C}_{2}^{+}\mathsf{SO}_{4}^{2-}$$
$$\mathsf{R}_{2}^{-}\mathsf{C}^{2+} + \mathsf{H}_{2}\mathsf{SO}_{4} \longrightarrow 2\mathsf{R}^{-}\mathsf{H}^{+} + \mathsf{C}^{2+}\mathsf{SO}_{4}^{2-}$$

กระบวนการคืนสภาพของเรซินไอออนลบเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างเรซินที่หมดสภาพกับสารละ-ลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนี้

$$R^+A^- + NaOH \longrightarrow R^+OH^- + Na^+A^-$$

 $\mathsf{R}_2^+\mathsf{A}^{2-} + 2\mathsf{NaOH} \longrightarrow 2\mathsf{R}^+\mathsf{OH}^- + \mathsf{Na}_2^+\mathsf{A}^{2-}$

การกำจัดก๊าซที่ละลายในน้ำอาจใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิด โรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ไม่ได้ติดตั้ง เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดอาจติดตั้งเครื่องกำจัดก๊าซ (degasifier) เพื่อทำหน้าที่นี้โดยเฉพาะ

8.5. ระบบปรับสภาพน้ำ

คำถามท้ายบท

- 1. ฟาวลิ่งในเครื่องควบแน่นเกิดจากอะไร
- 2. การรั่วเข้าเครื่องควบแน่นของอากาศส่งผลเสียอย่างไรต่อสมรรถนะของเครื่องควบแน่น
- 3. เขียนโพรไฟล์อุณหภูมิในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบปิดความดันสูง
- 4. โดยปกติมีเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปิดกี่เครื่องในโรงไฟฟ้า
- 5. อะไรคือข้อเสียที่สำคัญที่สุดของการหล่อเย็นด้วยระบบไหลผ่านครั้งเดียว
- 6. หอหล่อเย็นแบบเปียกทำให้น้ำร้อนกลายเป็นน้ำเย็นได้อย่างไร
- อะไรคือข้อได้เปรียบของหอหล่อเย็นแบบดราฟต์ธรรมชาติเปรียบเทียบกับหอหล่อเย็นแบบ ดราฟต์เชิงกล
- 8. อะไรคือข้อเสียเปรียบของหอหล่อเย็นแบบดราฟต์เชิงกลที่ใช้พัดลมเป่าอากาศเปรียบเทียบ กับแบบที่ใช้พัดลมดูดอากาศ
- 9. อะไรคือวิธีการลดการสูญเสียน้ำของหอหล่อเย็นในรูปของละอองน้ำที่ปนไปกับอากาศ
- 10. ทำไมจึงต้องมีการถ่ายน้ำทิ้งในหอหล่อเย็นแบบเปียก
- 11. อธิบายการทำงานของหอหล่อเย็นแบบแห้งที่ระบายความร้อนโดยตรง
- 12. ในการกำจัดก๊าซที่ละลายในน้ำป้อน เป้าหมายของการกำจัดคือก๊าซใด
- 13. วิธีใดใช้กำจัดเกลือแร่ที่ละลายในน้ำ

164

บทที่ 9

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

9.1 วัฏจักรเบรย์ตัน

วัฏจักรที่ผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซเรียกว่า วัฏจักรกังหันก๊าซ (gas turbine cycle) รูป ที่ 9.1 แสดงการทำงานของวัฏจักรนี้ อากาศจะไหลเข้าเครื่องอัดก๊าซ (Comp) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความ ดันและอุณหภูมิของอากาศ หลังจากนั้นอากาศจะเผาไหม้กับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (Comb) ก๊าซ เสียที่ไหลออกจากห้องเผาไหม้มีความดันและอุณหภูมิสูง กังหันก๊าซ (GT) จะผลิตกำลังงานจากก๊าซ เสียนี้ กำลังงานบางส่วนจากกังหันก๊าซใช้เดินเครื่องอัดก๊าซ กำลังงานส่วนที่เหลือจึงนำมาใช้ผลิต ไฟฟ้า ก๊าซเสียที่ไหลออกจากกังหันก๊าซจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม





วัฏจักรกังหันก๊าซมีอัตราการไหลของอากาศในเครื่องอัดก๊าซไม่เท่ากับอัตราการไหลของก๊าซ เสียในกังหันก๊าซ นอกจากนี้สมบัติเชิงความร้อนของอากาศและก๊าซเสียก็แตกต่างกัน วัฏจักรที่ วิเคราะห์ง่ายกว่าและคล้ายกับวัฏจักรกังหันก๊าซคือ วัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด (open Brayton cycle) รูปที่ 9.2 แสดงแผนภาพอุปกรณ์และแผนภาพ T-s ของวัฏจักรนี้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างวัฏจักร เบรย์ตันแบบเปิดกับวัฏจักรกังหันก๊าซคือ กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการนี้เป็นการเผาไหม้ เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ของวัฏจักรกังหันก๊าซ แต่กระบวนการนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน (HX) ของวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด นอกจากนี้สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างสอง วัฏจักรคือ วัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิดมีอัตราการไหลคงที่



รูปที่ 9.2: วัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด

รูปที่ 9.3 แสดงวัฏจักรเบรย์ตันแบบปิด (closed Brayton cycle) สิ่งที่เพิ่มเติมในวัฏจักรนี้คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากวัฏจักรและลดอุณหภูมิของ อากาศให้เท่ากับ T₁ วัฏจักรเบรย์ตันแบบปิดมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิดเนื่องจาก ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม วัฏจักรเบรย์ตันแบบปิดมีข้อได้เปรียบที่ สารทำงาน ในวัฏจักรอาจเป็นก๊าซชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติดีกว่าอากาศ นอกจากนี้ วัฏจักรเบรย์ตันแบบปิดสามารถ ทำงานที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักร ในกรณีที่วัฏจักร เบรย์ตันแบบปิดและวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิดมีอากาศเป็นสารทำงานเหมือนกัน และสถานะของ อากาศในวัฏจักรทั้งสองเหมือนกัน ประสิทธิภาพและงานสุทธิของทั้งสองวัฏจักรจะเท่ากัน



รูปที่ 9.3: วัฏจักรเบรย์ตันแบบปิด

้ วัฏจักรในรูปที่ 9.3 เป็นวัฏจักรในอุดมคติ วัฏจักรนี้มี 4 กระบวนการ ได้แก่

9.1. วัฏจักรเบรย์ตัน

- กระบวนการ 1-2 เครื่องอัดก๊าซเพิ่มความดันก๊าซโดยเอนโทรปีคงที่
- กระบวนการ 2-3 ก๊าซได้รับความร้อนโดยความดันคงที่
- กระบวนการ 3-4 กังหันก๊าซลดความดันก๊าซโดยเอนโทรปีคงที่
- กระบวนการ 4-1 ก๊าซสูญเสียความร้อนโดยความดันคงที่

สมมุติว่าสารทำงานในวัฏจักรเบรย์ตันแบบปิดเป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas) งานสุทธิ (w_{net}) และ ความร้อนเข้า (q_{in}) มีค่าดังนี้

$$w_{net} = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)$$
(9.1)

$$q_{in} = c_p (T_3 - T_2) \tag{9.2}$$

โดยที่ c_p คือ ค่าความจุความร้อนของก๊าซที่ความดันคงที่ ประสิทธิภาพของวัฏจักร (η_B) มีค่าเท่ากับ งานสุทธิหารด้วยความร้อนเข้า ดังนั้น

$$\eta_B = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

= 1 - $\frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$

กระบวนการ 1-2 และ 3-4 เป็นกระบวนการที่เอนโทรปีคงที่ ดังนั้น

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{(k-1)/k}$$
(9.3)
$$\frac{T_3}{T_4} = r_p^{(k-1)/k}$$
(9.4)

โดยที่อัตราส่วนค่าความจุความร้อน $k = c_p/c_v$ และอัตราส่วนความดัน $r_p = p_2/p_1$ เนื่องจากไม่มี ความดันสูญเสียในกระบวนการ 2-3 และ 4-1 ดังนั้น $T_4/T_1 = T_3/T_2$ ประสิทธิภาพของวัฏจักรจึง เป็นดังนี้

$$\eta_B = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$
(9.5)

สมการ (10.5) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันเพิ่มขึ้นตาม k ก๊าซที่มีค่า k สูง คือก๊าซเฉื่อยเช่น He และ Ar ซึ่งมีค่า k เท่ากับ 1.67 อย่างไรก็ตาม สารทำงานในวัฏจักรเบรย์ตัน ส่วนใหญ่คือ อากาศซึ่งมีค่า k เท่ากับ 1.4 นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันเพิ่มขึ้นตาม อัตราส่วนความดัน อย่างไรก็ตาม r_p มีค่ามากเกินไปไม่ได้ในทางปฏิบัติเพราะอุณหภูมิสูงสุดของ วัฏจักร (T_3) ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ถ้ากำหนด T_3 และอุณหภูมิต่ำสุด (T_1) ให้คงที่ r_p จะมีค่าสูงสุด เท่ากับ

$$r_{p,max} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{k/(k-1)} \tag{9.6}$$

ค่า r_p นี้ทำให้วัฏจักรเบรย์ตันมีประสิทธิภาพเท่ากับวัฏจักรคาร์โนต์ที่ทำงานระหว่าง T_3 และ T_1 อย่างไรก็ตามงานสุทธิที่ได้จะเป็นศูนย์ ค่า r_p ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้งานสุทธิมีค่าสูงสุดจะน้อยว่า $r_{p,max}$ แทนค่าอัตราส่วนอุณหภูมิจากสมการ (9.3) และ (9.4) ในสมการ (9.1) ผลที่ได้คือ

$$w_{net} = c_p \left[T_3 \left(1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) - T_1 \left(r_p^{(k-1)/k} - 1 \right) \right]$$
(9.7)

ค่า r_p ที่ทำให้ w_{net} ในสมการ (9.7) มีค่าสูงสุดคือ

$$r_{p,opt} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{k/2(k-1)}$$
 (9.8)

ที่อัตราส่วนความดันนี้ งานสุทธิมีค่าสูงสุดเท่ากับ

$$w_{max} = c_p T_3 \left(1 - \sqrt{\frac{T_1}{T_3}} \right)^2$$
 (9.9)

รูปที่ 9.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความดันของประสิทธิภาพและงานสุทธิในวัฏจักร เบรย์ตันในอุดมคติ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรเท่ากับ 1300 K และ 300 K ค่า c_p เท่ากับ 1.0 kJ/kg.K จะเห็นว่า η_B เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตาม r_p ในขณะที่ w_{net} มีค่าสูงสุดเท่ากับ 351 kJ/kg เมื่อ r_p เท่ากับ 13.0

ประสิทธิภาพสูงสุดและงานสูงสุดในวัฏจักรเบรย์ตันในอุดมคติจะไม่เกิดขึ้นจริงเพราะกระบวน การในวัฏจักรเบรย์ตันที่เกิดขึ้นจริงเป็นกระบวนการผวนกลับไม่ได้ จากรูปที่ 9.5 จะเห็นว่ากระบวน การ 1-2 และ 3-4 เป็นกระบวนการที่เอนโทรปีเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้งานที่ต้องให้เครื่องอัดก๊าซในวัฏจักรจริง มากกว่างานที่ให้ในวัฏจักรอุดมคติและงานที่ได้จากกังหันในวัฏจักรจริงน้อยกว่างานที่ได้ในวัฏจักร อุดมคติ อัตราส่วนระหว่างงานที่ให้เครื่องอัดก๊าซในวัฏจักรอุดมคติกับวัฏจักรจริงคือ ประสิทธิภาพ ของเครื่องอัดก๊าซ อัตราส่วนระหว่างงานที่ได้จริงจากกังหันก๊าซในวัฏจักรจริงกับวัฏจักรอุดมคติคือ ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซ

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{9.10}$$

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \tag{9.11}$$

168



รูปที่ 9.4: การเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความดันของประสิทธิภาพและงานสุทธิในวัฏจักรเบรย์ตัน ในอุดมคติ

โดยที่สภาวะ 2s มีความดันเท่ากับสภาวะ 2 และสภาวะ 4s มีความดันเท่ากับสภาวะ 4 สมการ (9.10) และ (9.11) สามารถเขียนเป็นสมการของอุณหภูมิเนื่องจากสารทำงานเป็นก๊าซในอุดมคติ ถ้า c_p มี ค่าคงที่ สมการทั้งสองจะกลายเป็น

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \tag{9.12}$$

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \tag{9.13}$$



์ (ตัวอย่าง) วัฏจักรเบรย์ตันในรูปที่ 10.5 มีความดันต่ำสุด 100 kPa อุณหภูมิต่ำสุด 300 K อุณหภูมิสูงสุด 1300 K อัตราส่วนความดันเท่ากับ 8 ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันเท่ากับ 88% และ ี่ ประสิทธิภาพของเครื่องอัดก๊าซเท่ากับ 85% จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้ สมมุติว่า ก๊าซในวัฏจักร เป็นอากาศ (k = 1.4 และ cp = 1.0 kJ/kg.K)

วิธีทำ

$$\begin{split} T_{2s} &= T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \\ &= 300(8)^{0.4/1.4} = 543 \text{ K} \\ \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} &= \eta_c = 0.85 \\ \implies T_2 = 586 \text{ K} \\ T_{4s} &= T_3 \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{(k-1)/k} \\ &= 1300/(8)^{0.4/1.4} = 718 \text{ K} \\ \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} &= \eta_t = 0.88 \\ \implies T_4 = 788 \text{ K} \\ w_c &= c_p(T_2 - T_1) \\ &= 286 \text{ kJ/kg} \\ w_t &= c_p(T_3 - T_4) \\ &= 512 \text{ kJ/kg} \\ q_{in} &= c_p(T_3 - T_2) \\ &= 714 \text{ kJ/kg} \\ \eta_B &= \frac{226}{714} = 31.7\% \end{split}$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันค่อนข้างต่ำเนื่องจากงานที่ต้องให้เครื่องอัดก๊าซมากเมื่อเทียบ กับงานที่ได้จากเครื่องกังหันก๊าซ ประสิทธิภาพที่ลดลงของเครื่องอัดก๊าซและเครื่องกังหันก๊าซส่งผลอ ย่างมากต่อประสิทธิภาพของวัฏจักร ตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรลดลง จากจาก 44.8% เหลือ 31.7% เมื่อประสิทธิภาพของเครื่องอัดก๊าซลดลงจาก 100% เหลือ 85% และ ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันก๊าซลดลงจาก 100% เหลือ 88% นอกจากนี้รูปที่ 10.6 แสดงให้เห็นว่า ผลของการที่ประสิทธิภาพของเครื่องอัดก๊าซและเครื่องกังหันก๊าซต่ำกว่า 100% คือ ค่า r_p ที่ทำให้ ประสิทธิภาพของวัฏจักรมีค่าสูงสุดและค่า r_p ที่ทำให้งานสุทธิสูงสุดของวัฏจักรมีค่าสูงสุดจะลดลง เมื่อเทียบกับวัฏจักรเบรย์ตันในอุดมคติ

วิธีหนึ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันคือ รีเจนเนอเรชัน (regeneration) รูปที่ 9.7 แสดงแผนภาพอุปกรณ์และแผนภาพ T-s ของวัฏจักรเบรย์ตันที่มีรีเจนเนอเรชัน รีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator, R) ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซที่ออกจากเครื่องกังหันและก๊าซที่ออก


รูปที่ 9.6: การเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความดันของประสิทธิภาพและงานสุทธิในวัฏจักรเบรย์ตัน จริง

จากเครื่องอัดก๊าซ รูปที่ 9.7 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซเพิ่มจาก T₂ เป็น T_x ก่อนไหลเข้าอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นความร้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิก๊าซเป็น T₃ จึงลดลงจาก c_p(T₃ - T₂) เหลือ

$$q_{in} = c_p (T_3 - T_x) \tag{9.14}$$

รีเจนเนอเรชันไม่ส่งผลต่องานสุทธิ ดังนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรจึงเพิ่มขึ้น

ถ้ารีเจนเนอเรเตอร์ในรูปที่ 10.7 เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ในอุดมคติอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากรีเจน-เนอเรเตอร์ (T_x) จะเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องกังหัน (T₄) แต่ในรีเจนเนอเรเตอร์จริง T_x จะน้อยกว่า T₄ ประสิทธิผลของรีเจนเนอเรเตอร์คำนวณด้วยสูตรต่อไปนี้

$$\epsilon = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2} \tag{9.15}$$

ถ้าทราบค่า ϵ ก็จะหาค่า T_x ได้

ตัวอย่าง วัฏจักรเบรย์ตันที่มีรีเจนเนอเรชันในรูปที่ 10.7 มีความดันต่ำสุด 100 kPa อุณหภูมิต่ำ สุด 300 K อุณหภูมิสูงสุด 1300 K อัตราส่วนความดันเท่ากับ 8 ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันเท่ากับ 88% ประสิทธิภาพของเครื่องอัดก๊าซเท่ากับ 85% และประสิทธิผลของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 70] วิธีทำ

ตัวอย่างที่แล้วแสดงให้เห็นว่า T_2 = 586 K และ T_4 = 788 K ดังนั้นงานสุทธิของวัฏจักรจึงเท่ากับ 226 kJ/kg อุณหภูมิ T_x ที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์คำนวณจากค่า ϵ

$$T_x = T_2 + \epsilon (T_4 - T_2)$$

= 586 + 0.7(788 - 586)



รูปที่ 9.7: วัฏจักรเบรย์ตันที่มีรีเจนเนอเรชัน

= 727 kJ/kg

ดังนั้น

$$\begin{split} q_{in} &= c_p (T_3 - T_x) \\ &= 573 \; \text{kJ/kg} \\ \eta_B &= \frac{226}{573} = 39.4\% \end{split}$$

ถึงแม้ว่ารีเจนเนอเรชันจะเป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันที่ได้ผล แต่ก็มีข้อจำกัด ที่ T₄ ต้องมากกว่า T₂ ไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามมีวิธีเพิ่ม T₄ และลด T₂ คือ การเพิ่มกระบวนการให้ความร้อนซ้ำ (reheating) และกระบวนการอินเตอร์คูลลิ่ง (intercooling) ในวัฏจักร รูปที่ 9.8 แสดงวัฏจักรเบรย์ตันที่มีอินเตอร์คูลลิ่ง การให้ความร้อนซ้ำ และรี เจนเนอเรชัน อุปกรณ์ในวัฏจักรประกอบด้วยเครื่องอัดก๊าซความดันต่ำ (LC) เครื่องอัดก๊าซความดัน สูง (HC) กังหันก๊าซความดันต่ำ (LT) กังหันก๊าซความดันสูง (HT) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (HX) ที่ให้ความร้อนแก่วัฏจักรและระบายความร้อนออกจากวัฏจักร รีเจนเนอเรเตอร์ (R) อินเตอร์คูลเลอร์ (IC) และเครื่องให้ความร้อนซ้ำ (RH) งานสุทธิและความร้อนเข้าของวัฏจักรคำนวณได้ดังนี้

 $w_{net} = c_p(T_5 - T_6 + T_7 - T_8) - c_p(T_2 - T_1 + T_4 - T_3)$ (9.16)

$$q_{in} = c_p (T_5 - T_x) \tag{9.17}$$



รูปที่ 9.8: วัฏจักรเบรย์ตันที่มีรีเจนเนอเรชัน การให้ความร้อนซ้ำ และอินเตอร์คูลลิ่ง

9.2 วัฏจักรผสม

วัฏจักรผสมหมายถึงการที่วัฏจักรสองวัฏจักรทำงานร่วมกันโดยความร้อนที่ระบายออกจาก วัฏจักรหนึ่งใช้เป็นความร้อนเข้าสู่อีกวัฏจักรหนึ่ง วิธีการนี้จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่า ประสิทธิภาพของแต่ละวัฏจักรเมื่อทำงานแยกกัน วัฏจักรผสมที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ วัฏจักร เบรย์ตันที่ทำงานร่วมกับวัฏจักรแรงคินโดยใช้ก๊าซร้อนที่ออกจากเครื่องกังหันของวัฏจักรเบรย์ตันผลิต ใอน้ำในวัฏจักรแรงคิน วัฏจักรแรงคินนี้จึงไม่ต้องใช้หม้อไอน้ำที่เผาไหม้เชื้อเพลิงเพราะการผลิตไอน้ำ เกิดขึ้นโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน (heat recovery steam generator) รูปที่ 10.9 แสดงอุปกรณ์ที่สำคัญในวัฏจักรผสม

วัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิดประกอบ[้]ด้วยกระบวนการ[์] 1-2-3-4-5 วัฏ[้]จักรแรงคินประกอบด้วยกระบวนการ a-b-c-d ความร้อน (q_{in}) เข้าวัฏจักรผสมในกระบวนการ 2-3 ของวัฏจักรเบรย์ตัน งานที่ได้เกิดขึ้น



รูปที่ 9.9: วัฏจักรผสม

ในกระบวนการ 3-4 ของวัฏจักรเบรย์ตันและกระบวนการ b-c ของวัฏจักรแรงคิน งานที่เข้าเกิดขึ้น ในกระบวนการ 1-2 ของวัฏจักรเบรย์ตันและกระบวนการ d-a ของวัฏจักรแรงคิน ประสิทธิภาพของ วัฏจักรผสมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{CC} = \frac{\dot{w}_B + \dot{w}_R}{\dot{q}_{in}} \tag{9.18}$$

งานสุทธิของวัฏจักรเบรย์ตันสามารถหาค่าได้ถ้ากำหนดประสิทธิภาพของวัฏจักร (η_B) มาให้

$$\dot{w}_B = \eta_B \dot{q}_{in} \tag{9.19}$$

ถ้า T₅ เท่ากับ T₁ ความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักรเบรย์ตันทั้งหมดกลายเป็นความร้อนเข้าวัฏจักร แรงคิน ดังนั้น

$$\dot{w}_R = \eta_R (1 - \eta_B) \dot{q}_{in} \tag{9.20}$$

โดยที่ η_R เป็นประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน แทนค่า \dot{w}_B และ \dot{w}_R ในสมการ (9.18) ผลที่ได้คือ

$$\eta_{CC} = \eta_R + \eta_B - \eta_R \eta_B \tag{9.21}$$

สมการ (9.21) แสดงค่าสูงสุดในทางทฤษฎีของวัฏจักรผสม ถ้า $\eta_R =$ 33% และ $\eta_B =$ 26% ประสิทธิภาพ ของวัฏจักรผสมจะมีค่าไม่เกิน 50% ตามทฤษฎี

กำลังงานของเครื่องกังหันไอน้ำในวัฏจักรผสมแปรผันตามอัตราการไหลของไอน้ำในวัฏจักรแรง-คิน วิธีเพิ่มกำลังงานของวัฏจักรผสมที่ง่ายคือ รูปที่ 9.9 แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของไอน้ำถูก จำกัดโดยพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซที่ออกจากกังหันก๊าซในวัฏจักรเบรย์ตัน อัตราการไหลของ ไอน้ำอาจเพิ่มขึ้นได้ถ้ามีการให้ความร้อนเพิ่มเติมแก่ HRSG วัฏจักรผสมอาจถูกดัดแปลงเป็นวัฏจักร ในรูปที่ 9.10 สมมุติว่า q₁ เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัฏจักรเบรย์ตันและ q₂ เป็นอัตราการ ถ่ายเทความร้อนเพิ่มเติมเข้าสู่วัฏจักรแรงคิน ถ้า T₅ เท่ากับ T₁ ประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมคำนวณ ได้ดังนี้

$$\dot{w}_{B} = \eta_{B}\dot{q}_{1}$$

$$\dot{w}_{R} = \eta_{R}[(1 - \eta_{B})\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2}]$$

$$\eta_{CC} = \frac{\dot{w}_{B} + \dot{w}_{R}}{\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2}}$$

$$\implies \eta_{CC} = \frac{\eta_{B}\dot{q}_{1} + \eta_{R}[(1 - \eta_{B})\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2}]}{\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2}}$$
(9.22)

กำหนดให้ x เป็นสัดส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงคินเทียบกับอัตราการถ่ายเท ความร้อนที่เข้าสู่วัฏจักรผสมทั้งหมด

$$x = \frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_1 + \dot{q}_2}$$
$$\implies \dot{q}_2 = x(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

แทนค่า \dot{q}_2 ในสมการ (10.22)

$$\eta_{CC} = \eta_B + \eta_R - \eta_B \eta_R - x\eta_B (1 - \eta_R) \tag{9.23}$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรนี้น้อยกว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมที่ไม่มีการให้ความร้อนจากภายนอก แก่ HRSG ซึ่งหมายความว่าถึงแม้ว่าการผลิตไอน้ำเพิ่มจะเพิ่มกำลังงานของวัฏจักรผสม แต่ก็ทำให้ ประสิทธิภาพของวัฏจักรลดลง

ประสิทธิภาพวัฏจักรผสมในอุดมคติดังแสดงในสมการ (9.21) และ (9.23) เป็นค่าสูงสุดที่จะเกิด ขึ้นถ้าความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักรเบรย์ตันทั้งหมดใช้เป็นความร้อนเข้าวัฏจักรแรงคิน แต่ใน ความเป็นจริงความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักรเบรย์ตันเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ ผลิตไอน้ำในวัฏจักรแรงคินได้ การวิเคราะห์วัฏจักรผสมจึงต้องมีข้อมูลของสถานะของก๊าซและไอน้ำ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในวัฏจักรซึ่งจะใช้หาค่าประสิทธิภาพดังนี้

$$\dot{w}_B = \dot{m}_g c_p (T_3 - T_4 - T_2 + T_1) \tag{9.24}$$

$$\dot{w}_R = \dot{m}_s (h_b - h_c - h_a + h_d)$$
 (9.25)

$$\dot{q}_{in} = \dot{m}_g c_p (T_3 - T_2)$$
 (9.26)

$$\eta_{CC} = \frac{\dot{w}_B + \dot{w}_R}{\dot{q}_{in}} \tag{9.27}$$

้ โดยที่ m๋_g คือ อัตราการไหลของก๊าซในวัฏจักรเบรย์ตัน m๋_s คือ อัตราการไหลของไอน้ำในวัฏจักรแรง-คิน และ c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ สมมุติว่าไม่มีความร้อนสูญเสียใน HRSG อัตรา



รูปที่ 9.10: วัฏจักรผสมที่มีการให้ความร้อนเพิ่มเติมแก่ HRSG

การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนให้น้ำ ดังนั้นอุณหภูมิของก๊าซที่ ออกจาก HRSG จึงคำนวณค่าได้ดังนี้

$$T_5 = T_4 - \frac{\dot{m}_s(h_a - h_d)}{m_g c_p} \tag{9.28}$$

กำลังงานของวัฏจักรแรงคินเพิ่มขึ้นถ้า m_s เพิ่มขึ้นโดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของ m_s ทำให้ T₅ ลดลงตามสมการ (10.28) ถ้า T₅ = T₁ ความร้อนที่ระบายออกจาก วัฏจักรเบรย์ตันทั้งหมดจะกลายเป็นเป็นความร้อนเข้าวัฏจักรแรงคินและอัตราการไหลของไอน้ำมีค่า สูงสุด แต่ในวัฏจักรผสมจริง T₅ จะสูงกว่า T₁ เนื่องจากข้อจำกัดของการทำงานของ HRSG

HRSG แบ่งเป็นสามส่วนได้แก่ เครื่องประหยัดเชื้อเพลิง (economizer) เครื่องระเหย (evaporator) และเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง (superheater) ก๊าซไหลจากเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งไปยังเครื่อง ประหยัดเชื้อเพลิง ในขณะที่น้ำและไอน้ำไหลจากเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงไปยังเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง รูปที่ 9.11 แสดงโพรไฟล์อุณหภูมิก๊าซและไอน้ำซึ่งไหลสวนทางกันใน HRSG เครื่องประหยัดเชื้อเพลิง ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนจาก T_a เป็นอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ (T_{sat}) เครื่องระเหยทำหน้าที่ผลิต ใอน้ำอิ่มตัวจากน้ำอิ่มตัวโดยอุณหภูมิคงที่ เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำจาก T_{sat} เป็น T_b ข้อจำกัดของการทำงานของ HRSG คือ อุณหภูมิก๊าซต้องมากกว่าอุณหภูมิน้ำหรือไอน้ำ กุกตำแหน่งใน HRSG รูปที่ 9.11 แสดงให้เห็นว่า มีสองตำแหน่งที่อุณหภูมิก๊าซและอุณหภูมิน้ำใกล้ กัน ตำแหน่งแรกอยู่ตรงทางเข้า HRSG ของก๊าซหรือทางออกจาก HRSG ของไอน้ำ ข้อมูลของวัฏจักร เบรย์ตันทำให้ทราบว่า T₄ มีค่าประมาณเท่าไร ค่า T_b จะต้องน้อยกว่า T₄ เพื่อให้ HRSG ทำงาน ู้ได้ ตำแหน่งที่สองอยู่ตรงจุดต่อของเครื่องระเหยกับเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง ผลต่างระหว่างอุณหภูมิ ก๊าซ (T_y) กับ T_{sat} เรียกว่า จุดพินซ์ (pinch point) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ m_s ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ จุดพินซ์ลดลง ค่า m_s สูงสุดทำให้จุดพินซ์เท่ากับศูนย์ ค่า T₅ ที่สภาวะนั้นจึงเป็นอุณหภูมิต่ำสุดของ ก๊าซที่ออกจาก HRSG อุณหภูมิต่ำสุดนี้จะมากกว่า T₁



รูปที่ 9.11: โพรไฟล์อุณหภูมิใน HRSG

(ตัวอย่าง) วัฏจักรผสมตามรูปที่ 10.9 มีอัตราส่วนความดันในวัฏจักรเบรย์ตันเท่ากับ 8 อุณหภูมิ ของอากาศเข้าเครื่องอัดก๊าซคือ 300 K และอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรคือ 1300 K อัตราการไหลของ ก๊าซเสียเท่ากับ 500 kg/s วัฏจักรแรงคินมีความดันและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 10 MPa และ 700 K ความดันในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 10 kPa ถ้าอัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 20 kg/s จงหาจุดพินซ์ อุณหภูมิก๊าซที่ออกจาก HRSG กำลังงานและประสิทธิภาพของวัฏจักรผสม กำหนดให้สมบัติของ อากาศคือ $c_p = 1.0$ kJ/kg.K และ k = 1.4 ประสิทธิภาพของเครื่องอัดก๊าซ กังหันก๊าซ กังหันไอน้ำ และเครื่องสูบเท่ากับ 100%

[วิธีทำ] ในส่วนของวัฏจักรเบรย์ตัน

$$\begin{split} T_2 &= T_1 r_p^{(k-1)/k} \\ &= 300 \times (8)^{0.4/1.4} = 543.4 \text{ K} \\ T_4 &= T_3/r_p^{(k-1)/k} \\ &= 1300/(8)^{0.4/1.4} = 717.7 \text{ K} \end{split}$$

ดังนั้น

$$\dot{w}_B = \dot{m}_g c_p (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$$

$$= 169.5 \text{ MW}$$
$$\dot{q}_{in} = \dot{m}_g c_p (T_3 - T_2)$$
$$= 378.3 \text{ MW}$$

ในส่วนของวัฏจักรแรงคิน สมบัติของน้ำและไอน้ำที่สภาวะ a, b, c และ d คือ h_b = 3177.3 kJ/kg, h_c = 2003.9 kJ/kg, h_d = 191.8 kJ/kg และ h_a = 201.9 kJ/kg ดังนั้น

$$\dot{w}_R = \dot{m}_s(h_b - h_c - h_a + h_d)$$
$$= 23.3 \text{ MW}$$

คำนวณประสิทธิภาพโดยใช้สมการ (9.27)

$$\eta_{CC} = \frac{\dot{w}_B + \dot{w}_R}{\dot{q}_{in}}$$
$$= 51.0\%$$

T_x คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง

$$\dot{m}_g c_p (T_4 - T_x) = \dot{m}_s (h_b - h_v)$$

โดยที่ h_v คือเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2725.5 kJ/kg ดังนั้น T_x = 699.6 K

Ty คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องระเหย

$$\dot{m}_g c_p (T_x - T_y) = \dot{m}_s (h_v - h_l)$$

โดยที่ h_l คือเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1407.9 kJ/kg ดังนั้น T_y = 646.9 K อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa เท่ากับ 584.2 K จุดพินซ์จึงเท่ากับ 62.7 K

T₅ คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง

$$\dot{m}_g c_p (T_y - T_5) = \dot{m}_s (h_l - h_a)$$

$$T_5 = 596.1 \text{ K}$$

ตัวอย่าง] วัฏจักรผสมในตัวอย่างที่แล้วมีอัตราการไหลของไอน้ำสูงสุดเท่าไร จงหาอุณหภูมิก๊าซ ที่ออกจาก HRSG ที่ต่ำที่สุด กำลังงานและประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมในสภาวะดังกล่าว

วิธีทำ

วัฏจักรเบรย์ตันเหมือนตัวอย่างที่แล้ว (\dot{w}_B = 169.5 MW และ \dot{q}_{in} = 378.3 MW) สมบัติของน้ำ และไอน้ำที่สภาวะ a, b, c และ d คือ h_b = 3177.3 kJ/kg, h_c = 2003.9 kJ/kg, h_d = 191.8 kJ/kg และ h_a = 201.9 kJ/kg

9.2. วัฏจักรผสม

อัตราการไหลไอน้ำสูงสุดทำให้จุดพินช์เท่ากับศูนย์ (T_y = 584.2 K) สมการสมดุลพลังงานใน เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งและเครื่องระเหยคือ

$$\dot{m}_g c_p (T_4 - T_x) = \dot{m}_s (h_b - h_v)$$
$$\dot{m}_g c_p (T_x - T_y) = \dot{m}_s (h_v - h_l)$$

กำจัด T_x เพื่อให้ได้สมการของ \dot{m}_s

$$\dot{m}_s = \frac{m_g c_p (T_4 - T_y)}{h_b - h_l}$$

โดยที่ h_l คือเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1407.9 kJ/kg ดังนั้น \dot{m}_s = 37.7 kg/s

 T_5 คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง

$$\dot{m}_g c_p (T_y - T_5) = \dot{m}_s (h_l - h_a)$$

$$T_5 = 493.2 \ \mathrm{K}$$

้กำลังงานของวัฏจักรแรงคินและประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมหาค่าได้ดังนี้

$$\begin{split} \dot{w}_R &= \dot{m}_s (h_b - h_c - h_a + h_d) \\ &= 43.9 \text{ MW} \\ \eta_{CC} &= \frac{\dot{w}_B + \dot{w}_R}{\dot{q}_{in}} \\ &= 56.4\% \end{split}$$

วัฏจักรผสมในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมส่วนใหญ่ไม่ได้ผลิตไอน้ำความดันเดียว แต่ผลิตไอ น้ำสองหรือสามความดัน รูปที่ 10.12 แสดงวัฏจักรผสมสองความดัน (double-pressure combined cycle) วัฏจักรนี้ประกอบ HRSG สองเครื่อง กังหันไอน้ำสองเครื่อง และเครื่องสูบสองเครื่อง น้ำป้อน ที่มาจากเครื่องควบแน่นจะแบ่งเป็นสองส่วน เครื่องสูบเครื่องแรกจะเพิ่มความดันของน้ำป้อนส่วน แรกเป็นความดันสูง (p_{s1}) เครื่องสูบเครื่องแรกจะเพิ่มความดันของน้ำป้อนส่วนที่สองเป็นความดัน ต่ำ (p_{s2}) น้ำป้อนส่วนแรกจะไหลไปที่ HRSG1 น้ำป้อนส่วนที่สองจะไหลไปที่ HRSG2 อัตราการผลิต ไอน้ำใน HRSG1 และ HRSG2 เท่ากับ m_{s1} และ m_{s2} ตามลำดับ ก๊าซร้อนที่ออกจากวัฏจักรเบรย์ตัน จะไหลผ่าน HRSG1 และ HRSG2 ก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม กำลังงานของวัฏจักรไอน้ำคำนวณ ได้ดังนี้

$$\dot{w}_R = \dot{m}_{s1}(h_{b1} - h_{c1} - h_{a1} + h_d) + \dot{m}_{s2}(h_{b2} - h_{c2} - h_{a2} + h_d)$$
(9.29)



รูปที่ 9.12: วัฏจักรผสมสองความดัน

รูปที่ 10.13 แสดงโพรไฟล์อุณหภูมิก๊าซและไอน้ำซึ่งไหลสวนทางกันในวัฏจักรผสมสองความดัน HRSG แต่ละเครื่องประกอบด้วยเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง เครื่องระเหย และเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง อุณหภูมิของก๊าซจะต้องมากกว่าอุณหภูมิของไอน้ำหรือน้ำทุกตำแหน่ง มีสี่ตำแหน่งที่อุณหภูมิของ ก๊าซใกล้เคียงกับอุณหภูมิของไอน้ำหรือน้ำ ตำแหน่งแรกคือ ทางเข้า HRSG1 ของก๊าซ ตำแหน่งที่สอง คือ ทางเข้า HRSG2 ของก๊าซ ตำแหน่งที่สามคือ จุดต่อของเครื่องระเหยกับเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง ใน HRSG1 ตำแหน่งที่สี่คือ จุดต่อของเครื่องระเหยกับเครื่องประหยัดเชื้อเพลิง อุณหภูมิของทั้งสี่ตำแหน่งคือ $T_4 - T_{b1}, T_5 - T_{b2}, T_{y1} - T_{sat,1}, และ T_{y2} - T_{sat,2}$

(ตัวอย่าง) วัฏจักรผสมตามรูปที่ 10.12 มีอัตราส่วนความดันในวัฏจักรเบรย์ตันเท่ากับ 8 อุณหภูมิ ของอากาศเข้าเครื่องอัดก๊าซคือ 300 K และอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรคือ 1300 K อัตราการไหลของ ก๊าซเสียเท่ากับ 500 kg/s วัฏจักรแรงคินมีสองความดันคือ 10 MPa และ 3 MPa อุณหภูมิไอน้ำ ที่ไหลเข้ากังหันไอน้ำความดันสูงและกังหันไอน้ำความดันต่ำคือ 700 K และ 530 K ความดันใน เครื่องควบแน่นเท่ากับ 10 kPa ถ้าอัตราการไหลของไอน้ำใน HRSG เครื่องแรกและเครื่องที่สอง เท่ากับ 20 kg/s จงหากำลังงาน ประสิทธิภาพของวัฏจักรผสม จุดพินซ์ทั้งสองจุด และอุณหภูมิก๊าซที่ ออกจาก HRSG เครื่องที่สอง สมบัติของอากาศคือ $c_p = 1.0$ kJ/kg.K และ k = 1.4 ประสิทธิภาพของ เครื่องอัดก๊าซ กังหันก๊าซ กังหันไอน้ำ และเครื่องสูบเท่ากับ 100%

วิธีทำ

วัฏจักรเบรย์ตันเหมือนตัวอย่างที่แล้ว (T_4 = 717.7 K, \dot{w}_B = 169.5 MW และ \dot{q}_{in} = 378.3 MW) สมบัติของน้ำและไอน้ำที่สภาวะ a1, a2, b1, b2, c1, c2 และ d คือ h_{b1} = 3177.3 kJ/kg, h_{b2} =



รูปที่ 9.13: โพรไฟล์อุณหภูมิในวัฏจักรผสมสองความดัน

2878.2 kJ/kg, h_{c1} = 2878.2 kJ/kg, h_{c2} = 2003.9 kJ/kg, h_{d} = 191.8 kJ/kg, h_{a1} = 201.9 kJ/kg, h_{a2} = 194.8 kJ/kg

 T_{x1} คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งใน HRSG เครื่องแรก

$$\dot{m}_g c_p (T_4 - T_{x1}) = \dot{m}_{s1} (h_{b1} - h_{v1})$$

โดยที่ h_{v1} คือเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2725.5 kJ/kg ดังนั้น T_{x1} = 699.6 K

 T_{y1} คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องระเหยใน HRSG เครื่องแรก

$$\dot{m}_g c_p (T_{x1} - T_{y1}) = \dot{m}_{s1} (h_{v1} - h_{l1})$$

โดยที่ h_{l1} คือเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1407.9 kJ/kg ดังนั้น T_{y1} = 646.9 K

 T_5 คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงใน HRSG เครื่องแรก

$$\begin{split} \dot{m}_g c_p (T_{y1} - T_5) &= \dot{m}_{s1} (h_{l1} - h_{a1}) \\ T_5 &= 596.1 \; \mathrm{K} \end{split}$$

 T_{x2} คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่งใน HRSG เครื่องที่สอง

$$\dot{m}_g c_p (T_5 - T_{x2}) = \dot{m}_{s2} (h_{b2} - h_{v2})$$

โดยที่ h_{v2} คือเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 3 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2803.3 kJ/kg ดังนั้น T_{x2} = 593.1 K T_{y2} คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องระเหยใน HRSG เครื่องที่สอง

$$\dot{m}_g c_p (T_{x2} - T_{y2}) = \dot{m}_{s2} (h_{v2} - h_{l2})$$

โดยที่ h_{l2} คือเอนทัลปีของน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 3 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1008.4 kJ/kg ดังนั้น T_{y2} = 521.3 K

T₆ คำนวณจากสมดุลพลังงานในเครื่องประหยัดเชื้อเพลิงใน HRSG เครื่องที่สอง

$$\dot{m}_g c_p (T_{y2} - T_6) = \dot{m}_{s2} (h_{l2} - h_{a2})$$

 $T_6 = 488.8 \ {
m K}$

กำลังงานของวัฏจักรแรงคินคำนวณโดยใช้สมการ (9.29)

$$\dot{w}_R = \dot{m}_{s1}(h_{b1} - h_{c1} - h_{a1} + h_d) + \dot{m}_{s2}(h_{b2} - h_{c2} - h_{a2} + h_d)$$

= 23.2 MW

คำนวณประสิทธิภาพโดยใช้สมการ (9.27)

$$\eta_{CC} = \frac{\dot{w}_B + \dot{w}_R}{\dot{q}_{in}}$$
$$= 50.9\%$$

9.3 เครื่องกังหันก๊าซ

เครื่องกังหันก๊าซประกอบด้วย เครื่องอัดก๊าซ ห้องเผาไหม้ กังหันก๊าซ และอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ ส่วนประกอบทุกอย่างมีขนาดเล็ก ดังนั้นตัวเครื่องโดยรวมจึงมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ครื่องกังหันก๊าซ เครื่องแรก ๆ ออกแบบสำหรับเครื่องบินไอพ่น ต่อมามีผู้ทดลองนำเครื่องยนต์กังหันก๊าซมาผลิตไฟฟ้า ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นจึงเริ่มมีการออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับผลิตไฟฟ้าจนได้รับ ความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน

เครื่องกังหันก๊าซที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแบ่งเป็นสองประเภทหลักได้แก่ เครื่องกังหันก๊าซแบบ อนุพันธ์ของเครื่องยนต์ไอพ่น (aeroderivative gas turbine) และเครื่องกังหันก๊าซแบบอุตสาหกรรม (industrial gas turbine) เครื่องกังหันก๊าซแบบอนุพันธ์ของเครื่องยนต์ไอพ่นมีลักษณะคล้ายกับเครื่อง กังหันก๊าซที่ใช้เป็นเครื่องยนต์สำหรับเครื่องบินไอพ่น แต่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานจลน์ของ ไอพ่นเป็นพลังงานกลจากการหมุนซึ่งใช้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องกังหัน ก๊าซแบบอุตสาหกรรมออกแบบมาสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยตรง ตารางที่ 9.1 เปรียบเทียบเครื่อง กังหันก๊าซทั้งสองประเภท

182

	เครื่องกังหันก๊าซ		
	แบบอนุพันธ์ของเครื่องยนต์ไอพ่น	แบบอุตสาหกรรม	
ขนาด	เล็ก	ใหญ่	
ประสิทธิภาพ	ଶ୍ବଏ	ต่ำ	
อัตราส่วนความดัน	ไม่เกิ้น 30	ไม่เกิน 16	
กำลังงาน	ไม่เกิน 50 MW	ไม่เกิน 300 MW	
ความเร็วรอบ	ଶ୍ୱଏ	ต่ำ	
ราคาต่อกำลังการผลิตไฟฟ้า	ม้าก	น้อย	
ความต้องการการบำรุงรักษา	มาก	น้อย	

ตารางที่ 9.1: เปรียบเทียบเครื่องกังหันก๊าซแบบอนุพันธ์ของเครื่องยนต์ไอพ่นกับเครื่องกังหันก๊าซ แบบอุตสาหกรรม

9.3.1 เครื่องอัดก๊าซ

เครื่องอัดก๊าซมีสามแบบคือ เครื่องอัดก๊าซแบบบีบอัด (positive displacement) เครื่องอัดก๊าซ แบบแรงเหวี่ยง (centrifugal) และเครื่องอัดก๊าซแบบไหลตามแกน (axial) ถึงแม้ว่าเครื่องอัดก๊าซสอง แบบแรกจะสามารถอัดก๊าซให้มีความดันสูงมากได้ แต่เครื่องอัดก๊าซแบบไหลตามแกนมีข้อได้เบรียบ คือ สามารถให้อัตราการไหลที่สูงกว่า นอกจากนี้การเพิ่มความดันในเครื่องอัดก๊าซแบบไหลตามแกน สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มจำนวนขั้นทำงาน

หนึ่งขั้นทำงานของเครื่องอัดก๊าซซึ่งประกอบใบพัดหมุนและใบพัดนิ่ง ใบพัดหมุนยึดติดกับเพลา และใบพัดนิ่งยึดติดกับโครงหุ้ม ใบพัดหมุนและใบพัดนิ่งมีรูปร่างคล้ายปีกเครื่องบิน (airfoil) เพื่อใช้ คุณสมบัติด้านอากาศพลศาสตร์ของใบพัดในการอัดก๊าซ รูปที่ 9.15 แสดงการไหลปะทะใบพัดหมุน ของก๊าซซึ่งทำให้เกิดแรงยก (lift) หรือความแตกต่างความดันระหว่างด้านออก (หรือด้านล่างของ ใบพัด) กับด้านเข้า (หรือด้านบนของใบพัด) มุมระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ (W) กับเส้นคอร์ด (chord line) ของใบพัดหมุนเรียกว่า มุมปะทะ (α) แรงยกจะเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะตราบเท่าที่มุมปะทะไม่ มากเกินไป แต่แรงยกจะลดลงอย่างกระทันหันเมื่อมุมปะทะเพิ่มถึงค่าหนึ่ง

รูปที่ 9.16 แสดงให้เห็นว่า ก่อนไหลเข้าขั้นทำงานอากาศจะไหลผ่านใบพัดนำ (guide vane) ซึ่ง ทำหน้าที่ปรับทิศทางการไหลของอากาศเพื่อให้มุมปะทะมีค่าเหมาะสมที่สุด หลักการทำงานของ เครื่องอัดก๊าซแบบไหลตามแกนคล้ายกับกังหันแรงปฏิกิริยาที่กล่าวถึงในบทที่ 6 แต่ทิศทางการไหล ตรงข้ามกันซึ่งทำให้ความดันของอากาศค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการไหลผ่านแต่ละขั้นทำงาน อัตราส่วน ความดันโดยรวมของเครื่องอัดก๊าซจึงขึ้นกับจำนวนขั้นทำงาน

อัตราการไหลของก๊าซในเครื่องอัดก๊าซจะอยู่ระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ค่าสูงสุดเกิดจาก สภาวะโช้ก (choked condition) เมื่อความเร็วก๊าซเท่ากับความเร็วเสียง ค่าต่ำสุดเกิดจากการที่มุม ปะทะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง รูปที่ 9.17 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วสัมบูรณ์ (V) ที่ลดลงส่ง







รูปที่ 9.15: การติดตั้งใบพัดน้ำทางเข้าขั้นทำงานแรกของเครื่องอัดก๊าซ

ผลให้มุมปะทะ (α) เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วใบพัด (U) ไม่เปลี่ยนแปลง สภาวะสะดุดเกิดขึ้นเมื่อ อัตราการไหลเข้าของอากาศต่ำเกินไปซึ่งส่งผลให้ V มีค่าน้อยจน α มีค่ามากเกินไป แต่ถ้าทิศทาง ของความเร็วสัมบูรณ์เปลี่ยนไปอย่างเหมาะสม มุมปะทะจะไม่เปลี่ยนและสภาวะสะดุดจะไม่เกิดขึ้น ทิศทางของความเร็วสัมบูรณ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ใบพัดน้ำที่ปรับมุมได้ (variable-angle guide vane)



รูปที่ 9.16: การเปลี่ยนแปลงมุมปะทะเมื่อขนาดและทิศทางของความเร็วสัมบูรณ์เปลี่ยน

ก่อนไหลเข้าเครื่องอัดก๊าซอากาศจะไหลผ่านแผ่นกรองฝุ่นเพื่อให้ได้อากาศที่สะอาดปราศจาก

9.3. เครื่องกังหันก๊าซ

ฝุ่นละอองเป็นสารทำงานในเครื่องกังหันก๊าซ แผ่นกรองฝุ่นจะถูกเปลี่ยนเมื่อความดันอากาศที่ไหล ผ่านลดลงเกินค่าที่กำหนดซึ่งแสดงว่าแผ่นกรองสกปรกเกินไป อย่างไรก็ตามอาจมีส่งแปลกปลอม เช่น ฝุ่น แมลงตัวเล็ก หรือคราบน้ำมันหล่อลื่นเล็ดรอดเข้าไปเกาะที่ผิวใบพัดของเครื่องอัดก๊าซได้ ใบพัดที่สกปรกจะทำให้อัตราส่วนความดันที่ได้จากเครื่องอัดก๊าซลดลงและจะส่งผลให้กำลังงานที่ได้ จากเครื่องกังหันก๊าซลดลงตามไปด้วย ระบบล้างเครื่องอัดก๊าซ (compressor wash) ทำหน้าที่กำจัด สิ่งแลกปลอมออกจากผิวใบพัด การทำความสะอาดเครื่องอัดก๊าซอาจกระทำขณะที่เครื่องอัดก๊าซ กำลังทำงานหรือหยุดทำงาน วิธีหลังให้ผลดีกว่าแต่เครื่องกังหันก๊าซต้องหยุดทำงานและโรงไฟฟ้า ต้องสูญเสียกำลังการผลิต

ห้องเผาไหม้

ห้องเผาไหม้อยู่ถัดจากเครื่องอัดก๊าซ อากาศที่มีความดันสูงไหลเข้าห้องเผาไหม้โดยมีหัวฉีดพ่น เชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศและทำปฏิกิริยาเผาไหม้ รูปที่ 9.18 แสดงการไหลของอากาศและเชื้อ เพลิงในห้องเผาไหม้ อากาศบางส่วนจะใช้ในการเผาไหม้ อากาศที่เหลือทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผา ไหม้ การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบ่งเป็นสามโซน โซนแรกคือ โซนไหลวน (recirculation zone) อยู่ ใกล้หัวฉีดเป็นบริเวณที่มีการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอย่างทั่วถึงโดยอาศัยการไหลวน อย่างปั้นป่วนของอากาศและเชื้อเพลิง นอกจากนี้เชื้อเพลิงบางส่วนเผาไหม้กับอากาศในโซนนี้แต่ การเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์เพราะมีปริมาณอากาศเพียง 10% ของปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอัด ก๊าซ โซนที่สองคือ โซนเผาไหม้ (burning zone) อยู่ห่างจากหัวฉีดออกมาเป็นบริเวณที่ได้รับอากาศ เพิ่มเติมประมาณ 20% ซึ่งทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และได้ก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูง โซนที่สามคือ โซนเจือจาง (dilution zone) อยู่ใกล้ทางออกจากห้องเผาไหม้ มีอากาศ 70% ที่เหลือเข้ามาในห้อง เผาไหม้ที่โซนนี้เพื่อลดอุณภูมิก๊าซเสียที่กำลังจะออกจากห้องเผาไหม้



รูปที่ 9.17: โซนในห้องเผาไหม้

การเกิด NO_X เป็นปัญหาสำคัญในการทำงานของเครื่องกังหันก๊าซ NO_X เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ไม่เท่ากันอย่างทั่วถึง บางจุดมีอุณหภูมิสูงมากจนทำให้เกิด NO_X ปริมาณ มาก มีสามวิธีที่สามารถลดการเกิด NO_X วิธีแรกทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีความสม่ำเสมอโดย การผสมอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนพ่นส่วนผสมเข้าห้องเผาไหม้ วิธีที่สองใช้การพ่นน้ำหรือไอน้ำเข้า ห้องเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิเผาไหม้และลดการเกิด NO_X วิธีที่สามใช้คะตาลิสต์เพื่อลดอุณหภูมิการ เผาไหม้เพื่อลดการเกิด NO_X

กังหันก๊าซ

กังหันก๊าซประกอบด้วยขั้นทำงานหลายขั้นเหมือนกังหันไอน้ำ ขั้นทำงานความดันสูงเป็นขั้น ทำงานแรงดลหรือขั้นทำงานแรงปฏิกิริยาที่มีระดับปฏิกิริยาต่ำ ขั้นทำงานความดันต่ำเป็นขั้นทำงาน ที่มีระดับปฏิกิริยาสูง อย่างไรก็ตามข้อแตกต่างกังหันก๊าซกับกังหันไอน้ำคือ ใบพัดของกังหันก๊าซ ถูกออกแบบให้สามารถทนก๊าซอุณหภูมิสูงกว่า ใบพัดของเครื่องกังหันก๊าซถูกออกแบบให้อากาศ สามารถไหลเข้าออกและภายในใบพัดมีช่องทางไหลที่วกวนเพื่อให้อากาศระบายความร้อนอย่าง ทั่วถึงภายในใบพัด อากาศที่ใช้หล่อเย็นใบพัดได้มาจากเครื่องอัดก๊าซที่ไม่ได้ไหลผ่านห้องเผาไหม้ จึงยังคงมีอุณหภูมิไม่สูงนักอากาศไหลเข้าใบพัดที่ฐานใบพัดดังแสดงในรูปที่ 9.19 ผิวใบพัดมีรูให้ อากาศไหลออกได้โดย อากาศบางส่วนจะออกจากใบพัดทางรูเหล่านี้และเคลือบใบพัดไม่ให้สัมผัส กับก๊าซร้อน การระบายความร้อนลักษณะนี้มีประสิทธิผลที่สูงและทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียสูงกว่า จุดหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้ทำใบพัด



รูปที่ 9.18: การระบายความร้อนให้ใบพัด

เครื่องกังหันก๊าซอาจแบ่งเป็นสองแบบ เครื่องกังหันก๊าซแบบเพลาเดียว (single-shaft gas turbine) มีเครื่องอัดก๊าซหนึ่งเครื่องและกังหันก๊าซหนึ่งเครื่องที่หมุนบนพลาเดียวกัน รูปแบบการติดตั้ง เครื่องกังหันก๊าซเพื่อผลิตไฟฟ้าแบ่งเป็น เครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดียว รูปที่ 10.21 แสดงเครื่อง กังหันก๊าซแบบสองเพลา (two-shaft gas turbine) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอัดก๊าซหนึ่งเครื่องและ กังหันก๊าซสองเครื่อง เครื่องแรก (GT1) มีความดันสูงและขับเคลื่อนเครื่องอัดก๊าซ เครื่องที่สอง (GT2) ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Gen) เครื่องกังหันทั้งสองเครื่องไม่อยู่บนเพลาเดียวกันจึงสามารถ

186

9.3. เครื่องกังหันก๊าซ

ทำงานที่ความรอบต่างกันได้ ดังนั้นเครื่องกังหันก๊าซแบบสองเพลาจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ข้อ เสียของเครื่องกังหันก๊าซแบบนี้คือ เครื่องกังหันความดันต่ำอาจหมุนด้วยความเร็วที่มากจนเครื่อง เสียหายได้เนื่องจากไม่มีเครื่องอัดก๊าซทำหน้าที่เหมือนเบรกที่ควบคุมความเร็วรอบดังเช่นเครื่อง กังหันความดันสูง



รูปที่ 9.19: เครื่องกังหันก๊าซแบบสองเพลา

9.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องกังหันก๊าซ

ผู้ผลิตเครื่องกังหันก๊าซจะระบุกำลังงานของอัตราความร้อนของเครื่องกังหันก๊าซทุกรุ่นที่จำหน่าย โดยผู้ผลิต สภาวะมาตรฐาน ISO สำหรับวัดค่ากำลังงานและอัตราความร้อนคือ ที่อุณหภูมิ 15°C ความขึ้นสัมพัทธิ์ 60% และความดัน 1 atm การใช้งานเครื่องกังหันก๊าซจริงอาจให้ค่ากำลังงานและ อัตราความร้อนที่แตกต่างกับค่านี้เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่อง ปัจจัยที่ สำคัญได้แก่

- อุณหภูมิแวดล้อม อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอัดก๊าซค่อนข้างคงที่ แต่กำลังงานของเครื่องกังหันก๊าซขึ้นกับอัตราการไหลเชิงมวล ดังนั้นอากาศที่มีความหนา แน่นมากขึ้นจะทำให้กำลังงานเครื่องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้อัตราความร้อนจะลดลง หรือประสิทธิภาพของเครื่องจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมลดลงเนื่องจากอัตราส่วนความ ดันของเครื่องอัดก๊าซจะเพิ่มขึ้น
- ความดันบรรยากาศ กำลังงานของเครื่องกังหันก๊าซลดลงเมื่อเครื่องกังหันก๊าซทำงานที่ระดับ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลซึ่งความดันบรรยากาศจะน้อยกว่า 1 atm และความหนาแน่น ของอากาศจะน้อยลงเมื่อเทียบกับความหนาแน่นที่ระดับน้ำทะเล อย่างไรก็ตามอัตราความ ร้อนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันบรรยากาศเปลี่ยนแปลง
- ความชื้นสัมพัทธ์ ไอน้ำมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศแห้ง ดังนั้นอากาศที่มีความชื้นสัม-พัทธ์เพิ่มขึ้นจะมีความหนาแน่นลดลง และส่งผลให้กำลังงานของเครื่องกังหันก๊าซลดลงและ

อัตราความร้อนจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์น้อยมากเมื่อเทียบ ผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อม

- ความดันสูญเสียทางเข้าและทางออก กำลังงานและประสิทธิภาพที่ระบุโดยผู้ผลิตเครื่อง กังหันก๊าซอยู่ภายใต้เงื่อนไขว่า ไม่มีความดันสูญเสียที่ทางเข้าและทางออกของเครื่อง แต่ ในการใช้งานจริงจะมีความดันสูญเสียที่ทางเข้าเนื่องจากมีการติดตั้งเครื่องกรองฝุ่นละออง และสิ่งแปลกปลอมในอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดก๊าซ และจะมีความดันสูญเสียที่ทางออก เนื่องจากมีการติดตั้งท่อก๊าซเสีย อุปกรณ์ควบคุมเสียงและ ปล่องระบายก๊าซเสียที่ทางออก ดังนั้นความดันของก๊าซเสีย อุปกรณ์ควบคุมเสียงและ ปล่องระบายก๊าซเสียที่ทางออก ดังนั้นความดันของก๊าซเสีย ที่ทางออกจึงต้องมากกว่าความดันบรรยากาศเพื่อให้ก๊าซเสีย สามารถไหลจากเครื่องสู่บรรยากาศได้ ความดันสูญเสียทางเข้าและทางออกส่งผลให้กำลัง งานของเครื่องกังหันก๊าซลดลงและอัตราความร้อนจะเพิ่มขึ้น
- การพ่นน้ำหรือไอน้ำ วิธีลดการเกิด NO_X ที่ได้ผลคือ การพ่นน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเผาไหม้ลดลง ผลพลอยได้คือ กำลังงานของเครื่องกังหันก๊าซจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอัตราการไหลเซิงมวลในกังหันก๊าซมากขึ้น นอกจากนี้การพ่นไอน้ำยังทำให้อัตรา ความร้อนลดลง แต่การพ่นน้ำกลับทำให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงบางส่วน ต้องใช้ในการทำให้น้ำระเหย

9.3.3 การเพิ่มสมรรถนะให้เครื่องกังหันก๊าซ

ประเทศไทยมีอุณหภูมิเกิน 15°C เกือบตลอดปี ดังนั้นกำลังงานและประสิทธิภาพของเครื่อง กังหันก๊าซที่ใช้งานในประเทศไทยจึงน้อยกว่าค่าที่ระบุโดยผู้ผลิต วิธีเพิ่มกำลังงานและประสิทธิภาพ ที่ได้ผลคือ การลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอัดก๊าซ อุณหภูมิของอากาศจะลดลงถ้าอากาศ สัมผัสกับน้ำที่กำลังระเหยเนื่องจากการระเหยจะถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศ สองระบบที่การ ลดอุณหภูมิอากาศด้วยวิธีนี้คือ ระบบทำความเย็นแบบระเหย (evaporative cooling system) และ ระบบทำให้เกิดหมอก (fogging system) ระบบแรกใช้การไหลของอากาศผ่านวัสดุพรุนเปียกลด อุณหภูมิอากาศพร้อมกับ เพิ่มอัตราการไหล เมื่อ เทียบกับอากาศ แห้ง ระบบที่สองใช้การพ่นน้ำที่ ละอองเล็กมากจนเหมือนหมอกไปผสมกับอากาศ ละอองน้ำจะระเหยและส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิ ลดลง นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศชื้นที่ใหลออกจะมากกว่าอัตราการไหลของอากาศแห้ง ที่ไหลเข้า ทั้งสองระบบเหมาะกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น การลดอุณหภูมิอากาศอาจใช้วิธีถ่ายเทความร้อนกับน้ำเย็นในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน น้ำเย็นได้จากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (absorption cooling system) ซึ่งใช้ความร้อนขับเคลื่อนการทำงานของระบบซึ่งอาจมีแอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นหรือระบบ ท้ำความเย็นแบบอัดไอ (vapor compression system) ซึ่งใช้ไฟฟ้าขับเคลื่อนการทำงานของระบบ ทั้งสองระบบทำงานได้ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง

นอกจากนี้กำลังงานและประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจากการดัดแปลงวัฏจักรเบรย์ตัน รูปที่ 9.21 แสดงแผนภาพของวัฏจักรพ่นไอน้ำ (steam injection cycle) วัฏจักรนี้ใช้ความร้อนจากก๊าซเสียที่ ออกจากเครื่องกังหันในการผลิตไอน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ไอน้ำที่ได้จะถูกพ่นเข้าห้อง เผาไหม้พร้อมกับอากาศและเชื้อเพลิง ผลที่ได้คือกำลังงานและประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ วัฏจักรกังหันก๊าซแบบธรรมดา รูปที่ 9.22 แสดงแผนภาพของวัฏจักรการระเหย (evaporation cycle) เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรกังหันก๊าซในรูปที่ 10.1 จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมคือ เครื่องระเหย (Evap) และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (HX) อากาศความดันสูงที่ออกจากเครื่องอัดก๊าซจะไหล ผ่านเครื่องระเหย น้ำที่พ่นเข้าเครื่องระเหยจะกลายเป็นไอเมื่อผสมกับอากาศซึ่งทำให้อัตราการไหล ของอากาศชื้นที่ออกจากเครื่องระเหยมากกว่าอัตราการไหลเข้าของอากาศแห้ง ก่อนไหลเข้าห้อง เผาไหม้อากาศจะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซเสียที่ออกจากเครื่อง กังหัน วัฏจักรการระเหยจึงมีกำลังงานสุทธิและประสิทธิภาพสูงกว่าวัฏจักรกังหันก๊าซแบบธรรมดา



รูปที่ 9.20: วัฏจักรพ่นไอน้ำ

9.4 เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน

เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนหรือ HRSG ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำป้อนเป็นไอน้ำยวดยิ่งโดย ใช้ความร้อนจากก๊าซเสียที่ได้จากเครื่องกังหันก๊าซ HRSG ส่วนประกอบที่สำคัญของ HRSG ได้แก่ เครื่องประหยัดเชื้อเพลิง (economizer) เครื่องระเหย (evaporator) ถังพักไอน้ำ (steam drum) และ เครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง (superheater) HRSG มีสองแบบคือ แบบแนวนอน (horizontal) และแบบ แนวตั้ง (vertical) รูปที่ 9.23 แสดง HRSG แบบแนวนอน ก๊าซเสียไหลในแนวนอน ในขณะที่น้ำและ ไอน้ำไหลในแนวตั้งเป็นส่วนใหญ่ เป็นที่น่าสังเกตว่ามีถังพักไอน้ำติดตั้งตรงทางออกของเครื่องระเหย ไอน้ำที่ออกจากเครื่องระเหยต้องมีความชื้นปะปนอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้ท่อของเครื่องระเหยมีอุณหภูมิ สูงเกินไป ไอน้ำอิ่มตัวและน้ำอิ่มตัวจะแยกกันในถังพักไอน้ำ การไหลของน้ำและไอน้ำเกิดขึ้นโดยแรง ลอยตัว การที่ถังพักไอน้ำอยู่สูงกว่าเครื่องระเหยทำให้แรงลอยตัวมากพอและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่อง สูบ รูปที่ 9.24 แสดง HRSG แบบแนวตั้ง ก๊าซเสียไหลในแนวตั้ง ในขณะที่น้ำและไอน้ำไหลในแนว นอนเป็นส่วนใหญ่ จะเห็นว่าถังพักไอน้ำและเครื่องระเหยอยู่ระดับเดียวกัน แรงลอยตัวจึงไม่เพียง



รูปที่ 9.21: วัฏจักรการระเหย

พอที่จะทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำและไอน้ำ HRSG แบบแนวตั้งจึงต้องมีเครื่องสูบ HRSG แบบ แนวตั้งต้องการพื้นที่น้อยกว่า HRSG แบบแนวนอนซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญของ HRSG แบบแนว ตั้ง



รูปที่ 9.22: เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนแนวนอน

HRSG ในรูปที่ 9.23 และ 9.24 เป็นแบบความดันเดียว (single-pressure HRSG) รูปที่ 9.25 แสดง HRSG แบบสองความดัน (double-pressure HRSG) HRSG แต่ละชุดประกอบด้วยเครื่อง ประหยัดเชื้อเพลิง เครื่องระเหย ถังพักไอน้ำ และเครื่องทำไอน้ำยวดยิ่ง ความดันไอน้ำใน HRSG ทั้ง สองชุดแตกต่างกัน ก๊าซเสียไหลจาก HRSG ความดันสูงไป HRSG ความดันต่ำ ไอน้ำยวดยิ่งที่ออก จาก HRSG ความดันสูงจะไหลไปยังกังหันไอน้ำความดันสูง และไอน้ำยวดยิ่งที่ออกจาก HRSG ความดันต่ำจะไหลไปยังกังหันไอน้ำความดันสูง และไอน้ำยวดยิ่งที่ออกจาก HRSG ความดันต่ำจะไหลไปยังกังหันไอน้ำความดันต่ำ อาจมีการติดตั้งเครื่องให้ความร้อนซ้ำ (reheater)



รูปที่ 9.23: เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนแนวตั้ง

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า เครื่องให้ความร้อนซ้ำจะติดตั้งตรงทางออกของกังหันไอน้ำความ ดันสูง ความดันไอน้ำของการให้ความร้อนซ้ำจะเท่ากับความดันของ HRSG ความดันต่ำ ไอน้ำที่ไหล ออกจากเครื่องให้ความร้อนซ้ำจะผสมกับไอน้ำยวดยิ่งที่ไหลออกจาก HRSG ความดันต่ำก่อนที่จะ ไหลเข้ากังหันไอน้ำความดันต่ำ



รูปที่ 9.24: HRSG แบบสองความดัน

คำถามท้ายบท

- 1. อะไรคือข้อแตกต่างระหว่างวัฏจักรกังหันก๊าซกับวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด
- 2. วัฏจักรเบรย์ตันแบบปิดมีความได้เปรียบอย่างไรเมื่อเทียบกับวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด
- 3. รีเจนเนอเรเตอร์เพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรเบรย์ตันได้อย่างไร
- เขียนแผนภาพ T-s ของวัฏจักรเบรย์ตันที่มีรีเจนเนอเรชัน การให้ความร้อนซ้ำ และอินเตอร์คูล ลิ่ง
- 5. เขียนแผนภาพอุปกรณ์ของวัฏจักรผสม
- 6. ถ้าวัฏจักรเบรย์ตันมีประสิทธิภาพ η_B และวัฏจักรแรงคินมีประสิทธิภาพ η_R วัฏจักรผสมใน อุดมคติจะมีประสิทธิภาพเท่าไร
- การให้ความร้อนเพิ่มเติมที่เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนในวัฏจักรผสมเพื่อเพิ่มอัตรา การผลิตไอน้ำจะส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของวัฏจักร
- 8. เครื่องกังหันก๊าซแบ่งเป็นกี่แบบ อะไรบ้าง
- 9. ระบุลักษณะเฉพาะของเครื่องกังหันก๊าซแบบอนุพันธ์ของเครื่องยนต์ไอพ่นมาสองข้อ
- 10. เครื่องอัดก๊าซที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซเป็นแบบใด
- 11. อธิบายการเกิดสภาวะสะดุดในเครื่องอัดก๊าซ
- 12. วิธีใดลดปริมาณ NO_x ในห้องเผาไหม้ของเครื่องกังหันก๊าซได้
- 13. เครื่องกังหันก๊าซแบบสองเพลาหมายถึงอะไร
- 14. การหล่อเย็นในใบพัดของกังหันก๊าซใช้อะไรเป็นสารหล่อเย็น
- 15. กำลังงานของเครื่องกังหันก๊าซจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรถ้าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมลดลง
- 16. อะไรคือข้อจำกัดของการเพิ่มสมรรถนะให้เครื่องกังหันก้าซโดยระบบทำให้เกิดหมอก
- 17. เขียนแผนภาพอุปกรณ์ของวัฏจักรพ่นไอน้ำ
- 18. ระบุส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน
- 19. รีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิผล 50% ก๊าซเสียไหลเข้าที่อุณหภูมิ 300°C ไหลออกที่อุณหภูมิ 200°C และอากาศไหลเข้าที่อุณหภูมิ 100°C จงคำนวณหาอุณหภูมิอากาศที่ไหลออก

192

9.4. เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน

- 20. หา ประสิทธิภาพ ของ วัฏจักร เบรย์ ตัน ใน อุดมคติ ที่ มี อุณหภูมิ ต่ำ สุด 30°C อุณหภูมิ สูงสุด 2000°C และอัตราส่วนความดันเท่ากับ 4
- ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรข้างต้นโดยการติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ ประสิทธิภาพ ของวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นได้สูงสุดกี่เปอร์เซ็นต์
- 22. อากาศไหลเข้าเครื่องอัดก๊าซของวัฏจักรเบรย์ตันที่อุณหภูมิ 300 K และความดัน 1 atm เครื่องอัดก๊าซมีประสิทธิภาพ 80% อัตราส่วนความดันของเครื่องอัดก๊าซเท่ากับ 7 อุณหภูมิ ของอากาศที่ไหลเข้ากังหันก๊าซเท่ากับ 1200 K กังหันก๊าซมีประสิทธิภาพ 90% วัฏจักรนี้มี ประสิทธิภาพเท่าไร
- 23. วัฏจักรเบรย์ตันมีอินเตอร์คูลลิ่งหนึ่งครั้งและการให้ความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง อัตราส่วนความ ดันของเครื่องอัดก๊าซและกังหันก๊าซเท่ากับ √2 อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องอัดก๊าซแต่ละ เครื่องเท่ากับ 300 K อุณหภูมิของอากาศที่เข้ากังหันก๊าซแต่ละเครื่องเท่ากับ 1300 K วัฏจักร นี้มีรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าประสิทธิผลเท่ากับ 80% จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร
- 24. วัฏจักรผสมผลิตกำลังงาน 200 MW โดยวัฏจักรเบรย์ตันมีอัตราส่วนความดันเท่ากับ 7.5 และ อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 15°C และ 1100°C ตามลำดับ HRSG ผลิตไอน้ำยวดยิ่งที่มี ความดัน 50 bar และอุณหภูมิ 500°C ความดันในเครื่องควบแน่นของวัฏจักรเท่ากับ 0.1 bar จงคำนวณหาประสิทธิภาพของวัฏจักรผสม

194

บทที่ 10 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ

10.1 ลักษณะทั่วไป

แสงอาทิตย์ที่ส่องมาบนโลกทำให้น้ำในลำคลอง แม่น้ำ ทะเลและมหาสมุทรระเหย ความหนา แน่นของไอน้ำน้อยกว่าอากาศ ไอน้ำจึงลอยขึ้นไปที่ระดับความสูงหนึ่งจากพื้นดินและก่อตัวเป็นเมฆ ฝน เมื่อเมฆฝนมีขนาดใหญ่ได้พอเหมาะ ฝนก็ตกลงมา ฝนบางส่วนตกลงในแหล่งน้ำที่ตั้งอยู่บนที่ สูงหรือภูเขา เมื่อน้ำไหลจากแหล่งน้ำนี้ลงสู่ที่ต่ำ พลังงานศักย์จะแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ซึ่งสามารถ ใช้ผลิตไฟฟ้าได้ด้วยโรงไฟฟ้าพลังน้ำ (hydroelectric power plant) เห็นได้ว่าพลังงานน้ำมีที่มาจาก พลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำก็คือ การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ทางอ้อมนั่นเอง

โรงไฟฟ้าพลังน้ำมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น กล่าวคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่ำเนื่องจากไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงและดูแลรักษาง่าย ทนทานต่อการ ใช้งาน เดินเครื่องโรงไฟฟ้าและหยุดการทำงานได้รวดเร็ว อายุการใช้งานยาวนาน ประสิทธิภาพสูง สามารถใช้เป็นได้ทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าหลักและหน่วยผลิตไฟฟ้าสำรอง และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทาง อากาศหรือทางน้ำ โรงไฟฟ้าพลังน้ำมีข้อเสียที่ต้องการการลุงทุนก่อสร้างสูงและใช้เวลาก่อสร้างนาน แต่เมื่อก่อสร้างเสร็จจนใช้งานได้ การลงทุนจะคุ้มค่า อย่างไรก็ตามการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำใน บางพื้นที่อาจไม่คุ้มค่าเมื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

โรงไฟฟ้าพลั่งน้ำมีหลายขนาดตั้งแต่ 100 kW ถึงมากกว่า 30 MW โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบ่ง เป็นสามประเภทคือ (1) โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ (run-of-river plant) เป็นโรงไฟฟ้า ขนาดเล็กที่สร้างขึ้นขวางทางน้ำไหลในแหล่งน้ำเล็ก ๆ ลำธารหรือฝ่ายต่าง ๆ (2) โรงไฟฟ้าพลังงาน น้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ (impoundment plant) เป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานศักย์ ของน้ำที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือแหล่งน้ำที่สร้างขึ้นมา และ (3) โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบ สูบน้ำกลับ (pumped-storage plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากพลังงานศักย์ของ น้ำในแหล่งน้ำและใช้ไฟฟ้าสูบน้ำกลับขึ้นไปแหล่งน้ำเพื่อสะสมพลังงานศักย์ โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ใน ประเทศไทยเป็นประเภทที่สอง

รูปที่ 10.1 แสดงส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ เขื่อน (dam) ทำหน้าที่กักเก็บน้ำและ

ปล่อยน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้า ท่อส่งน้ำ (penstock) ทำหน้าที่แปลงพลังงานศักย์ของน้ำเป็นพลังงาน จลน์ ถังควบคุมความดัน (surge tank) ทำหน้าที่ควบคุมความดันน้ำในท่อส่งน้ำไม่ให้เพิ่มหรือลด อย่างรวดเร็ว กังหันน้ำ (water turbine) ทำหน้าที่แปลงพลังงานจลน์ของน้ำเป็นพลังงานงานกลในรูป ของการหมุนเครื่องกังหัน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลจากเครื่อง กังหันเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 10.1: ส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

น้ำที่ระดับความสูง H เมื่อเทียบกับเครื่องกังหันและมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร Q จะมีศักยภาพ ในการผลิตไฟฟ้าได้ ρgQH โรงไฟฟ้าพลังน้ำมีประสิทธิภาพมากกว่า 75% ในการแปลงศักยภาพนี้ เป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังน้ำมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากโรงไฟฟ้ากับพลังงานศักย์ของน้ำในเชื่อน ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขึ้นกับประสิทธิ ภาพในการแปลงรูปพลังงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าดังนี้

$$\eta = \eta_p.\eta_t.\eta_g \tag{10.1}$$

โดยที่ η_p คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานจลน์ของน้ำที่ออกจากท่อส่งน้ำกับพลังงานศักย์ของน้ำใน เขื่อน

 η_t คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานกลจากกังหันน้ำกับพลังงานจลน์ของน้ำที่ออกจากท่อส่งน้ำ η_g คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับพลังงานกลจากกังหันน้ำ

10.2 เขื่อน

ต้นทุนหลักของการสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำมาจากการสร้างเชื่อน ซึ่งค่าใช้จ่ายส่วนนี้รวมถึงค่า เวนคืนที่ดินและค่าใช้จ่ายแฝงในรูปของระบบนิเวศน์ที่เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามเชื่อนมีประโยชน์ ในด้านอื่นเช่น เป็นแหล่งน้ำเพื่อการชลประทาน เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลา และเป็นสถานที่พักผ่อน เป็นต้น เขื่อนเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีค่าก่อสร้างสูงและต้องใช้พื้นที่มาก ที่ตั้งของเขื่อนเป็นแหล่ง น้ำขนาดใหญ่ที่มีน้ำปริมาณมากพอและมีน้ำระดับสูงพอที่จะทำให้การสร้างเขื่อนคุ้มค่า การจำแนก ประเภทของเขื่อนอาจจำแนกด้วยวัสดุที่ใช้ก่อสร้างเขื่อนเป็นเขื่อนหินถม (rock-filled dam) เขื่อนดิน (earth dam) และเขื่อนคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างเขื่อนคอนกรีตอาจแบ่งเป็น เขื่อนถ่วงน้ำหนัก (gravity dam) เขื่อนโค้ง (arc dam) และเขื่อนครีบ (buttress dam)

- เชื่อนหินถมเหมาะกับท้องถิ่นที่มีหินจำนวนมากซึ่งจะลดค่าก่อสร้างเชื่อน เชื่อนหินถมไม่ จำเป็นต้องมีฐานรากที่แข็งแรงมาก เชื่อนถมมักมีปัญหาการรั่วซึมของน้ำผ่านเชื่อน ดังนั้น จึงต้องมีการสร้างผนังกั้นน้ำด้านหน้าเชื่อนหรือการเสริมตรงกลางเชื่อนหรือด้วยวัสดุกันน้ำ เช่น ดินเหนียว คอนกรีตหรือยางมะตอย ตัวอย่างของเชื่อนชนิดนี้ในประเทศไทยได้แก่ เชื่อน ศรีนครินทร์ เชื่อนวชิราลงกรณ์ และเชื่อนบางลาง เป็นต้น
- เขื่อนดินมีคุณสมบัติคล้ายเขื่อนถมหินแต่วัสดุที่ใช้สร้างเขื่อนส่วนใหญ่เป็นดิน ตัวอย่างเขื่อน ชนิดนี้ในประเทศไทยได้แก่ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแก่งกระจาน และเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล เป็นต้น
- เชื่อนถ่วงน้ำหนักมีลักษณะรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สามเหลี่ยม เชื่อนชนิดนี้เหมาะกับ การก่อสร้างในบริเวณที่มีหินฐานรากที่แข็งแรง ตัวเชื่อนเป็นคอนกรีตที่มีความหนาและน้ำ หนักมากพอที่จะต้านทานแรงดันของน้ำได้โดยอาศัยน้ำหนักของตัวเชื่อนเอง เชื่อนถ่วงน้ำ หนักออกแบบง่ายและมีความปลอดภัยสูงแต่ต้องใช้คอนกรีตปริมาณมากในก่อสร้าง จึงมีค่า ก่อสร้างสูง
- เชื่อนโค้งถูกออกแบบให้ด้านหน้าเชื่อนโค้งเข้าหาแหล่งเก็บน้ำ ความโค้งของเชื่อนจะต้าน แรงดันของน้ำได้ เชื่อนชนิดนี้เหมาะที่จะสร้างในบริเวณหุบเขาที่มีความกว้างน้อยกว่าความ สูงมากและมีหินฐานรากที่แข็งแรง ถ้าฐานรากไม่แข็งแรงพออาจจำเป็นต้องปรับฐานราก ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นก่อน แล้วจึงสร้างเชื่อนขึ้นภายหลัง ข้อดีของเชื่อนโค้งคือ มีรูปร่าง บางกว่าเชื่อนถ่วงน้ำหนักมากซึ่งทำให้ค่าก่อสร้างถูกกว่า แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการ ออกแบบและการดำเนินการที่แพงกว่า ประเทศไทยมีเชื่อนโค้งเพียงแห่งเดียวคือ เชื่อนภูมิพล ซึ่งเป็นเชื่อนคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศ
- เขื่อนครีบเป็นเขื่อนคอนกรีตเสริมเหล็กมีด้านหน้าเป็นแบบเรียบหรือแบบโค้งก็ได้และด้าน หลังมีแผ่นคอนกรีตรูปครีบ (buttress) หลายอันสำหรับรับแรงดันของน้ำและถ่ายแรงไปยัง ฐานรากของเขื่อน เขื่อนชนิดนี้ใช้วัสดุปริมาณคอนกรีตน้อยกว่าเขื่อนถ่วงน้ำหนัก 20-30% ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าและความปลอดภัยจะลดลง จึงไม่นิยมสร้างเขื่อนให้มีความสูง มากนัก

ตารางที่ 10.1 แสดงให้เห็นว่าเขื่อนส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นเขื่อนหินถม เขื่อนที่ใหญ่ที่สุดใน ประเทศไทยคือ เขื่อนศรีนครินทร์ แต่เขื่อนที่มีโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดใหญ่ที่สุดของประเทศคือ เขื่อน ภูมิพล

เขื่อน	ที่ตั้ง	ประเภท	ความจุ	กำลังการผลิตไฟฟ้า
			(m ³)	(MW)
ภูมิพล	ตาก	เขื่อนโค้ง	13462	731
ศรีนครินทร์	กาญจนบุรี	เขื่อนหินถม	17745	720
สิริกิติ์	อุตรดิตถ์	เขื่อนดิน	9510	500
วซิราลงกรณ์	กาญจนบุรี	เขื่อนหินถม	8860	300
รัชชประภา	สุราษฎร์ธานี	เขื่อนหินถม	3057	240
บางลาง	ยะลา	เขื่อนหินถม	1420	72
อุบลรัตน์	ขอนแก่น	เขื่อนหินถม	2263	55
สีวินธร	อุบลราชธานี	เขื่อนหินถม	1967	36

ตารางที่ 10.1: เขื่อนที่สำคัญในประเทศไทย

ระดับน้ำในเชื่อนอาจสูงจนน้ำล้นข้ามสันเชื่อนได้ในกรณีที่มีฝนตกมากและทำให้ปริมาณน้ำ สะสมในแหล่งเก็บน้ำมากเกินไป เพื่อควบคุมระดับน้ำไม่ให้สูงเกินไปจึงต้องมีการก่อสร้างช่องระบาย น้ำล้น (spillway) ควบคู่ไปกับเชื่อน ช่องระบายน้ำล้นทำหน้าที่ระบายน้ำทิ้งผ่านเชื่อน สันของช่อง ระบายน้ำล้นจะเท่ากับระดับน้ำเก็บกัก ถ้าระดับน้ำสูงกว่าระดับเก็บกักน้ำจะระบายออกทางช่อง ระบายน้ำล้นทันที การระบายน้ำตามปกติในปริมาณที่คาดการณ์ไว้เมื่อออกแบบเชื่อนจะใช้ช่อง ระบายน้ำล้นปกติ (service spillway) แต่ถ้าปริมาณน้ำเกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ก็จำเป็นต้องระบาย น้ำออกทางช่องระบายน้ำล้นฉุกเฉิน (emergency spillway) สันของช่องระบายน้ำล้นฉุกเฉินจะสูง กว่าสันของช่องระบายน้ำปกติเพื่อให้น้ำไหลผ่านช่องระบายน้ำล้นปกติก่อนช่องระบายน้ำล้นฉุกเฉิน

10.3 ท่อส่งน้ำ

ท่อส่งน้ำมีสองส่วน ส่วนแรกเป็น ท่อส่งน้ำความดันต่ำ (low-pressure conduit) น้ำที่ออกจาก เขื่อนจะไหลเข้าท่อส่งน้ำความดันต่ำเป็นลำดับแรก ทางเข้าท่อติดตั้งตะแกรง (screen) เพื่อป้องกัน เศษไม้, วัชพืช หรือวัตถุขนาดใหญ่ไหลเข้าไปในท่อส่งน้ำซึ่งอาจจะเข้าไปสร้างความเสียหายให้ใบพัด ของเครื่องกังหันได้ ขนาดของช่องตะแกรงจะต้องไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป ถ้าเล็กเกินไปจะจำกัดอัตรา การใหลของน้ำภายในท่อส่งน้ำ ถ้าใหญ่เกินไปก็จะไม่สามารถป้องกันวัตถุขนาดใหญ่ได้ ด้านปลาย ของท่อนี้จะต่อกับถังควบคุมความดันซึ่งทำหน้าที่ดูดซับความดันน้ำที่เพิ่มอย่างกระทันหันและเพิ่ม ความดันให้น้ำในกรณีที่ความดันน้ำลดลงอย่างกระทันหัน ส่วนที่สองเป็นท่อน้ำความดันสูง (highpressure conduit) ที่ลาดลงเพื่อเพิ่มความดันของน้ำ ท่อส่งน้ำความดันต่ำอาจสร้างจาก PVC หรือ โพลีเอตทีลีน (polyethelene) ท่อส่งน้ำความดันสูงอาจสร้างจากเหล็กกล้าหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก ท่อส่งน้ำอาจวางใต้ดินหรือบนดินก็ได้ และอาจมีข้อต่อการขยาย (expansion joint) เพื่อรับมือกับ 10.3. ท่อส่งน้ำ

การเคลื่อนตัวของแนวท่อเมื่อเวลาผ่านไป ถ้าพิจารณาสมดุลพลังงานของท่อส่งน้ำ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + \frac{p_L}{\rho} = gH \tag{10.2}$$

โดยที่ H คือ ระยะตามแนวตั้งจากระดับน้ำในเชื่อนถึงทางออกจากท่อส่งน้ำ p_1 คือ ความดันน้ำ ทางออก p_L คือ ความดันสูญเสีย (pressure loss) ของการไหลในท่อส่งน้ำ และ V_1^- คือ ความเร็วเฉลี่ย ของน้ำที่ไหลออุกจากท่อส่งน้ำซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประสิทธิ ภาพของท่อส่งน้ำอื่อ

$$\eta_p = 1 - \frac{p_L}{\rho g H} \tag{10.3}$$

การไหลในท่อทำให้เกิดความดันสูญเสียซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ η_p น้อยกว่า 1 ความดันสูญเสียมีค่าลด ้ลงเมื่อขนาดของท่อเพิ่มขึ้นและความยาวของท่อลดลง ดังนั้นท่อส่งน้ำมักมีขนาดใหญ่เพื่อลดความ ้ดันสูญเสียและเพิ่มอัตราการไหลของน้ำแต่ขนาดของท่อถูกจำกัดด้วยราคา นอกจากนี้การออกแบบ ท่อส่งน้ำควรลดความยาวของท่อที่ไม่จำเป็นและหลีกเลี่ยงการวางท่อแบบหักมมซึ่งจะเพิ่มความดัน ้สูญเสียในท่อ อย่างไรก็ตามท่อส่งน้ำมักเป็นค่าใช้จ่ายหลักของการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำเนื่องจาก ท่อส่งน้ำมักมีขนาดใหญ่และมีความยาวมาก

การควบคมการไหลในท่อส่งน้ำใช้วาล์วซึ่งติดตั้งใกล้ทางเข้ากังหันน้ำ โรงไฟฟ้าพลังน้ำที่ทำ หน้าที่จ่ายไฟให้ภาระสูงสุดในระบบมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนอัตราการไหลตลอดเวลา ในช่วงที่ ภาระลดลงต่ำกว่าภาระสูงสุดโรงไฟฟ้าจะหยุดเดินเครื่องโดยการปิดวาล์ว การปิดวาล์วอย่างกระทัน หันทำให้เกิดสภาวะคลื่นกระแทก (water hammer) ซึ่งเป็นสภาวะที่ความดันน้ำในท่อเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วและอาจมากกว่าความดันที่ท่อออกแบบให้รองรับได้ สภาวะดังกล่าวจึงอาจทำให้ท่อเสียหาย ้ได้จากการความดันภายใน ในทางกลับกันการเปิดวาล์วอย่างกระทันหันน้ำไหลออกจากท่อส่งน้ำ ้อย่างรวดเร็วจนอาจเกิดสภาวะสุญญากาศในท่อซึ่งทำให้ท่อเสียหายจากการยุบตัวลงได้เช่นกัน วิธี ้ ป้องกันความเสียหายจากการเปลี่ยนคลื่นกระแทกและการเกิดสุญญากาศในท่อคือ การติดตั้งถังลด แรงดันน้ำที่ท่อส่งน้ำ หน้าที่อื่นของถังลดแรงดันน้ำคือ เป็นที่เก็บน้ำที่เกินความต้องการของเครื่อง กังหัน จ่ายน้ำเพิ่มเติมให้เครื่องกังหันเมื่อมีความต้องการน้ำมากกว่าปกติและลดการเปลี่ยนแปลง ความดันน้ำในท่อส่งน้ำ

ถังลดแรงดันน้ำมีสามแบบ ถังควบคุมความแบบธรรมดา (simple surge tank) เป็นถังทรง ้กระบอกที่มีทางเข้าขนาดเท่าหน้าตัดของถัง ถังต้องมีความสูงเพียงพอสำหรับรองรับปริมาณน้ำที่ ล้นออกมาจากท่อส่งน้ำเมื่อปิดวาล์ว_ูถังแบบนี้ไม่สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อ ้อย่างรวดเร็วได้ ถังควบคุมความดันน้ำแบบออริฟิซ (orifice surge tank) มีทางเข้าขนาดเล็กและ ้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วในท่อส่งน้ำได้ดี ถังควบคุมความดันแบบผล ้ต่าง (differential surge tank) เป็นแบบผสมโดยมีถังเล็กอยู่ในถังใหญ่ น้ำไหลจากท่อส่งน้ำเข้าถัง เล็กผ่านออริฟิซ น้ำที่ล้นจากถังเล็กจะไหลเข้าถังใหญ่ จึงไม่มีการสูญเสียน้ำเหมือนสองแบบแรก รูป ที่ 10.2 แสดงถังควบคมความดันทั้งสามแบบ



รูปที่ 10.2: ถังควบคุมความดัน

10.4 กังหันน้ำ

กังหันน้ำมีต้นกำเนิดจากกังหันน้ำที่ใช้เพื่อการเกษตร ในเวลาต่อมาได้รับการพัฒนาให้มีประ-สิทธิภาพสูงและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถใช้ในโรงไฟฟ้าพลังน้ำทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้ หลักการทำงานทั่วไปของกังหันน้ำคล้ายกับกังหันไอน้ำและกังหันก๊าซ แต่กังหันน้ำก็มีลักษณะ เฉพาะเนื่องจากของไหลในกังหันเป็นน้ำ รูปที่ 10.3 แสดงการไหลของน้ำที่มีความดันสูง (p1) และความเร็วสูง (V1) เข้ากังหันน้ำ น้ำที่ไหล

รูปที่ 10.3 แสดงการไหลของน้ำที่มีความดันสูง (p₁) และความเร็วสูง (V₁) เข้ากังหันน้ำ น้ำที่ไหล ออกมีความดันต่ำ (p₂) และความเร็วสูง (V₂) สมมุติว่า ทางเข้าและทางออกอยู่ระดับเดียวกัน และ ไม่มีการสูญเสียพลังงานภายในกังหัน สมการสมดุลพลังงานของการไหลผ่านกังหันคือ

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + E$$
(10.4)

งานในอุดมคติที่ได้จากกังหันน้ำจึงมีค่าดังนี้

$$E = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \left(V_1^2 - V_2^2 \right)$$
(10.5)

ประสิทธิภาพของกังหันคำนวณจาก

$$\eta_t = \frac{E_{act}}{E} \tag{10.6}$$

โดยที่ Eact คือ งานที่ได้จากกังหันจริง

10.4.1 ประเภทของกังหันน้ำ

สมการ (10.5) แสดงให้เห็นว่า งานที่ได้จากกังหันน้ำมาจากสองส่วนคือ ผลต่างความดัน และ ผลต่างพลังงานจลน์ ระดับปฏิกิริยา (reaction degree) ของกังหันคือ อัตราส่วนของงานส่วนแรกต่อ งานรวม

$$R = \frac{(p_1 - p_2)/\rho}{E}$$
(10.7)



รูปที่ 10.3: สมดุลพลังงานในกังหันน้ำ

ค่า R เป็นตัวกำหนดประเภทของกังหันน้ำ กังหันแรงดล (impulse turbine) มีค่า R เท่ากับศูนย์ กังหัน แรงปฏิกิริยา (reaction turbine) มีค่า R มากกว่าศูนย์

กั้งหันแรงดลผลิตงานพลังงานจลน์ของน้ำ น้ำที่ไหลเข้ากังหันแรงดลมีความดันบรรยากาศและ ความเร็วสูง น้ำที่ไหลออกมีความเร็วต่ำ กังหันแรงดลที่สำคัญคือ กังหันเพลตัน (Pelton turbine) รูป ที่ 10.4 แสดงลักษณะทั่วไปของกังหันเพลตัน กังหันเป็นวงล้อขนาดใหญ่ซึ่งประกอบยึดติดอยู่กับ เพลาที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามเส้นรอบวงกังหันมีใบพัดรูปถ้วย (bucket) หลายใบ ลำน้ำจาก ท่อส่งน้ำไหลมายังหัวฉีด (nozzle) และพุ่งออกไปปะทะใบพัดทำให้เกิดแรงกระทำต่อใบพัดซึ่งทำให้ กังหันหมุนได้ จำนวนหัวฉีดมักมีมากกว่าหนึ่งแต่ก็มีจำนวนไม่มากเพราะลำน้ำที่พุ่งออกจากหัวฉีด หนึ่งจะปะทะกับลำน้ำจากอีกหัวฉีดถ้าอยู่ใกล้กันเกินไป หัวฉีดจะวางอยู่ใกล้ตัวกังหันเพื่อให้ลดการก ระจายของน้ำให้น้อยที่สุด วาล์วเข็มฉีด (needle valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ออก จากหัวฉีด อย่างไรก็ตามการปิดวาล์วอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดคลื่นกระแทกในท่อส่งน้ำ การหยุด การทำงานของกังหันอย่างกระทันหันจึงไม่ใช้วาล์วเข็มฉีดเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ดีเฟล็กเตอร์ (deflector) เบนลำน้ำไปทิศทางอื่น แล้วจึงค่อย ๆ ปิดวาล์ว ก่อนที่จะนำดีเฟล็กเตอร์กลับสู่ตำแหน่ง เดิม



รูปที่ 10.4: กังหันเพลตัน

ใบพัดของกังหันเพลตันถูกออกแบบให้มีสันตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 10.5 น้ำจากหัวฉีดจะพุ่ง ตรงไปที่สันใบพัดและไหลออกไปทางซ้ายและขวาเท่า ๆ กัน ผิวด้านในที่รับน้ำของใบพัดเป็นรูป เว้าโค้งในลักษณะที่ทำให้น้ำที่มาปะทะไหลกลับทิศทาง พลังงานจลน์ในน้ำจะถ่ายเทให้ใบพัดในรูป ของพลังงานกลจากการหมุนของวงล้อ ถ้าการถ่ายเทพลังงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์และ $\theta = 180^{\circ}$ ความเร็วของน้ำเมื่อวกกลับจะลดลงเป็นศูนย์ ($V_2 = 0$) ซึ่งหมายความว่าไม่มีพลังงานจลน์หลงเหลือ ในน้ำที่ไหลออก และการแปลงพลังงานจลน์ของน้ำเป็นพลังงานกลของกังหันเป็นไปอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม มุม 180° ทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติคือ ลำน้ำออกจะปะทะกับลำน้ำเข้า ดังนั้น ใบพัดจึงถูกออกแบบให้ θ มีค่าประมาณ 170° เท่านั้น ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพสูงสุดของกังหัน เพลตันจะน้อยกว่า 1 เนื่องจากน้ำที่ไหลออกยังคงมีพลังงานจลน์หลงเหลืออยู่ ($V_2 > 0$)



รูปที่ 10.5: ใบพัดของกังหันเพลตัน

การที่ลำน้ำจากหัวฉีดพุ่งชนใบพัดอย่างรุนแรงต่อเนื่องเช่นนี้จะทำให้เกิดความเค้นสูงในโลหะที่ ใช้เป็นวัสดุใบพัด ในขณะเดียวกันใบพัดเองก็จะมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่พยายามแยกใบพัดออก จากวงล้อและแกนเพลา ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ทำใบพัดจึงต้องเป็นวัสดุอย่างดีที่ทนต่อการสึกกร่อน นอกจากนี้ผิวด้านที่สัมผัสกับน้ำของใบพัดควรเรียบที่สุดเพื่อลดความเสียดทานในขณะที่น้ำไหลวก กลับ

กังหันแรงปฏิกิริยาผลิตงานจากผลต่างความดันและพลังงานจลน์ของน้ำ ดังนั้นน้ำที่ไหลเข้า กังหันจึงต้องเป็นน้ำที่มีความดันสูง กังหันจมน้ำอยู่ในโครงหุ้ม (casing) สิ่งนี้เป็นข้อแตกต่างที่สำคัญ ระหว่างกังหันแรงปฏิกิริยากับกังหันแรงดล กังหันแรงปฏิกิริยาที่สำคัญคือ กังหันฟรานซิส (Francis turbine) และกังหันคาปลาน (Kaplan turbine)

รูปที่ 10.6 แสดงลักษณะของกังหันฟรานซิส เห็นได้ว่า กังหันฟรานซิสจมอยู่ในน้ำขณะทำงาน และอยู่ในเปลือกหุ้ม ในทางตรงข้ามกังหันเพลตันไม่จมน้ำและไม่มีอะไรหุ้ม ส่วนประกอบสำคัญของ กังหันฟรานซิสคือ (1) โครงหุ้มที่สามารถทนความดันสูง (2) ใบพัดนำ (guide vane) หรือประตูน้ำ เข้า (wicket gate) ซึ่งทำหน้าที่เหมือนวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ใบพัดหมุน นอกจาก นี้หน้าที่อีกประการหนึ่งของใบพัดนำคือ การปรับทิศทางการไหลของน้ำให้เข้าปะทะใบพัดหมุนที่ มุมที่เหมาะสม (3) ใบพัดหมุน (runner blade) ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของ น้ำเป็นพลังงานกลจากการหมุน น้ำความดันสูงจะไหลเข้าใบพัดหมุนตามแนวรัศมีรอบวงแหวนของ 10.4. กังหันน้ำ



้ใบพัดหมุน หลังจากนั้นน้ำที่ออกจากใบพัดหมุนจะเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นไหลออกตามแนวแกน

รูปที่ 10.6: กังหันฟรานซิส

กังหันคาปลานมีส่วนประกอบหลักคล้ายกังหันฟรานซิส แต่มีการออกแบบที่แตกต่างกัน ใบพัด หมุนของกังหันคาปลานมีลักษณะคล้ายใบจักร (propeller) ของเรือเดินสมุทรและมีจำนวนเพียง 4 ถึง 8 ใบพัดซึ่งน้อยกว่าจำนวนใบพัดหมุนของกังหันฟรานซิสที่เรียงตัวอยู่รอบล้อหมุน รูปที่ 10.7 แสดงลักษณะของกังหันคาปลาน ใบพัดหมุนปรับมุมได้โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ (servo-motor) น้ำ ที่ไหลเข้ากังหันตามแนวรัศมีจะผ่านใบพัดนำก่อนเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นการไหลตามแนวแกน และไหลผ่านใบพัดหมุนของกังหัน การไหลเช่นนี้แตกต่างจากการไหลในกังหันฟรานซิสซึ่งน้ำจะไหล เข้าตามแนวรัศมีล้วจึงไหลออกตามแนวแกนหมุน



รูปที่ 10.7: กังหันคาปลาน

สิ่งหนึ่งที่ปรากฏในรูปที่ 10.6 และ 10.7 คือ อุโมงค์ท้ายน้ำ (draft tube) ซึ่งไม่ใช่ส่วนประกอบ ของกังหันน้ำ แต่มักพบว่ามีการติดตั้งอุโมงค์ท้ายน้ำที่ทางออกของกังหันแรงปฏิกิริยา ประโยชน์ของ อุโมงค์ท้ายน้ำคือ เพิ่มงานที่ได้จากกังหันแรงปฏิกิริยา สมการ (10.5) แสดงให้เห็นว่าถ้ากำหนดให้ p₁ และ V_1 มีค่าคงที่ E จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ p_2 และ V_2 มีค่าลดลงโดยจะมีค่าสูงสุด

$$E_{max} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 \tag{10.8}$$

เมื่อ $p_2 = 0$ และ $V_2 = 0$ ในกรณีที่น้ำถูกปล่อยจากกังหันน้ำสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง p_2 จะเท่ากับความ ดันบรรยากาศ นอกจากนี้ด้วยข้อจำกัดบางประการ V_2 ของกังหันแรงดลและกังหันแรงปฏิกิริยาจะมี ค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้น E จะมีค่าน้อยกว่า E_{max} ข้อจำกัดนี้ไม่สามารถแก้ไขได้ในกรณีของกังหัน แรงดล แต่สำหรับกังหันแรงปฏิกิริยา มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่ม E ให้มีค่าใกล้เคียงกับ E_{max} โดยใช้ อุโมงค์ท้ายน้ำ รายละเอียดเพิ่มเติมจะกล่าวถึงในหัวข้อ 10.5

10.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหัน

กังหันทั้งสามแบบมีคุณลักษณะต่างกันและเหมาะกับสภาวะการใช้งานที่ต่างกัน เครื่องกังหัน น้ำถูกเลือกใช้ตามสภาวะการใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิ ภาพของกังหันน้ำได้แก่ ระดับน้ำหรือเฮด (head) ของแหล่งน้ำ ความเร็วจำเพาะ (specific speed) และภาระของกังหัน

- กังหันคาปลานเหมาะกับเฮดต่ำ (น้อยกว่า 60 m) กังหันฟรานซิสเหมาะกับเฮดปานกลาง (60-350 m) และกังหันเพลตันเหมาะกับเฮดสูง (มากกว่า 350 m) อย่างไรก็ตามในบางช่วง ของเฮดอาจมีกังหันที่เหมาะสมมากกว่าหนึ่งแบบ ซึ่งต้องใช้ปัจจัยอื่นประกอบการเลือกกังหัน
- ประสิทธิภาพของกังหันน้ำขึ้นกับเฮด (H) กำลังงาน (P) และความเร็วรอบ (N) ตัวแปรเหล่า นี้รวมกันเป็นตัวแปรที่เรียกว่า ความเร็วจำเพาะ

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}\tag{10.9}$$

โดยที่ N มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) P มีหน่วยเป็น kW และ H มีหน่วยเป็น m ช่วง ความเร็วจำเพาะของกังหันน้ำอยู่ระหว่าง 4 ถึง 1100 กังหันแต่ละแบบเหมาะกับการใช้งานใน ช่วงความเร็วจำเพาะที่ต่างกัน ความเร็วจำเพาะที่สูงหมายถึงขนาดเครื่องกังหัน เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า และห้องเครื่องที่เล็ก ดังนั้นตามปกติกังหันที่เลือกใช้ควรทำงานได้ดีที่ความเร็วจำเพาะ สูง รูปที่ 10.8 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของกังหันขึ้นกับความเร็วจำเพาะ โดยกังหันเพล-ตันเหมาะกับความเร็วจำเพาะต่ำ กังหันฟรานซิสเหมาะกับความเร็วจำเพาะปานกลาง และ กังหันคาปลานเหมาะกับความเร็วจำเพาะสูง

 โรงไฟฟ้าพลังน้ำอาจถูกใช้งานเป็นโรงไฟฟ้าภาระสูงสุดซึ่งหมายความว่า กังหันจะทำงานที่ ภาระต่ำกว่า 100% ผลกระทบของภาระต่อประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่ไม่อาจมองข้ามได้ใน การพิจารณาเปรียบเทียบกังหัน รูปที่ 10.9 แสดงผลของการเปลี่ยนภาระของกังหันที่มีต่อ ประสิทธิภาพ กังหันคาปลานมีประสิทธิภาพสูงในช่วงภาระที่กว้าง กังหันเพลตันทำงานได้ ดีในช่วงภาระที่แคบกว่า ใบจักร (propeller) ในรูปนี้หมายถึงใบพัดที่ปรับมุมไม่ได้ (fixedblade) ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากังหันหลักทั้งสามแบบ

204



รูปที่ 10.8: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของกังหันสามประเภทตามความเร็วจำเพาะ



รูปที่ 10.9: การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพกังหันตามภาระ

10.4.3 ระบบควบคุมเครื่องกังหัน

เครื่องกังหันน้ำที่ปราศจากการควบคุมจะมีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเมื่อภาระลดลงจนความเร็ว รอบอาจเพิ่มขึ้นถึงความเร็วสูงสุด (runaway speed) ซึ่งอาจทำให้เครื่องกังหันเสียหายได้ ในทาง ตรงข้ามภาระที่สูงขึ้นจะลดความเร็วรอบของเครื่องกังหัน รูปที่ 10.10 แสดงระบบควบคุมเครื่อง กังหัน (turbine governing system) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกังหันให้คงที่เมื่อ ภาระเปลี่ยนโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ ตัวควบคุมของระบบเรียกว่า กัฟเวอร์เนอร์ความเร็ว (speed governor) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบไฟฟ้าไฮดรอลิก (electro-hydraulic governor) สัญญาณ ไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ความเร็ว (speed sensor) ซึ่งวัดความเร็วรอบของกังหันจะถูกส่งไปกัฟเวอร์เนอร์ ถ้าความเร็วที่วัดได้นี้แตกต่างกับความเร็วของจุดปรับตั้ง กัฟเวอร์เนอร์จะส่งสัญญาณไฮดรอลิกไปที่ อุปกรณ์ควบคุม (actuator) ซึ่งจะขยายสัญญาณไฮดรอลิกที่ส่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ให้ปรับตำแหน่ง ของวาล์วเข็มฉีด (สำหรับกังหันเพลตัน) หรือใบพัดนำ (สำหรับกังหันฟรานซิสและกังหันคาปลาน) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าใบพัดหมุน (runner) ระบบนี้สามารถควบคุมความเร็วรอบอย่าง แม่นยำและมีการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตำแหน่งของวาล์วเข็มฉีดหรือใบพัดนำเพื่อความมี เสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 10.10: ระบบควบคุมเครื่องกังหัน

10.5 อุโมงค์ท้ายน้ำ

อุโมงค์ท้ายน้ำคือ ท่อขนาดใหญ่ซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหลังจากที่น้ำผ่านออกมาจากกังหันเพื่อนำ น้ำออกจากโรงไฟฟ้า ท่อนี้อาจทำเป็นท่อทรงกรวยตรงหรือเป็นข้องอฝังอยู่ที่คอนกรีตก็ได้ สมการ (10.5) แสดงให้เห็นว่า E จะน้อยกว่า E_{max} ในสมการ (10.8) ถ้าน้ำถูกปล่อยออกจากกังหันไฮ-ดรอลิกสู่บรรยากาศเพราะ p₂ เท่ากับศูนย์ แต่ V₂ มากกว่าศูนย์ การปรับปรุงให้กังหันแรงปฏิกิริยามี สมรรถนะสูงสามารถกระทำได้โดยการติดตั้งอุโมงค์ท้ายน้ำตรงทางออกของกังหัน รูปที่ 10.11 แสดง การติดตั้งอุโมงค์ท้ายน้ำที่มีความสูง z ด้านล่างของกังหันแรงปฏิกิริยา กำหนดให้ 1 คือ น้ำที่ไหลเข้า เครื่องกังหัน 2 คือ ตำแหน่งของน้ำที่ไหลออกจากกังหันเข้าสู่อุโมงค์ท้ายน้ำ และ 3 คือ ตำแหน่งของ น้ำที่ไหลออกจากอุโมงค์ท้ายน้ำ สมมุติว่าไม่มีความดันสูญเสียในการไหลภายในอุโมงค์ท้ายน้ำและ ความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากอุโมงค์ท้ายน้ำเท่ากับศูนย์ สมดุลพลังงานระหว่าง 1 กับ 3 นำไปสู่งาน ในอุดมคติที่ได้จากกังหัน

$$E = \frac{p_1 - p_3}{\rho} + \frac{1}{2} \left(V_1^2 - V_3^2 \right) \tag{10.10}$$

น้ำที่ออกจากอุโมงค์ท้ายน้ำมีความดันบรรยากาศ ดังนั้น $p_3 = 0$ นอกจากนี้การออกแบบอุโมงค์ท้าย น้ำอย่างเหมาะสมทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากมีค่าน้อย ($V_3 \approx 0$) ดังนั้น E จะมีค่าใกล้เคียง E_{max} โปรดสังเกตว่า E ไม่ขึ้นกับ z ดังนั้นกังหันสามารถติดตั้งสูงจากระดับพื้นดินเท่าไรก็ได้เพื่อ ความสะดวกในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาโดยไม่ส่งผลต่องานของกังหัน


รูปที่ 10.11: การไหลในอุโมงค์ท้ายน้ำ

การพิจารณาสมดุลพลังงานระหว่าง 2 กับ 3 ให้สมการต่อไปนี้

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz = \frac{V_3^2}{2}$$

$$p_2 = -\left[\rho gz + \frac{1}{2}\rho \left(V_2^2 - V_3^2\right)\right]$$
(10.11)

สมการ (10.11) แสดงให้เห็นว่า p_2 มีค่าน้อยกว่าศูนย์เพราะ z มากกว่าศูนย์และ V₂ มากกว่า V₃ การ ออกแบบอุโมงค์ท้ายน้ำเพื่อให้ E มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ p_2 มีความเป็นสุญญากาศมากขึ้น p_2 ไม่ อาจมีค่าน้อยเกินไปได้เพราะจะทำให้เกิดโพรงในของเหลว (cavitation)

น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอเมื่อความดันของน้ำลดลงถึงความดันไอ (vapor pressure) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ การทำให้น้ำเดือดอาจแบ่งสองวิธี วิธีแรกคือ เพิ่มอุณหภูมิแต่ไม่เปลี่ยนความ ดัน น้ำที่ความดันบรรยากาศ (101.3 kPa) เดือดที่อุณหภูมิ 100°C เนื่องจากความดันไอที่อุณหภูมิ นี้เท่ากับความดันบรรยากาศ วิธีที่สองคือ ลดความดันแต่ไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ สมมุติว่าน้ำมีอุณหภูมิ 27°C ถ้าลดความดันของน้ำจากความดันบรรยากาศไปที่ 3.54 kPa น้ำก็จะเดือดเนื่องจากความดัน มีคือความดันไอที่อุณหภูมิ 27°C โพรงในของเหลวเกิดจากการที่ความดันของน้ำน้อยมากจนเกิด ฟองไอเกาะที่ผิวของของแข็งซึ่งอาจเป็นใบพัดของกังหันน้ำ แต่เมื่อใบพัดเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ ความดันมากกว่าความดันไอ ฟองจะยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความดันสูง ณ จุดที่ฟองยุบตัว ซึ่งอาจสูงถึง 7000 atm ปรากฏการณ์นี้เป็นตัวกัดกร่อนโลหะของกังหัน อีกทั้งยังทำให้เกิดเสียงดัง และการสั่นสะเทือน นอกจากนี้ฟองไอที่หลุดจากผิวใบพัดก็จะไปขัดขวางการไหลของน้ำและทำให้ อัตราการไหลของน้ำต่ำกว่าที่ควรจะเป็นซึ่งส่งผลให้กำลังงานที่ผลิตโดยกังหันน้อยลง ดังนั้นโพรงใน ของเหลวจึงเป็นสิ่งที่ควรบ้องกันไม่ให้เกิดขึ้นในกังหันน้ำ

จุดที่ความดันต่ำที่สุดในกังหันน้ำคือ ทางออกจากกังหัน กังหันแรงดลไม่มีปัญหาการเกิดโพรง ในของเหลวเพราะความดันทางออกมีค่าใกล้เคียงกับความดันทางเข้า แต่กังหันแรงปฏิกิริยาที่มีการ ติดตั้งอุโมงค์ท้ายน้ำมีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาโพรงในของเหลวได้เนื่องจาก p₂ อาจมีค่าน้อยกว่า p_v – p_{atm} โดย p_v คือ ความดันไอ และ p_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ สมการ (10.11) แสดงให้เห็น ว่า ถ้าต้องการให้ p₂ มีค่ามากเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโพรงในของเหลว กังหันแรงปฏิกิริยาจะต้องอยู่ ที่ระดับที่ไม่สูงมากนักจากระดับพื้นดินและความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากอุโมงค์ท้ายน้ำต้องไม่น้อย เกินไป

10.6 โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ

โดยทั่วไปการสะสมพลังงานไฟฟ้าโดยโรงไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยมเพราะมีต้นทุนสูง แต่การสะสม พลังงานมีข้อดีที่ทำให้การใช้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น โรงไฟฟ้าภาระหลักที่เดินเครื่องไม่เต็มที่ ในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำเป็นสาเหตุที่ทำให้แฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าต่ำ ถ้าโรงไฟฟ้า สามารถเดินเครื่องมากขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวก็จะเพิ่มแฟกเตอร์ความสามารถและลดต้นทุนการ ผลิตไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสะสมไว้ในรูปอื่นและนำมาใช้ในช่วงเวลาที่ระบบมีความต้องการไฟฟ้า สูง การสะสมพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานศักย์ของน้ำในที่สูงอาจมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ซึ่ง เป็นเหตุผลหนึ่งที่มีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับหลายแห่งในโลกรวมทั้งในประเทศไทย

โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับมีลักษณะทั่วไปคล้ายโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำดังแสดง ในรูปที่ 10.12 ส่วนประกอบที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือ อ่างเก็บน้ำหลังจากน้ำไหลออกจากกังหันน้ำ โรง ไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับอาจมีระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งมีเครื่องกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแยกจาก ระบบสูบน้ำซึ่งมีเครื่องสูบและมอเตอร์สำหรับการสูบน้ำจากอ่างเก็บน้ำด้านล่างไปอ่างเก็บน้ำด้าน บน ระบบผลิตไฟฟ้าและระบบสูบน้ำต่างก็มีประสิทธิภาพไม่ถึง 100% ซึ่งหมายความว่ามีการสูญ เสียพลังงานในระบบทั้งสองและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับจะไม่เพียง พอกับการสูบน้ำ โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับจึงไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวมันเองแต่ต้องอาศัย พลังงานจากโรงไฟฟ้าอื่น

รูปที่ 10.12 แสดงให้เห็นว่าถ้าเครื่องกังหันทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบได้และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ได้ระบบผลิตไฟฟ้าและระบบสูบน้ำก็จะรวมเป็นระบบเดียวซึ่งใช้ท่อร่วมกัน และทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าลดลงอย่างมากเนื่องจากมีอุปกรณ์น้อยลงและใช้ท่อ น้อยลง อุปกรณ์ที่เป็นได้ทั้งเครื่องกังหันและเครื่องสูบเรียกว่าเครื่องสูบผสมเครื่องกังหัน (pumpturbine) ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์เรียกว่ามอเตอร์ผสมเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า (motor-generator)

เครื่องสูบผสมเครื่องกังหันมีลักษณะคล้ายกังหันฟรานซิสแต่ใบพัดคล้ายใบพัดของเครื่องสูบ แบบหอยโข่ง (centrifugal pump) จากการที่อุปกรณ์นี้เป็นการผสมผสานระหว่างเครื่องกังหันและ เครื่องสูบ ประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์จึงน้อยกว่าประสิทธิภาพของเครื่องกังหันและเครื่องสูบ ซึ่ง นอกจากนี้ความเร็วรอบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดขณะผลิตไฟฟ้ายังน้อยกว่าความเร็วรอบที่ให้ ประสิทธิภาพสูงสุดขณะสูบน้ำ ความเร็วรอบที่เลือกใช้จึงอาจอยู่ระหว่างความเร็วรอบสองค่านี้ แต่ ถ้าใช้มอเตอร์ผสมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานได้ที่สองความเร็วรอบก็จะแก้ปัญหานี้ได้ กล่าวคือ เมื่อ ต้องการสูบน้ำขึ้น เครื่องสูบและมอเตอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบอีกค่าหนึ่ง และเมื่อต้องการผลิตไฟฟ้า เครื่องกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานที่ความเร็วรอบอีกค่าหนึ่ง

ตัวอย่างของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับในประเทศไทยคือ โรงไฟฟ้าเขื่อนลำตะคอง จังหวัด นครราชสีมา อ่างเก็บน้ำตอนบนเป็นอ่างเก็บน้ำที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้หินถมลาดด้วยยางมะตอยเพื่อ



รูปที่ 10.12: โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ

ป้องกันน้ำซึมออกจากอ่าง อ่างเก็บน้ำตอนล่างคือ อ่างเก็บน้ำลำตะคองที่มีอยู่แล้ว เฮดอยู่ระหว่าง 620 ถึง 660 m โรงไฟฟ้าตั้งอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 350 m ภายในโรงไฟฟ้าติดตั้งเครื่องสูบผสม เครื่องกังหันและมอเตอร์ผสมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 250 MW รวม 4 เครื่อง

คำถามท้ายบท

- 1. ระบุข้อดีของโรงไฟฟ้าพลังน้ำมาสามข้อ
- 2. ส่วนประกอบใดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแปลงพลังงานศักย์ของน้ำเป็นพลังงานจลน์
- โรงไฟฟ้าพลังน้ำแห่งหนึ่งได้รับน้ำจากระดับความสูง 100 m ถ้าน้ำไหลผ่านเครื่องกังหันน้ำ ด้วยอัตราการไหล 3.6 × 10⁵ kg/h อยากทราบว่าโรงไฟฟ้าแห่งนี้จะผลิตไฟฟ้าได้ไม่เกินเท่าไร
- 4. เชื่อนส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นเชื่อนแบบใด
- 5. เขื่อนเขื่อนสิริกิติ์เป็นเขื่อนประเภทใด
- 6. เขื่อนใดในประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด
- 7. อุปกรณ์ใดทำหน้าที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างกระทันหันในท่อส่งน้ำ
- 8. สภาวะคลื่นกระแทกหมายถึงอะไร
- 9. ระบุข้อแตกต่างระหว่างกังหันแรงดลและกังหันแรงปฏิกิริยา
- 10. ใบพัดของกังหันเพลตันมีลักษณะอย่างไร
- 11. ดีเฟลกเตอร์ทำหน้าที่อะไรในกังหันเพลตัน
- 12. อธิบายความแตกต่างระหว่างกังหันฟรานซิสกับกังหันคาปลาน
- 13. อุปกรณ์ใดทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้ากังหันฟรานซิส
- 14. กังหันแบบใดเหมาะกับการทำงานที่เฮดต่ำกว่า 60 m
- 15. ทำไมกังหันคาปลานจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าใบจักร
- 16. สภาวะโพรงในของเหลวส่งผลเสียอย่างไร
- จุดใดในโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่ใช้กังหันแรงปฏิกิริยามีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะโพรงในของ เหลวมากที่สุด
- 18. อุโมงค์ท้ายน้ำทำหน้าที่อะไร
- 19. เครื่องสูบผสมเครื่องกังหันที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับมีลักษณะคล้ายกังหันแบบใด
- 20. จงยกตัวอย่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับในประเทศไทยมาหนึ่งแห่ง

บทที่ 11

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

11.1 สัญลักษณ์นิวเคลียร์และไอโซโทป

อะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากและประจุบวก และอิเล็กตรอนซึ่งมี ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและประจุลบ อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส (nucleus) ที่อยู่นิ่ง ตัวนิวเคลียส เองประกอบด้วยนิวตรอนและโปรตอนซึ่งเรียกโดยรวมว่า นิวคลีออน (nucleon) นิวตรอนไม่มีประจุ ประจุของโปรตอนมีขนาดเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนแต่เป็นบวก จำนวนโปรตอนในอะตอมเท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้อะตอมมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า มวลนิวตรอน (m_n) คือ 1.008665 amu มวลโปรตอน (m_p) คือ 1.007277 amu และมวลอิเล็กตรอน (m_e) คือ 0.0005486 amu โดย amu ย่อมาจาก atomic mass unit มีค่าเท่ากับ 1.66 × 10⁻²⁷ kg โดยประมาณ ดังนั้นมวลเกือบ ทั้งหมดของอะตอมคือมวลของนิวเคลียสเพราะมวลของอิเล็กตรอนน้อยกว่ามวลของนิวตรอนและ โปรตอนมาก

ธาตุต่างชนิดกันมีจำนวนโปรตอนต่างกัน ตัวอย่างเช่น H มีโปรตอน 1 ตัว He มีโปรตอน 2 ตัว และ C มีโปรตอน 12 ตัว จำนวนของโปรตอนเรียกว่าเลขอะตอม (atomic number หรือ Z) จำนวน ของนิวคลีออนเรียกว่าเลขมวล (mass number หรือ A) ดังนั้นจำนวนนิวตรอนจึงเท่ากับผลต่าง ระหว่างเลขมวลกับเลขอะตอม (A – Z) สัญลักษณ์นิวเคลียร์ (nuclear symbol) คือ ^A/_Z โดยที่ X เป็นสัญลักษณ์ของธาตุ ตัวอย่างเช่น ¹/₁H เป็นสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของไฮโดรเจน ⁴/₂He เป็นสัญลักษณ์ นิวเคลียร์ของฮีเลียม และ ¹/₂C เป็นสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของคาร์บอน อนุภาคอื่นที่ไม่ใช่อะตอมก็มี สัญลักษณ์นิวเคลียร์เช่นกัน อิเล็กตรอนมีสัญลักษณ์ ¹/₁e อิเล็กตรอนไม่มีนิวคลีออนแต่เลขอะตอม เท่ากับ -1 หมายความว่า ประจุของอิเล็กตรอนมีสัญลักษณ์ ¹/₁e อิเล็กตรอนไม่มีนิวคลีออนแต่เลขอะตอม เก่ากับ -1 หมายความว่า ประจุของอิเล็กตรอนมีสัญลักษณ์ ¹/₁e อิเล็กตรอนไม่มีนิวคลีออนแต่เลขอะตอม อนุภาคที่ไม่มีประจุ ไม่มีโปรตอน และไม่มีนิวตรอน เช่น นิวตริโน (neutrino) สัญลักษณ์นิวเคลียร์คือ ⁰/₂ ซึ่งอาจเขียนแบบไม่มีตัวห้อยและตัวยกเป็น ¹ เพื่อความสะดวก

ธาตุทุกชนิดมีหลายไอโซโทป (isotope) โดยแต่ละไอโซโทปมีเลขอะตอมเท่ากันแต่มีเลขมวลต่าง กัน ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจน (lH) มีโปรตอน 1 ตัวแต่ไม่มีนิวตรอน ในขณะที่ดิวเทอเรียม (lH) ซึ่งเป็น ไอโซโทปของไฮโดรเจน มีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละหนึ่งตัว และทริเทียม (tritium) (3H) ซึ่งเป็นอีก ไอโซโทปของไฮโดรเจน มีโปรตอน 1 ตัวและนิวตรอน 2 ตัว สัญลักษณ์นิวเคลียร์อาจเขียนอย่างย่อว่า X-Z แต่ให้ความหมายครบถ้วนเหมือนสัญลักษณ์เต็มเนื่องจากธาตุ X มีเลขอะตอมเป็นเอกลักษณ์ ของตัวมันเองซึ่งหาดูได้จากตารางธาตุ (periodical table) ตัวอย่างของสัญลักษณ์นิวเคลียร์อาจ เขียนอย่างย่อได้แก่ He-3 ซึ่งหมายถึง 3He และ U-235 ซึ่งหมายถึง ²³⁵U อย่างไรก็ตาม สัญลักษณ์ อย่างย่อของดิวเทอเรียมและทริเทียมไม่นิยมเขียนตามหลักดังกล่าว แต่นิยมใช้ตัวอักษร D และ T ตามลำดับ

ธาตุต่าง ๆ ในธรรมชาติมีไอโซโทปหลักเพียงหนึ่งไอโซโทปซึ่งมีปริมาณในธรรมชาติมากกว่า ไอโซโทปอื่นค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น สัดส่วนโดยมวลของ U-235, U-238 และ U-234 ในยูเรเนียม ที่พบในธรรมชาติคือ 99.282%, 0.712% และ 0.006% ตามลำดับ ไอโซโทปบางตัวไม่ปรากฏใน ธรรมชาติแต่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ในห้องปฏิบัติการหรือในปฏิกิริยานิวเคลียร์ ถึงแม้ว่าไอโซโทปของ ยูเรเนียมที่พบในธรรมชาติมีเพียง 3 ไอโซโทปแต่ถ้ารวมที่สังเคราะห์ขึ้นมาแล้วมีตั้งแต่ U-227 ถึง U-240 ไอโซโทปอาจอยู่ในรูปของสารประกอบเช่น น้ำที่พบในธรรมชาติประกอบด้วย น้ำมวลเบา (H₂O) และน้ำมวลหนัก (D₂O) สัดส่วนโดยมวลของน้ำมวลหนักในน้ำธรรมชาติประมาณ 1 ส่วนใน 3200 ส่วน ซึ่งหมายความว่า ถ้านำน้ำจากแหล่งธรรมชาติมาผ่านกระบวนแยกเชิงนิวเคลียร์จะได้น้ำ มวลหนักประมาณ 0.03%

ไอโซโทปที่ต่างกันของธาตุเดียวกันมีสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่น้ำหนักต่างกัน โมเลกุลที่เกิด จากไอโซโทปที่ต่างกันของธาตุเดียวกันก็มีสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่สมบัติทางกายภาพจะแตก ต่างกัน ตัวอย่างเช่น H₂O และ D₂O มีสมบัติทางเคมีที่เหมือนกันทุกประการ แต่สิ่งที่ต่างกันคือ จุดเยือกแข็ง จุดเดือด ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจึงไม่สามารถ แยก D₂O ออกจาก H₂O ได้ การแยกนิวเคลียสของไอโซโทปที่ต่างกันของธาตุเดียวกัน หรือการแยก โมเลกุลที่ประกอบด้วยไอโซโทปต่างกันต้องใช้สมบัติทางกายภาพที่ต่างกันของไอโซโทป

11.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์

กระบวนการที่โมเลกุลสองโมเลกุลทำปฏิกิริยากันเป็นโมเลกุลใหม่เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมี ตัวอย่าง เช่น

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่าง C และ O₂ จะเห็นทั้งสองโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากการรวม ตัวกันเป็นโมเลกุลใหม่ การรวมตัวกันนี้แท้ที่จริงเป็นการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุด หรือวาเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่นิวเคลียส ดังนั้นจึงไม่มีการ เปลี่ยนแปลงของธาตุในปฏิกิริยาเคมี ผลที่ตามมาก็คือมวลของสารตั้งต้นและเท่ากับมวลของสาร ผลผลิต

ในปฏิกิริยานิวเคลียร์มีการเปลี่ยนแปลงระดับนิวเคลียส ทำให้ธาตุผลผลิตต่างจากธาตุตั้งต้น ตัวอย่างเช่น $^{A1}_{Z1}$ K ทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ $^{A2}_{Z2}$ L ได้ $^{A3}_{Z3}$ M และ $^{A4}_{Z4}$ N

$${}^{A1}_{Z1}\mathsf{K} + {}^{A2}_{Z2}\mathsf{L} \longrightarrow {}^{A3}_{Z3}\mathsf{M} + {}^{A4}_{Z4}\mathsf{N}$$

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ไม่มีการอนุรักษ์มวลเหมือนปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตามผลรวมของเลขอะตอมและ ผลรวมของเลขมวลจะไม่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังนั้นการทำสมดุลจึงใช้สมการต่อไปนี้

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$
$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

ตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตของปฏิกิริยานิวเคลียร์อาจเป็นอนุภาคอื่นที่ไม่ใช่นิวเคลียสของอะตอม

ตัวอย่าง] อยากทราบว่าธาตุ X ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ข้างล่างนี้คืออะไร

$$^{27}_{13}\text{Al} + ^{4}_{2}\text{He} \longrightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + ^{A}_{Z}\text{X}$$

วิธีทำ

$$13 + 2 = 14 + Z$$
$$Z = 1$$
$$27 + 4 = 30 + A$$
$$A = 1$$

ธาตุที่มีเลขมวล 1 และเลขอะตอม 1 คือ 1H หรือไอโซโทปหลักไฮโดรเจนนั่นเอง บางครั้งเราอาจเรียก H ว่า โปรตอนซึ่งมีสัญลักษณ์ 1p

11.3 เสถียรภาพทางนิวเคลียร์

มวลของนิวคลีออนของอะตอมหนึ่งรวมกันจะมีค่ามากกว่ามวลของอะตอมนั้น ผลต่างของมวล เรียกว่ามวลพร่อง (mass defect) ในกรณีของ 4/2 มวลพร่องมีค่าเท่ากับ

$$\Delta m = (A - Z)m_n + Z(m_p + m_e) - m_X \tag{11.1}$$

มวลพร่องนี้เทียบเท่ากับพลังงานตามกฎของไอน์สไตน์ (Einstein's law)

$$\Delta E = \Delta m c^2 \tag{11.2}$$

โดยที่ Δm มีหน่วยเป็น kg และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศซึ่งเท่ากับ 3.00×10^8 m/s โดย ประมาณ พลังงาน ΔE นี้เรียกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวเคลียสเพราะมันทำ หน้ายึดโปรตอนและนิวตรอนเข้าด้วยกัน ถ้าต้องการแยกโปรตอนและนิวตรอนของนิวเคลียสใดให้ เป็นอิสระก็ต้องให้พลังงานยึดเหนี่ยวแก่นิวเคลียสนั้นเพื่อให้มันสลายตัว เนื่องจาก 1 amu = 1.66×10^{-27} kg มวลพร่อง 1 amu จึงเทียบเท่ากับ 1.494 $\times 10^{-11}$ J หรือ 931 MeV พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนกำหนดเสถียรภาพของนิวเคลียส ในกรณีของ ½He มวลของ นิวเคลียสเท่ากับ 4.00277 amu ดังนั้น ∆m เท่ากับ 0.03037 amu ซึ่งเทียบเท่ากับ ∆E = 27.1 MeV เนื่องจาก ½He มีนิวคลีออน 4 ตัว ดังนั้นพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเท่ากับ 6.78 MeV รูปที่ 11.1 เปรียบเทียบพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสต่าง ๆ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลี-ออนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเลขมวลจนมีค่ามากสุดที่เลขมวลประมาณ 40 ก่อนที่จะลดลงอย่าง ช้า ๆ นิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสูงจะมีเสถียรภาพสูงกว่านิวเคลียสที่มีพลังงาน ยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนต่ำ ดังนั้นธาตุที่มีเลขมวลปานกลางเช่น Fe, Co และ Ni จึงมีเสถียรภาพสูง ในทางตรงข้ามธาตุที่มีเลขมวลสูง ๆ จะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนค่อนข้างต่ำ คือน้อย กว่า 7.5 MeV โดยประมาณ นิวเคลียสของธาตุเหล่านี้ต้องการพลังงานกระตุ้นเพียง 7.5 MeV เพื่อให้ นิวตรอนแยกตัวออกมา



รูปที่ 11.1: พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของธาตุต่าง ๆ

¹₁H มีพลังงานยึดเหนี่ยวเป็นศูนย์เพราะมีนิวคลีออนเพียงหนึ่งตัว ดังนั้น ¹₁H จึงอาจรวมตัวกัน เพื่อเป็น ⁴₂He ซึ่งมีเสถียรภาพมากขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า ฟิวชั่น (fusion) ฟิวชั่นทำให้มีพลังงานถูก ปลดปล่อยออกมา ซึ่งหลักการผลิตพลังงานนิวเคลียร์จาก ¹₁H พลังงานแสงอาทิตย์มีที่มาจากฟิวชั่น ในดวงอาทิตย์ แต่การทำให้เกิดฟิวชั่นบนโลกเพื่อผลิตพลังงานในปริมาณมากยังไม่ประสบความ สำเร็จ กระบวนการที่ตรงข้ามกับฟิวชั่นคือ ฟิชชั่น (fission) ซึ่งหมายถึงการแตกตัวของธาตุหนักที่มี เสถียรภาพต่ำเป็นธาตุขนาดกลางสองธาตุที่มีเสถียรภาพมากขึ้น ฟิชชั่นให้พลังงานในปริมาณมาก และสามารถควบคุมให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทุกโรงผลิตไฟฟ้าด้วยฟิชชั่น

11.4 กัมมันตภาพรังสี

โดยทั่วไปไอโซโทปหลักของธาตุเบาจะมีเสถียรภาพสูง ในขณะที่ไอโซโทปอื่นที่มีอยู่น้อยใน ธรรมชาติจะมีเสถียรภาพต่ำ นอกจากนี้ ไอโซโทปทุกตัวของธาตุหนักก็มีเสถียรภาพต่ำเช่นกัน นิว-เคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนต่ำมีสมบัติเป็นสารกัมมันตรังสี (radioactive matter) จะ แผ่กัมมันตภาพรังสีเพื่อจะได้กลายเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากขึ้น การแผ่กัมมันตภาพรังสีจะ เกิดขึ้นพร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานเนื่องจากมีมวลบางส่วนหายไป และกลายเป็นพลังงานตาม กฎของไอน์สไตน์ กัมมันตภาพรังสีที่สำคัญได้แก่

1. รังสีแกมม่า (gamma ray)

รังสีแกมม่านับเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่ำและพลังงานสูง นิวเคลียสที่อยู่ใน สภาวะถูกกระตุ้น (excited state) จะแผ่รังสีแกมม่าออกมาเพื่อกลับสู่สภาวะปกติ (ground state)

$$\begin{pmatrix} A\\Z \end{pmatrix}^* \longrightarrow \begin{pmatrix} A\\Z \end{pmatrix}^* + \gamma$$

รังสีแกมม่ามีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงสุดเนื่องจากไม่มีมวล

2. รังสีเบต้า (beta ray)

รังสีเบต้าคือ อิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง แต่ความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีเบต้าต่ำ กว่ารังสีแกมม่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทำให้เลขอะตอมของนิวเคลียสเพิ่ม 1 แต่เลขมวล ไม่เปลี่ยน รังสีเบต้ามักถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับอนุภาคนิวตริโนและรังสีแกมม่า เช่น

 $\stackrel{60}{_{27}}{\rm Co} \longrightarrow \stackrel{60}{_{28}}{\rm Ni} + \stackrel{0}{_{-1}}{\rm e} + \nu + \gamma$

กัมมันตภาพรังสีในปฏิกิริยานี้มีทั้งรังสีเบต้าและรังสีแกมม่า อนุภาคนิวตริโนไม่ทำปฏิกิริยา กับสสารใด จึงไม่จัดเป็นกัมมันตภาพรังสี

3. รังสีอัลฟา (alpha ray)

รังสีอัลฟาคือ นิวเคลียสของฮีเลียม รังสีอัลฟามักเกิดขึ้นพร้อมกับรังสีแกมม่า เช่น

 $\stackrel{239}{_{94}}{\rm Pu} \longrightarrow \stackrel{235}{_{92}}{\rm U} + \stackrel{4}{_{2}}{\rm He} + \gamma$

เนื่องจากนิวเคลียสของฮีเลียมมีขนาดใหญ่กว่าอิเล็กตรอน รังสีอัลฟาจึงมีความสามารถใน การทะลุทะลวงต่ำกว่ารังสีเบต้า

อัตราการแผ่กัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เวลานั้น แต่ไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือสถานะของสาร กำหนดให้ N(t) เป็นจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เวลา t

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \tag{11.3}$$

บทที่ 11. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

โดยที่ λ คือค่าคงที่การสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็น s $^{-1}$ ผลเฉลยของสมการ (11.3) คือ

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \tag{11.4}$$

โดยที่ N(0) เป็นจำนวนเริ่มต้นนิวเคลียสกัมมันตรังสี

อัตราการสลายตัวมักบ่งบอกด้วยครึ่งชีวิต (half-life) ของนิวเคลียสกัมมันตรังสี ครึ่งชีวิตคือ เวลา ที่ใช้ในการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสีจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น ครึ่งชีวิต สามารถคำนวณได้จากสมการ (11.4) โดยให้ $t = t_{1/2}$ ซึ่งเป็นครึ่งชีวิตและ $N(t_{1/2}) = 0.5N_0$

$$0.5N_0 = N(0)e^{\lambda t_{1/2}}$$
$$\implies t_{1/2} = \frac{0.6931}{\lambda}$$
(11.5)

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าครึ่งชีวิตเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าคงที่การสลายตัว ไอโซโทปต่างกันมีค่า λ และ t_{1/2} ต่างกัน ตารางที่ 11.1 แสดงครึ่งชีวิตของนิวเคลียสกัมมันตรังสีบางตัว กัมมันภาพรังสีที่เกิดขึ้น และพลังงานที่ได้จากแผ่กัมมันตภาพรังสี

นิวเคลียส	ครึ่งชีวิต	กัมมันตภาพรังสี่	พลังงานที่ได้ (MeV)
C-14	5715 ปี	เบต้า	0.156
N-16	7.13 วินาที	เบต้า, แกมม่า	4.24 (เบต้า), 6.129 (แกมม่า)
P-32	14.28 วัน	เบต้า	1.170
K-40	1.25 ×10 ⁹ ปี	เบต้า	1.312
Co-60	5.271 ปี	เบต้า, แกมม่า	0.315 (เบต้า), 1.332 (แกมม่า)
Sr-90	29.1 ปี	เบต้า	0.546
I-131	8.021 วัน	เบต้า, แกมม่า	0.606 (เบต้ำ), 0.364 (แกมม่า)
Xe-135	9.10 ชั่วโมง	เบต้า, แกมม่า	0.910 (เบต้า), 0.250 (แกมม่า)
Cs-137	30.2 ปี	เบต้า, แกมม่า	0.514 (เบต้า), 0.662 (แกมม่า)
Rn-222	3.823 วัน	อัลฟา, แกมม่า	5.490 (อัลฟา), 0.510 (แกมม่า)
U-235	7.40 ×10 ⁸ ปี	อ ัลฟา	4.152
U-238	4.47 ×10 ⁹ ปี	อัลฟา	4.040
Pu-239	2.41 ×10 ⁴ ปี	อัลฟา	5.055

ตารางที่ 11.1: ตัวอย่างของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

ตัวอย่าง] จงหาจำนวนนิวเคลียสของ Co-60 หลังจากเวลาผ่านไป 3 ปี ถ้าจำนวนเริ่มต้นคือ 1000 นิวเคลียส

11.5. ฟิชชั้น

ตารางที่ 11.1 แสดงให้เห็นว่า $t_{1/2}$ ของ Co-60 คือ 5.271 ปี ค่า λ ได้จากสมการ (11.5)

$$\lambda = \frac{0.6931}{t_{1/2}}$$

แทนค่า λ ในสมการ (11.4)

$$N(t) = N(0) \exp\left(\frac{-0.6931t}{t_{1/2}}\right)$$

= 1000 × exp $\left(\frac{-0.6931 \times 3}{5.271}\right)$
= 674

11.5 ฟิชชัน

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่สำคัญ ต่อการผลิต ไฟฟ้าเกิด จากการที่นิวตรอนพุ่งชนนิวเคลียสของธาตุ หนักเช่น U-235, U-238, Pu-239 และ Th-232 เป็นต้น นิวเคลียสจะแตกตัวเป็นนิวเคลียสขนาดกลาง สองตัวพร้อมกับปล่อยนิวตรอนออกมา 2 ถึง 3 ตัว ปฏิกิริยาลักษณะนี้เรียกว่า ฟิชชั่น (fission) สมการ ฟิชชั่นอาจเขียนได้ดังนี้

$${}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}$$
n $\longrightarrow {}^{A_{1}}_{Z_{1}}$ F₁ + ${}^{A_{2}}_{Z_{2}}$ F₂ + m^{1}_{0} n

โดยที่ A_Z X คือ นิวเคลียสของธาตุหนัก $^{A_1}_{Z_1}\mathsf{F}_1$ และ $^{A_2}_{Z_2}\mathsf{F}_2$ คือ นิวเคลียสของธาตุขนาดกลาง และ m คือ จำนวนของนิวตรอน

ธาตุหนักที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์คือ ²³⁵U หรือ U-235 สมการฟิชชั่นที่เกิดกับ U-235 ไม่ได้มีเพียงหนึ่งหรือสองสมการ แต่มีจำนวนมากเพราะความหลากหลายของธาตุขนาดกลางที่ เป็นผลผลิตจากฟิชชั่น ตัวอย่างสมการฟิชชั่นของ U-235 ได้แก่

$$^{235}_{92}$$
U + $^{1}_{0}$ n \longrightarrow $^{140}_{54}$ Xe + $^{94}_{38}$ Sr + $^{20}_{0}$ n¹

นิวเคลียสของธาตุขนาดกลางที่ได้จากฟิชชั่นของ U-235 มีน้ำหนักมวลอยู่ระหว่าง 75 ถึง 160 นิว-เคลียสเหล่านี้ไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นมันจะแผ่กัมมันตภาพรังสีออกมาจนกระทั่งมันกลายเป็นนิว-เคลียสที่มีเสถียรภาพในที่สุด นอกจากนี้นิวเคลียสบางตัวยังอาจปลดปล่อยนิวตรอนออกมา กระบวน การแผ่กัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสที่ได้จากฟิชชั่นเรียกโดยรวมว่า กระบวนการประวิง (delay process)

การพุ่งชน U-235 ของนิวตรอนไม่ได้ทำให้เกิดฟิชชั่นทุกครั้ง ในบางครั้งนิวตรอนจะถูกดูดกลืน โดย U-236 และกลายเป็น U-236 ซึ่งอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น

$$^{235}_{92}\mathrm{U}+~^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow~^{236}_{92}\mathrm{U}$$

นิวเคลียสที่เกิดขึ้นนี้อาจปล่อยรังสีแกมม่าออกมา แต่ U-236 เป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากโดย มีครึ่งชีวิตมากถึง 2.34 × 10⁷ ปี U-236 จึงสลายตัวอย่างช้า ๆ ไม่แตกตัวเป็นนิวเคลียสขนาดกลาง ปฏิกิริยาลักษณะนี้เกิดขึ้นประมาณ 14% ส่วนอีก 86% ของการชนทำให้เกิดฟิชชั่น

ฟิชชั้นเป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงานเนื่องจากมวลของผลผลิตน้อยกว่ามวลของตัวทำปฏิกิริยา เช่น

$$^{235}_{92}$$
U + $^{1}_{0}$ n \longrightarrow $^{137}_{56}$ Ba + $^{97}_{36}$ Kr + 2^{1}_{0} n

มีมวล ของตัวทำปฏิกิริยาเท่ากับ 235.0439 + 1.00867 = 236.0526 amu และมวล ของผลผลิต เท่ากับ 138.9061 + 96.9212 + 2(1.00867) = 235.8446 amu มวล ของผลผลิตจึงน้อยกว่ามวล ของตัวทำปฏิกิริยา 0.208 amu ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน 193.6 MeV แต่ก็มีพลังงานเพิ่มเติมที่ได้จาก กระบวนการประวิง พลังงานเพิ่มเติมหลังจากฟิชชั่นรวมกับ พลังงานที่เกิดขึ้นทันทีจากฟิชชั่นมีค่า ประมาณ 200 MeV พลังงานนี้กระจายในนิวเคลียสกัมมันตรังสีและอนุภาคต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง ที่ 11.2 พลังงานประมาณ 190 MeV จะกลายเป็นความร้อนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในที่สุด ส่วน พลังงาน 10 MeV ของนิวตริโนจะสูญเสียออกจากเตาปฏิกรณ์ นิวตริโนเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากที่มี ความสามารถทะลุทะลวงสูงมาก นิวตริโนทั้งหมดจึงออกเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยไม่ถ่ายเทพลังงาน ให้วัตถุใด

	พลังงาน (MeV)
นิวเคลียส	166
รังสีแกมม่า	14
นิวตริโน	10
รังสีเบต้า	5
นิวตรอน	5
รวม	200

ตารางที่ 11.2: การกระจายพลังงานที่ได้จากฟิชชั่นของ U-235

ตัวอย่าง จงหาปริมาณ U-235 ที่ต้องใช้ในหนึ่งวันเพื่อผลิตความร้อน 1 MW

วิธีทำ

โดยเฉลี่ยนิวเคลียส 1 ตัวของ U-235 จะเกิดฟิชชั่น 0.86 ตัวเพราะ 0.14 ตัวที่เหลือถูกดูดกลืน หายไป ดังนั้นพลังงานที่ได้จากนิวเคลียส 1 ตัวของ U-235 จึงคำนวณได้ดังนี้

$$E' = 0.86 \times 190 \times 1.60 \times 10^{-13}$$
$$= 2.61 \times 10^{-11} \text{ J}$$

11.6. ปฏิกิริยาลูกโซ่

U-235 ปริมาณ 235 g ประกอบด้วยนิวเคลียส 6.02 × 10²³ ตัว ดังนั้นพลังงานที่ได้จาก 1 g ของ U-235 จึงมีค่าดังนี้

$$E = \frac{1}{235} \times 6.02 \times 10^{23} \times E'$$

= 6.69 × 10¹⁰ J

หนึ่งวันมี 86400 วินาทีถ้าใช้ U-235 1 g ภายในหนึ่งวัน กำลังงานที่ได้จะเท่ากับ

$$P = \frac{6.69 \times 10^{10}}{86400} = 0.774 \text{ MW}$$

ดังนั้นความร้อน 1 MW จะได้จาก U-235 1.3 g ต่อวัน

11.6 ปฏิกิริยาลูกโซ่

เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์บรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ซึ่งก็คือ U-235 และวัสดุอื่น ๆ เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะได้รับการออกแบบให้สามารถผลิตพลังงานความร้อนด้วยฟิชชั่นอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์เรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) สมการฟิชชั่น แสดงให้เห็นว่า ฟิชชั่นเกิดจากนิวตรอนเพียงหนึ่งตัว แต่ผลิตนิวตรอน 2 ถึง 3 ตัว ดังนั้นดูเหมือนว่าจะ มีนิวตรอนที่ทำให้เกิดฟิชชั่นต่อเนื่องอย่างไม่สิ้นสุดได้ แต่ฟิชชั่นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีเงื่อนไขที่เหมาะ สมเท่านั้น นิวตรอนที่เกิดจากฟิชชั่นมีพลังงานมากดังแสดงในตารางที่ 11.2 พลังงานนี้ทำให้นิวตรอน มีความเร็วสูง มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ต่อไปนี้

- มีการชนกันระหว่างนิวตรอนกับ U-235 หรือนิวเคลียสอื่นหลายครั้ง แต่ไม่มีการดูดกลืน นิวตรอน และในที่สุด นิวตรอนก็จะรั่วออกจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์
- มีการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสอื่นหนึ่งครั้งหรือหลายครั้ง ในที่สุดนิวตรอนจะถูก ดูดกลืนโดยนิวเคลียส และนิวเคลียสนั้นจะกลายเป็นไอโซโทปใหม่
- มีการชนกันระหว่างนิวตรอนกับ U-235 หนึ่งครั้งหรือหลายครั้ง ในที่สุดนิวตรอนจะถูกดูดกลืน โดย U-235 จะกลายเป็น U-236
- มีการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของ U-235 หนึ่งครั้งหรือหลายครั้ง ในที่สุดนิวตรอน จะถูกดูดกลืนโดย U-235 และเกิดฟิชชั่น

็จะเห็นว่ามีโอกาสไม่มากที่จะเกิดฟิชชั่น ถ้าเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ออกแบบไม่ดีพอ ปฏิกิริยาลูกโซ่ก็ จะไม่เกิดขึ้น

เงื่อนไขที่จะเกิดฟิชชั่นคือ การดูดกลื่นนิวตรอนโดยนิวเคลียสของ U-235 หลังจากการดูดกลื่น แล้วมีโอกาสเกิดฟิชชั่นถึง 86% อย่างไรก็ตาม นิวตรอนที่จะถูกดูดกลื่นโดย U-235 ต้องเป็นนิวตรอน ที่มีความเร็วต่ำ นิวตรอนที่มีลักษณะเช่นนี้เรียกว่า นิวตรอนซ้า (slow neutron) หรือนิวตรอนสมดุล ความร้อน (thermal neutron) เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของก๊าซที่ มีอุณหภูมิเดียวกัน แต่นิวตรอนที่ผลิตโดยฟิชชั่นซึ่งเรียกว่า นิวตรอนเร็ว (fast neutron) หรือนิวตรอน พร้อม (prompt neutron) มีความเร็วสูงกว่านิวตรอนสมดุลความร้อนมาก นิวตรอนพร้อมจึงจะไม่ ถูกดูดกลืนโดย U-235 แต่จะต้องชนกับนิวเคลียสอื่นหลายครั้งก่อนที่ความเร็วของมันจะลดลงมา ใกล้เคียงกับนิวตรอนสมดุลความร้อน การชนกันของนิวตรอนกับนิวเคลียสหรืออนุภาคขนาดใหญ่จะ ทำให้นิวตรอนจะมีความเร็วลดลง

นิวตรอนส่วนใหญ่มีความเร็วสูงหลังจากฟิชชั่น ดังนั้นจึงมีความน่าจะเป็นน้อยมากที่นิวตรอน เหล่านี้จะทำให้เกิดฟิชชั่นต่อเนื่อง การเพิ่มความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่คือ การลด ความเร็วของนิวตรอน การชนกันของนิวตรอนกับนิวเคลียสหรืออนุภาคขนาดใหญ่ที่มีความเร็วต่ำ กว่าจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์และโมเมนตัม ทำให้ความเร็วของนิวตรอนลดลง ความ เร็วจะลดลงมากที่สุดถ้าเป็นการชนตรง ๆ อัตราส่วนระหว่างพลังงานจลน์นิวตรอนหลังการชน (E_{n2}) และก่อนการชน (E_{n1}) กับนิวเคลียสที่มีเลขมวล A คำนวณได้จากหลักการอนุรักษ์พลังงานและ โมเมนตัม ผลที่ได้คือ

$$\frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$$
(11.6)

สมการนี้บอกว่าความเร็วของนิวตรอนจะลดลงเพียงเล็กน้อยในการชนกับนิวเคลียสหนัก แต่จะลด ลงมากในการชนกับนิวเคลียสเบา นิวตรอนจะเสียพลังงานไม่เกิน 2% ในการชนกับนิวเคลียสของ U-238 แต่จะเสียพลังงานไม่เกิน 28% ในการชนกับนิวเคลียสของ C-12 ดังนั้นวัสดุที่ทำหน้าที่ลด ความเร็วของนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์จึงควรทำจากธาตุเบา อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่ ต้องพิจารณาในการวัสดุที่เหมาะสม ปัจจัยที่สำคัญคือ การดูดกลืนนิวตรอนโดยวัสดุนั้นซึ่งควรมีค่า ต่ำเนื่องจากถ้าวัสดุนั้นดูดกลืนนิวตรอนไปมากก็จะมีนิวตรอนเหลือน้อยลงที่จะทำให้เกิดฟิชชั่นและ ปฏิกิริยาลูกโซ่ก็จะเกิดยากขึ้น

11.7 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ส่วนประกอบสำคัญสื่อย่างของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์คือ (1) แกนเชื้อเพลิง (fuel core) (2) สาร หล่อเย็น (coolant) (3) โมเดอเรเตอร์ (moderator) (4) แท่งควบคุม (control rod) และ (5) เปลือก เตาปฏิกรณ์ (reactor vessel)

 แกนเซื้อเพลิงมีเซื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นองค์ประกอบหลัก เชื้อเพลิงอาจเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ หรือยูเรเนียม เสริม สมรรถนะ ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น ยูเรเนียม ได ออกไซด์ (UO₂) หรือยูเรเนียมคาร์ไบด์ (UC) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์มักทำเป็นแท่งห่อหุ้มด้วยวัสดุเคลือบ (cladding material) ซึ่งอาจทำจาก AI, Mg, Zr, เหล็กกล้าหรือกราไฟต์ วัสดุเคลือบ ต้องทำให้ เชื้อ เพลิงคงรูปอยู่ได้ภายใต้ทุกสถานการณ์ แท่งเชื้อ เพลิงมีอายุใช้งานประมาณ 3 ปี แต่ การเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงมักกระทำทุกปีโดยนำแท่งเชื้อเพลิงจำนวนหนึ่งในสามออกไป และ

แทนที่ด้วยแท่งเชื้อเพลิงใหม่ เตาปฏิกรณ์บางแบบอาจออกแบบให้เปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงได้ ในขณะที่เตาปฏิกรณ์กำลังทำงาน แต่ในเตาปฏิกรณ์ส่วนใหญ่การเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงต้อง กระทำเมื่อเตาปฏิกรณ์หยุดทำงานแล้ว

- สารหล่อเย็นทำหน้าที่ระบายความร้อนที่เกิดจากฟิชชั่นและกระบวนการประวิงในแกนเชื้อ เพลิง คุณสมบัติของสารหล่อเย็นคือ มีความจุความร้อนสูง นำความร้อนดี มีความหนืดต่ำ ราคาไม่แพง และมีเสถียรภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมในเตาปฏิกรณ์ ตัวอย่างของสารหล่อ เย็นที่นิยมใช้คือ น้ำ น้ำมวลหนัก อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซฮีเลียม
- โมเดอเรเตอร์ทำหน้าที่ลดความเร็วของนิวตรอนที่ได้จากฟิซชั่น โมเดอเรเตอร์ควรมีเลขมวล ต่ำเพื่อลดความเร็วของนิวตรอนอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้โมเดอเรเตอร์ควรมีความสามารถใน การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ ตัวอย่างของโมเดอเรเตอร์ได้แก่ น้ำ น้ำมวลหนัก และกราไฟต์ เป็นที่ น่าสังเกตว่าน้ำและน้ำมวลหนักเป็นได้ทั้งสารหล่อเย็นและโมเดอเรเตอร์
- แท่งควบคุมมีลักษณะเป็นแท่งยาวที่ทำด้วยสารประกอบของโบรอนหรือแคดเมียม ธาตุเหล่า นี้ดูดกลื่นนิวตรอนได้ดี แท่งควบคุมทำหน้าที่ควบคุมจำนวนนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์ไม่ให้ มีมากจนมีฟิชชั่นเกิดขึ้นมากเกินไป และอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์สูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้ แท่งควบคุมต่อเข้ากับกลไกที่ทำหน้าที่เหมือนลิฟต์ กลไกนี้จะสอดแท่งควบคุมเข้าไปแทรก ระหว่างแท่งเชื้อเพลิงเพื่อลดฟิชชั่นหรือดึงแท่งควบคุมออกเพื่อเพิ่มฟิชชั่น แท่งควบคุมมีสาม แบบคือ แท่งจีม (shim rod) ใช้ควบคุมความหนาแน่นนิวตรอนอย่างหยาบ ๆ แท่งบังคับ (regulating rod) ใช้ควบคุมอย่างละเอียด และแท่งนิรภัย (safety rod) ใช้ในกรณีฉุกเฉินที่ต้องการ หยุดการทำงานของเตาปฏิกรณ์ แท่งนิรภัยทำจากเหล็กโบรอน (boron steel) ซึ่งสามารถ เคลื่อนที่เข้าสู่แกนเตาปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว
- เปลือกเตาปฏิกรณ์ทำหน้าที่บรรจุแกนเตาและอุปกรณ์เสริมตัวอื่น ๆ ผนังเตาได้รับการออก แบบให้ทนความดันสูงและทนสภาวะการแผ่รังสีได้ ผนังเตาต้องมีความหนาพอสมควรเพื่อ ลดการแผ่รังสีออกสู่ภายนอก นอกจากนี้รอบ ๆ เตาต้องมีคอนกรีตหุ้มเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาค และรังสีเล็ดรอดออกมาได้ ความหนาของเปลือกคอนกรีตประมาณ 1.8 m

11.8 ประเภทของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลกมีความแตกต่างกันที่เชื้อเพลิง โมเดอเรเตอร์ สาร หล่อเย็นและคุณสมบัติอื่น ๆ เตาปฏิกรณ์ส่วนใหญ่แบ่งออกเป็นห้าแบบได้แก่ (1) เตาปฏิกรณ์แบบ น้ำความดันสูง (pressurized water reactor, PWR) (2) เตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด (boiling water reactor, BWR) (3) เตาปฏิกรณ์แบบหล่อเย็นด้วยก๊าซ (advanced gas-cooled reactor, AGR) (4) เตาปฏิกรณ์แบบน้ำมวลหนักความดันสูง (pressurized heavy water reactor, PHWR) (5) เตา ปฏิกรณ์แบบ RBMK (ย่อมาจากภาษารัสเซีย Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy ซึ่งแปลเป็น ภาษาอังกฤษว่า High Power Channel Reactor)

11.8.1 เตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง

เตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูงใช้แท่งเชื้อเพลิงประมาณ 200-300 แท่งต่อหนึ่งมัด จัดเรียงใน แนวตั้งอยู่ภายในแกนเชื้อเพลิง เตาปฏิกรณ์ขนาดใหญ่อาจมีเชื้อเพลิง 150 ถึง 250 มัดวางตัวในแนว ตั้ง มีโลหะทรงครึ่งทรงกลมครอบตอนบนซึ่งเปิดได้เพื่อเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง โมเดอเรเตอร์และสาร หล่อเย็นคือ น้ำ เชื้อเพลิงที่ใช้คือยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ เปลือกเคลือบเตาทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หรือเซอร์คาลอย (zircaloy) เปลือกเตามีความหนามากเนื่องจากน้ำมีความดันสูง รูปที่ 11.2 แสดง แผนภาพของเตาปฏิกรณ์แบบนี้



รูปที่ 11.2: เตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง

ระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้ PWR ประกอบด้วยสองวงจรน้ำทำงานควบคู่กันดังแสดงในรูปที่ 11.2 ในวงจรปฐมภูมิ (primary loop) น้ำเย็นที่มีความดันสูงจะไหลผ่านเตาปฏิกรณ์เพื่อระบายความร้อน จากเตา น้ำร้อนที่ไหลออกจากวงจรนี้จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในวงจรทุติยภูมิ (secondary loop) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน น้ำในวงจรทุติยภูมิมีความดันต่ำและจะกลายเป็นไอน้ำก่อน ไหลเข้าเครื่องกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป น้ำในวงจรปฐมภูมิมีอุณหภูมิประมาณ 325°C จึงต้องทำให้ อยู่ภายใต้ความดัน 150 เท่าของความดันบรรยากาศจึงจะไม่เดือด เครื่องให้ความดัน (pressurizer) ถูกติดตั้งในวงจรปฐมภูมิเพื่อโดยรักษาความดัน ในกรณีที่มีความผิดพลาดจนทำให้น้ำในวงจรปฐม ภูมิกลายเป็นไอจะทำให้เกิดฟิซชั่นลดลงเนื่องจากความสามารถในการเป็นโมเดอเรเตอร์ของไอน้ำ ด้อยกว่าน้ำ ดังนั้น PWR จึงมีระบบควบคุมความปลอดภัยในตัวมันเอง

ข้อเสียเปรียบของ PWR คือ อุณหภูมิสูงสุดของน้ำไม่เกินอุณหภูมิของจุดวิกฤติคือ ประมาณ 374°C ซึ่งหมายความว่าไอน้ำในวงจรทุติยภูมิก็ไม่เกิน 374°C เช่นกัน ประสิทธิภาพของวัฏจักรไอน้ำ จึงถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวัฏจักรไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน อย่างไร ก็ตามเตาปฏิกรณ์แบบนี้มีการใช้งานมากที่สุดโดยใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 230 เครื่องและใช้ใน การขับเคลื่อนเรือดำน้ำนิวเคลียร์อีกหลายร้อยเครื่อง

11.8.2 เตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด

เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือดคือ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะซึ่งประกอบด้วย U-235 ประมาณ 1.9% ถึง 2.6 % ภายในแกนเชื้อเพลิงบรรจุเชื้อเพลิงได้ 750 มัด แต่ละมัดมีแท่งเชื้อเพลิง 90 ถึง 100 แท่ง มีโลหะทรงครึ่งทรงกลมครอบตอนบนซึ่งเปิดได้เพื่อเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงรูปที่ 11.3 แสดงแผนภาพของเตาปฏิกรณ์แบบนี้ น้ำใช้เป็นทั้งโมเดอเรเตอร์และสารหล่อเย็นหมือน PWR แต่ วงจรการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้ามีเพียงวงจรเดียว น้ำที่ไหลผ่านเตาปฏิกรณ์มีความดันประมาณ 75 เท่าของความดันบรรยากาศ บางส่วนของน้ำจะกลายเป็นไอน้ำโดยมีอุณหภูมิประมาณ 285°C ใอน้ำแห้งจะถูกแยกออกจากน้ำด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ที่ตอนบนของเตาก่อนไหลเข้าสู่เครื่องกังหัน น้ำป้อนจากเครื่องควบแน่นจะผสมกับน้ำที่แยกออกจากไอน้ำ และไหลเข้าเตาปฏิกรณ์ รูปที่ 11.3 แสดงแผนภาพการทำงานของเตาปฏิกรณ์แบบนี้



รูปที่ 11.3: เตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด

ไอน้ำที่อยู่รอบ แกนเชื้อ เพลิง ของ เตาปฏิกรณ์มีการ ปนเปื้อนสาร กัมมันตรังสี ดัง นั้นอุปกรณ์ ต่าง ๆ รวมทั้งเครื่องกังหันไอน้ำจึงต้องออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานในสภาวะที่มีกัมมันตภาพรังสี นอกจากนี้จะต้องมีการรักษาความปลอดภัยจากการแผ่รังสีขณะทำการบำรุงรักษา อย่างไรก็ตาม BWR มีการออกแบบที่ซับซ้อนน้อยกว่าจึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่า PWR ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ BWR ได้รับ ความนิยมมากเป็นอันดับสองรองจาก PWR

11.8.3 เตาปฏิกรณ์แบบน้ำมวลหนักความดันสูง

PHWR มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า CANDU (Canadian Deuterium) เนื่องจากเตาปฏิกรณ์แบบนี้ออก แบบที่ประเทศแคนาดา CANDU มีหลักการทำงานคล้ายกับ PWR แต่ใช้น้ำมวลหนักเป็นโมเดอ-เรเตอร์และสารหล่อเย็นแทนน้ำในวงจรปฐมภูมิ ส่วนวงจรทุติยภูมิใช้น้ำธรรมดาเหมือนกัน น้ำมวล หนักมีสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับน้ำธรรมดา แต่สมบัติทางนิวเคลียร์ต่างกันมาก กล่าว คือน้ำมวลหนักมีความสามารถดูดกลืนนิวตรอนที่ต่ำกว่าน้ำธรรมดา ด้วยเหตุนี้เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตา ปฏิกรณ์แบบนี้เป็นยูเรเนียมธรรมดาก็ได้ ไม่จำเป็นต้องเป็นยูเรเนียมเสริมสมรรถนะเหมือนที่ใช้ใน PWR

รูปที่ 11.4 แสดงลักษณะของเตาปฏิกรณ์แบบน้ำมวลหนักความดันสูง โมเดอเรเตอร์บรรจุอยู่ ภายในถังขนาดใหญ่เรียกว่าคาแลนเดรีย (Calandria) ซึ่งมีช่องวางอยู่ในแนวนอนหลายร้อยช่อง สำหรับบรรจุเชื้อเพลิง แต่ละซ่องมีแท่งเชื้อเพลิง 12 ถึง 13 แท่ง แท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งของ CANDU มีความยาวประมาณครึ่งเมตรบรรจุในท่อเซอร์คาลอย (zircaloy) แท่งควบคุมจะถูกส่งเข้าไปใน คาแลนเดรียทางแนวดิ่ง น้ำมวลหนักความดันสูงจะไหลผ่านช่องในคาแลนเดรียเพื่อระบายความ ร้อนออกจากฟิชชั่นจนมีอุณหภูมิมากกว่า 300°C จากนั้นจึงไหลไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำใน วงจรทุติยภูมิต่อไป



รูปที่ 11.4: เตาปฏิกรณ์แบบ CANDU

CANDU มีข้อได้เปรียบจากการใช้ยูเรเนียมธรรมดาเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีราคาถูกกว่ายูเรเนียม ปรุงแต่งมากเพราะกระบวนการเสริมสมรรถนะมีราคาแพง นอกจากนี้ข้อได้เปรียบอีกหนึ่งประการ ที่สำคัญของ CANDU คือ ความสามารถเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเตา ปฏิกรณ์ การเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงใช้ระบบอัตโนมัติที่ควบคุมจากระยะไกล อย่างไรก็ตาม CANDU มี ข้อเสียตรงที่มันต้องมีขนาดใหญ่เพื่อลดการรั่วออกของนิวตรอน และต้องใช้น้ำมวลหนักซึ่งมีสัดส่วน เพียง 1 ใน 3200 ส่วนของน้ำที่พบตามธรรมชาติ การแยกน้ำมวลหนักออกมาจึงมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายสูง

11.8.4 เตาปฏิกรณ์แบบหล่อเย็นด้วยก๊าซ

รูปที่ 11.5 แสดงแผนภาพของเตาปฏิกรณ์แบบหล่อเย็นด้วยก๊าซ เตาปฏิกรณ์แบบนี้ใช้ยูเรเนียม ออกไซด์ที่เสริมสมรรถนะจนมี U-235 2.5% ถึง 3.5% เป็นเชื้อเพลิงบรรจุอยู่ภายในท่อเหล็กไร้สนิม การหล่อเย็นเตาปฏิกรณ์ใช้ CO₂ ส่วนโมเดอเรเตอร์คือ กราไฟต์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงมาก ดังนั้นเตา ปฏิกรณ์จึงสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้และไอน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับ CO₂ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 650°C ก็อาจมีอุณหภูมิสูงพอ ๆ กับไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ประสิทธิภาพ ของวัฏจักรไอน้ำของ AGR จึงสูงกว่า PWR และ BWR นอกจากนี้ AGR ยังมีความปลอดภัยสูงกว่า PWR และ BWR เนื่องจากไม่ได้ใช้น้ำในเตาปฏิกรณ์จึงไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการระเบิดของไอน้ำ เตาปฏิกรณ์แบบนี้ใช้อย่างแพร่หลายในสหราชอาณาจักร



รูปที่ 11.5: เตาปฏิกรณ์แบบหล่อเย็นด้วยก๊าซ

11.8.5 เตาปฏิกรณ์แบบ RBMK

เตาปฏิกรณ์แบบ RBMK มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 11.6 เตาปฏิกรณ์แบบนี้ใช้ในประเทศรัสเซีย และประเทศที่เคยเป็นดินแดนในสหภาพโซเวียต เชื้อเพลิงทำจากยูเรเนียมเสริมสมรรถนะเพียงเล็ก น้อยกราไฟต์ทำหน้าที่เป็นโมเดอเรเตอร์ ส่วนน้ำใช้เป็นสารหล่อเย็นและจะกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณห-ภูมิ ประมาณ 290°C เมื่อไหลผ่านแกนเตาปฏิกรณ์คล้าย BWR ปัญหาจากการใช้กราไฟต์เป็น โมเดอเรเตอร์แต่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นคือ ถ้าน้ำกลายเป็นไอมากขึ้นความสามารถในการหล่อเย็น จะลดลงแต่ปริมาณนิวตรอนที่ทำให้เกิดฟิชชั่นไม่ได้ลดลงตามซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ดังเช่น อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในเมืองเชอร์โนบิล ประเทศยูเครนเมื่อปี พ.ศ. 2529 ข้อได้เปรียบของ RBMK คือ ความสามารถในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเตาปฏิกรณ์



รูปที่ 11.6: เตาปฏิกรณ์แบบ RBMK

11.9 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ถึงแม้ว่าพลูโตเนียมหรือยูเรเนียมธรรมชาติอาจใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ได้ รับการออกแบบเป็นพิเศษได้ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงยูเรเนียมเสริมสมรรถนะซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเกือบ ทั้งหมดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากแร่ยูเรเนียมประกอบด้วย การ สกัดแร่ยูเรเนียม การเสริมสมรรถนะ และการประกอบแท่งเชื้อเพลิง

ยูเรเนียมในธรรมชาติอยู่ในรูปของสารประกอบยูเรเนียมออกไซด์ (U₃O₈) แร่ยูเรเนียมที่มีความ เข้มข้นมากพอที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้มีจำนวนประมาณ 3.3 ล้านตัน กระจายอยู่ในหลาย ประเทศซึ่งเรียงลำดับจากประเทศที่มีสัดส่วนแหล่งแร่ยูเรเนียมมากไปหาน้อยดังนี้ ออสเตรเลีย (27%) คาซัคสถาน (17%) แคนาดา (15%) อาฟริกาใต้ (11%) นามิเบีย (8%) บราซิล (7%) รัสเซีย (5%) สหรัฐอเมริกา (4%) และอุซเบกิสถาน (4%) แร่ยูเรเนียมจะผ่านกระบวนการละลาย (leaching) ด้วย สารละลายกรด ผลผลิตสุดท้ายที่ได้เป็นตะกอนยูเรเนียมออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนสีเหลือง (yellow cake) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาด 1000 MW ต้องใช้ยูเรเนียมออกไซด์ประมาณ 200 ตันต่อปี

11.9. เชื้อเพลิงนิวเคลียร์

U₃O₈ จะถูกแปลงสภาพเป็นยูเรเนียมเฮกซาฟลูออไรด์ (UF₆) ซึ่งจะได้รับความร้อนจนกลาย เป็นของเหลวและก๊าซก่อนผ่านกระบวนการเสริมสมรรถนะ เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เดินเครื่องอยู่ใน ปัจจุบันนี้ใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะที่มี U-235 ตั้งแต่ 1% ถึง 4% ในกระบวนการเสริมสมรรถนะ U-238 อาจจะถูกสกัดออกไปถึง 85% ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนี้คือยูเรเนียมเสริมสมรรถนะและ ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ (depleted uranium) ซึ่งหมายถึงยูเรเนียมที่มีสัดส่วน U-235 น้อยกว่าที่มี ในธรรมชาติ (0.7%) วิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมที่สำคัญมีสองวิธีคือ วิธีแรงหนีศูนย์กลาง (gas centrifuge) และวิธีการแพร่ของก๊าซ (gas diffusion)

รูปที่ 11.7 แสดงหนึ่งขั้นทำงานของเครื่องเสริมสมรรถนะด้วยวิธีแรงหนีศูนย์กลางซึ่งประกอบ ด้วยถังทรงกระบอกซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง UF₆ จะไหลเข้าถังทางด้านบน ²³⁸2UF₆ ซึ่งหนักกว่า ²³⁵2UF₆ จะถูกเหวี่ยงออกจากศูนย์กลางมากกว่า ดังนั้นสัดส่วนของ ²³⁵2UF₆ ใน UF₆ ที่ตำแหน่งกลาง ถังจะมากกว่าสัดส่วนของ ²³2UF₆ ใน UF₆ ที่ไหลเข้า ก๊าซที่สูบออกจากกลางถังก็จะได้ก๊าซ UF₆ ที่ ความเข้มข้นของ U-235 มากกว่าสัดส่วนของ U-235 ในก๊าซที่ไหลเข้าเล็กน้อย UF₆ จะไหลผ่านถัง หลายใบที่ต่ออนุกรมกันหลายสิบขั้นเพื่อให้ได้ก๊าซ UF₆ ที่มีสัดส่วนของ U-235 ตามที่ต้องการ เครื่อง เสริมสมรรถนะด้วยวิธีแรงหนีศูนย์กลางใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องเสริมสมรรถนะด้วยวิธีการแพร่ของ ก๊าซ และสามารถเพิ่มสัดส่วนของ U-235 ในแต่ละขั้นทำงานมากกว่า ดังนั้นจำนวนขั้นทำงานที่ต้อง ใช้เสริมสมรรถนะยูเรเนียมจึงน้อยกว่า เครื่องเสริมสมรรถนะด้วยวิธีแรงหนีศูนย์กลางได้รับความนิยม และใช้งานในหลายประเทศเช่น สหราชอาณาจักร รัสเซีย ญี่ปุ่น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เครื่องเสริม สมรรถนะด้วยวิธีแรงหนีศูนย์กลางมีอัตราการไหลของ UF₆ ที่ต่ำ ขั้นทำงานของเครื่องจึงต้องต่อแบบ ขนานกันเพื่อเพิ่มอัตราการไหล



รูปที่ 11.7: วิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยแรงหนีศูนย์กลาง

รูปที่ 11.8 แสดงขั้นทำงาน (stage) หนึ่งของเครื่องเสริมสมรรถนะด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซ แผ่น เมมเบรน (membrane) แบ่งขั้นทำงานเป็นสองส่วน ส่วนล่างมีความดันสูงกว่าส่วนบน UF₆ ที่มีความ ดันสูงจะไหลเข้าทางส่วนล่าง ²32₉₂UF₆ มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าและไหลช้ากว่า ²32₉₂UF₆ ดังนั้นจึงมี ²32₉₂UF₆ ไหลผ่านเมมเบรนมากกว่า สัดส่วนของ ²32₉₂UF₆ ใน UF₆ ที่ส่วนบนจึงมากกว่าสัดส่วนของ ²352UF₆ ใน UF₆ ที่ไหลเข้า อย่างไรก็ตาม มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของ ²32UF₆ ใน UF₆ เพียง เล็กน้อยเท่านั้นในการไหลผ่านหนึ่งขั้นทำงาน เครื่องเสริมสมรรถนะจะต้องประกอบด้วยหลายร้อย ขั้นทำงาน ความเข้มข้นของ U-235 จึงจะเพิ่มขึ้นถึงระดับที่ต้องการ ข้อดีของเครื่องเสริมสมรรถนะ ด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซคือ อัตราการไหลของ UF₆ สูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือ เครื่องใช้พลังงานมาก ในปัจจุบันมีเพียงสหรัฐอเมริกาและฝรั่งเศสเท่านั้นที่ใช้เครื่องเสริมสมรรถนะด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซ



รูปที่ 11.8: วิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยการแพร่ของก๊าซ

หลังจากการเสริมสมรรถนะก๊าซ UF₆ จะผ่านการควบแน่นกลายเป็นของเหลวและถูกปล่อยให้ เย็นลงจนกลายเป็นของแข็ง หลังจากนั้น UF₆ จะถูกนำมาแปลงสภาพเป็นผงยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO₂) แล้วจึงอัดเป็นเม็ดทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 cm และยาวประมาณ 2 cm เรียกว่าเม็ดเชื้อเพลิง (fuel pellet) เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้แต่งผิวให้เรียบแล้วจึงบรรจุลงในท่อโลหะ ผสมเซอร์โคเนียมยาวตั้งแต่ 60 cm ถึง 4 m ท่อนี้เรียกว่าแท่งเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงหลายแท่งจะมัด รวมกันเป็นขนาดต่าง ๆ ขึ้นกับความต้องการของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

11.10 การกำจัดกากนิวเคลียร์

กากนิวเคลียร์หมายถึง ของเสียจากการเดินเครื่องเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ กากนิวเคลียร์มีส่วน ประกอบเป็นไอโซโทปหลายไอโซโทปที่มีสามารถแผ่รังสีในระดับน้อยไปถึงมาก ไอโซโทปเหล่านี้มี ครึ่งชีวิตตั้งแต่ไม่กี่วินาทีไปจนถึงหลายร้อยปี กากนิวเคลียร์เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม การกำจัดกากนิวเคลียร์จึงนับเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ กากนิวเคลียร์ จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบ่งตามระดับความแรงของรังสีได้เป็น (1) กากนิวเคลียร์ระดับต่ำ (low-level waste) ได้แก่วัสดุปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีเช่น ชุดปฏิบัติงาน อุปกรณ์ เครื่องมือ รวมทั้งน้ำที่ระบาย ทิ้งจากโรงไฟฟ้า (2) กากนิวเคลียร์ระดับกลาง (intermediate-level waste) ได้แก่วัสดุและอุปกรณ์ใน โรงไฟฟ้าที่เลิกใช้งานแล้ว (3) กากนิวเคลียร์ระดับสูง (high-level waste) ได้แก่แท่งเชื้อเพลิงที่หมด อายุการใช้งานแล้ว

น้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าจะผสมกับน้ำสะอาดเพื่อทำให้สารกัมมันตรังสีเจือจางลงก่อนปล่อยสู่แหล่ง น้ำ ส่วนกากนิวเคลียร์ระดับต่ำและระดับกลางที่เป็นของเหลวและของแข็งจะถูกนำมาผ่านกระบวน ลดขนาดกากนิวเคลียร์และลดความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในกากนิวเคลียร์ จากนั้น

้ จึงนำไปบรรจุในถังคอนกรีตแล้วจึงนำไปฝังลึกจากพื้นดินประมาณ 5-10 เมตร ขึ้นกับระดับของกาก นิวเคลียร์

กากนิวเคลียร์ระดับสูงมีปริมาณน้อยแต่มีความสามารถในการแผ่รังสีสูงมาก การกำจัดจึงยุ่ง ยากกว่ากากนิวเคลียร์ระดับต่ำและระดับกลาง กากนิวเคลียร์ระดับสูงซึ่งส่วนใหญ่เป็นแท่งเชื้อเพลิง ที่หมดอายุการใช้งานแล้วจะถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์มาเก็บไว้ในบ่อน้ำเพื่อระบายความ ร้อนจากปฏิกิริยาประวิงที่ยังคงดำเนินอยู่ หลังจากนั้นกากนิวเคลียร์ระดับสูงจะถูกอบให้แห้งแล้วนำ ไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกับแก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate glass) ก่อนบรรจุลงถังคอนกรีตและ นำไปจัดเก็บในสถานที่ที่เหมาะสม การเก็บกากนิวเคลียร์ระดับสูงที่มีปลอดภัยสูงคือ การฝังลงในชั้น หินแข็งที่มีความลึกจากระดับผิวดินลงไปมากกว่า 500 เมตร

แท่งเชื่อเพลิงที่หมดอายุการใช้งานแล้วประกอบด้วย U-235 ประมาณ 1% U-238 ประมาณ 93% Pu-239 ประมาณ 0.5% และไอโซโทปอื่น ๆ ประมาณ 5.5% วิธีกำจัดกากนิวเคลียร์ระดับสูง ที่เป็นแท่งเชื้อเพลิงที่หมดอายุการใช้งานแล้วอีกวิธีหนึ่งคือ การนำแท่งเชื้อเพลิงไปผ่านกระบวนการ แยก U-235, U-238 และ Pu-239 ออกมาเพื่อนำมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงใหม่ ความเข้มข้นของ U-235 อาจต่ำเกินไปแต่ก็ชดเซยด้วย Pu-239 ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้เหมือน U-235 อย่างไรก็ตาม อาจต้องมีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม การนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ช่วยลดปริมาณกากนิวเคลียร์ ที่ต้องกำจัดด้วยการผังได้มากจึงได้รับความนิยมจากหลายประเทศเช่น สหราชอาณาจักร ฝรั่งเศส และญี่ปุ่น แต่ข้อเสียที่สำคัญของการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่คือ Pu-239 สามารถนำไปผลิตอาวุธ นิวเคลียร์ได้ง่ายกว่า U-235 กระบวนการนี้จึงเพิ่มความเสี่ยงที่จะมีการลักลอบขโมย Pu-239 จาก โรงงานผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ หรือระหว่างการขนส่งเชื้อเพลิงจากโรงงาน ผลิตเชื้อเพลิงไปโรงไฟฟ้า บางประเทศเช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดาและสวีเดนจึงไม่นำเชื้อเพลิงกลับ มาใช้ใหม่และกำจัดกากนิวเคลียร์ระดับสูงด้วยวิธีอื่น

11.11 อันตรายของกัมมันตภาพรังสีต่อมนุษย์

กัมมันตภาพรังสีที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์จะทำให้โมเลกุลแตกตัวเป็นไอออน โมเลกุลส่วนใหญ่ใน ร่างกายเป็นโมเลกุลน้ำ กัมมันตภาพรังสีที่มีพลังงานสูงพอจะทำให้น้ำแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ H⁺ และ OH⁻ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ ต่อไป นอกจากนี้กัมมันตภาพรังสียังอาจทำลาย เซลล์บางเซลล์โดยตรง ผลกระทบของกัมมันตภาพรังสีต่อสุขภาพอาจแบ่งเป็น ผลกระทบต่อสุขภาพ (somatic effect) และผลกระทบต่อกรรมพันธุ์ (genetic effect) ผลกระทบต่อสุขภาพหมายถึง การที่ อวัยวะในเกิดความเสียหายจากกัมมันตภาพรังสี และโรคมะเร็งที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสี อวัยวะที่ มีความเสี่ยงสูงต่อโรคมะเร็งได้แก่ ต่อมไทรอยด์ ไขสันหลังและปอด ผลกระทบต่อกรรมพันธุ์หมายถึง ความผิดปกติกับพันธุกรรมที่ถ่ายทอดจากผู้ได้รับกัมมันตภาพรังสีไปยังลูกหลานซึ่งทำให้ลูกหลานมี ความผิดปกติในร่างกาย

มนุษย์ได้รับกัมมันตภาพรังสีตลอดเวลา แหล่งกัมมันตภาพรังสีมาจากแหล่งธรรมชาติเช่น แสง อาทิตย์ รังสีคอสมิก (cosmic ray) สารกัมมันตรังสีใต้พื้นดิน และก๊าซกัมมันตรังสีในอากาศ เท่าที่ ผ่านมา มนุษย์มีวิวัฒนาการในการปรับตัวให้เข้ากับกัมมันตภาพรังสีมาจากแหล่งธรรมชาติ ดังนั้น การได้รับกัมมันตภาพรังสีเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตาม มนุษย์อาจได้รับ กัมมันตภาพรังสีจากแหล่งอื่นเช่น ผู้ป่วยบางคนยังต้องได้รับกัมมันตภาพรังสีจากการทำรังสีบำบัด ผู้ปฏิบัติการอาจได้รับกัมมันตภาพรังสีจากการใช้รังสีเอ็กซ์ตรวจสอบความเสียหายของวัสดุ และ วิศวกรอาจได้รับกัมมันตภาพรังสีจากการปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ถ้ากัมมันตภาพรังสีจาก แหล่งอื่นเหล่านี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ได้รับจากแหล่งธรรมชาติก็ไม่น่าจะ ส่งผลเสียต่อสุขภาพมากนัก

กัมมันตภาพรังสีที่ทำอันตรายต่อมนุษย์คือ กัมมันตภาพรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยเนื้อเยื่อในร่างกาย ในการดูดกลืนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทจากรังสีสู่เนื้อเยื่อซึ่งจะส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลาย ปริ-มาณรังสี (radiation dose) ขึ้นกับพลังงานที่ถ่ายเทต่อมวลของเนื้อเยื่อ หน่วยวัดปริมาณรังสีในระบบ SI คือ เกรย์ (Gy) 1 Gy เท่ากับพลังงานจากกัมมันตภาพรังสี 1 J ที่ดูดกลืนโดยเนื้อเยื่อ 1 kg อย่างไร ก็ตาม กัมมันตภาพรังสีมีหลายชนิดซึ่งมีรุนแรงต่างกัน รังสีจากอนุภาคที่มีมวลน้อยหรือความเร็ว ต่ำมีความรุนแรงน้อยกว่ารังสีจากอนุภาคที่มีมวลมากหรือความเร็วสูง ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่า ปริมาณรังสีเทียบเท่า (equivalent radiation dose) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor) กับปริมาณรังสี หน่วยของปริมาณรังสีเทียบเท่าคือซีเวิร์ตส์ (Sv) ตารางที่ 11.3 แสดง แฟกเตอร์คุณภาพ ของกัมมันตภาพรังสีและอนุภาคหลายชนิด

รังสีและอนุภาค	แฟกเตอร์คุณภาพ			
รังสีเอ็กซ์, รังสีแกมม่า, รังสีเบต้า	1			
นิวตรอนช้า	2			
นิวตรอนเร็ว	10			
โปรตรอน	10			
รังสีอัลฟา	20			
ไอออนหนักอื่น ๆ	20			

ตารางที่ 11.3: แฟกเตอร์คุณภาพของกัมมันตภาพรังสีและอนุภาค

ถึงแม้ว่าร่างกายมนุษย์มีกลไกแก้ไขความเสียหายที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสี แต่การได้รับกัม-มันตภาพรังสีปริมาณน้อยสะสมในร่างกายเป็นเวลานานก็จะส่งผลเสียต่อสุขภาพได้ ดังนั้นในการ ประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ จึงต้องพิจารณาปริมาณรังสีเทียบเท่าที่ร่างกายได้รับสะสมในช่วงเวลา 1 ปี ปริมาณรังสีเทียบเท่าเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อคือ 4 Sv ต่อปี แต่ปริมาณรังสีเทียบเท่าที่มนุษย์ได้ รับจากธรรมชาติขึ้นกับสถานที่และมีค่าระหว่าง 2 ถึง 6 mSv ต่อปีเท่านั้น ผู้ที่มีความเสี่ยงที่จะได้รับ กัมมันตภาพรังสีในระดับที่เป็นอันตรายจึงเป็นผู้ที่อยู่ใกล้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เมื่อเกิดอุบัติเหตุขั้นร้าย แรงที่โรงไฟฟ้า

์ ตัวอย่าง คนงานในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งหนึ่งสูดอากาศที่มีทริเทียมซึ่งแผ่รังสีเบต้า รังสีถูกดูด กลืนในปอดที่มีน้ำหนัก 1 kg ถ้าพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนเท่ากับ 4 × 10⁻³ J จงคำนวณปริมาณ

รังสีเทียบเท่า

วิธีทำ

ปริมาณรังสีเท่ากับ 4×10^{-3} J/1 kg = 4×10^{-3} Gy แฟกเตอร์คุณภาพของรังสีเบต้าคือ 1 ดัง นั้นปริมาณรังสีเทียบเท่าคือ $1 \times 4 \times 10^{-3}$ = 4 mSv

11.12 ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) หรือ IAEA เป็นหน่วยงานในสังกัดของสหประชาชาติที่ควบคุมโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ให้ปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ด้าน ความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด กฎเกณฑ์ดังกล่าวเกี่ยวข้องกับสถานที่ตั้ง การออกแบบ การก่อสร้าง การทดสอบ การเดินเครื่อง การตรวจสอบและการบำรุงรักษา บุคลากรที่ทำหน้าที่เดินเครื่องโรงไฟฟ้า นิวเคลียร์จะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐานของ IAEA และต้องผ่านทดสอบใหม่ทุก 3 ปี

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทุกโรงได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงความปลอดภัยจากรั่วไหลของกัมมันต-ภาพรังสีขณะเดินเครื่อง มีการป้องกันการรั่วไหลอย่างน้อยสามชั้นคือ แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทุก แท่งซึ่งเป็นแหล่งผลิตสารกัมมันตรังสีมีแผ่นโลหะหุ้มมิดชิด แท่งเชื้อเพลิงหลายแท่งที่อยู่ในแกนของ เตามีเปลือกเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้อมรอบ และเตาปฏิกรณ์บรรจุอยู่ภายในโครงสร้างคอนกรีตหนา ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่อยู่ในแท่งเชื้อเพลิงจึงต้องผ่านด่านสามด่านก่อนที่จะเล็ดลอดออกมาได้ ด้วยเหตุนี้การรั่วไหลจึงเกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากนี้การออกแบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังคำนึงถึงการ ป้องกันอุบัติเหตุร้ายแรงซึ่งจะทำให้มีการปล่อยสารกัมมันตรังสีปริมาณมากสู่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่าง เช่น เตาปฏิกรณ์มีคุณสมบัติในการลดฟิชชั่นถ้าอุณหภูมิของเตาสูงขึ้น การหยุดการทำงานของเตา โดยการหย่อนแท่งควบคุมเข้าไปในเตาเป็นระบบอัตโนมัติ

มีความเข้าใจผิดว่าอุบัติเหตุที่ร้ายแรงที่สุดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์คือ การระเบิดอย่างรุนแรง พอ ๆ กับระเบิดนิวเคลียร์ ในความเป็นจริงมีความแตกต่างอย่างมากระหว่างเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า นิวเคลียร์กับเชื้อเพลิงของระเบิดนิวเคลียร์ ความเข้มข้นของ U-235 ในระเบิดนิวเคลียร์ต้องมากกว่า 95% ในขณะที่เชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีความเข้มข้นของ U-235 เพียง 2% ถึง 3% อุบัติเหตุ ที่ร้ายแรงที่สุดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์คือ การหลอมเหลวของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor meltdown) ซึ่งมีสาเหตุจากการขาดการหล่อเย็นของเตาและความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาทำให้อุณหภูมิของ เตาสูงถึงจุดหลอมเหลว ในกรณีที่การหลอมเหลวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องยาวนานและปราศจากการ ควบคุมอาจทำให้วัสดุที่หลอมเหลวทะลุฐานของเตาไปชั้นหินและชั้นน้ำบาดาล เมื่อวัสดุหลอมเหลว ไหลถึงน้ำก็จะทำให้น้ำกลายเป็นไออย่างรวดเร็วและทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงซึ่งจะทำให้ สารกัมมันตรังสีกระจายไปในวงกว้าง เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์สมัยใหม่ได้รับการออกแบบให้เกือบไม่มี โอกาสที่จะเกิดการหลอมเหลวของเตาปฏิกรณ์ได้เลยโดยมีการหล่อเย็นเตาปฏิกรณ์ตลอดเวลาและ มีระบบระบายความร้อนฉุกเฉินหลายระบบ ถึงแม้ว่าเตาปฏิกรณ์จาหลุดทำงานแล้วก็ตาม

้ เท่าที่ผ่านมามีอุบัติเหตุร้ายแรงที่สำคัญที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์สามครั้งคือ

- เมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2522 เกิดอุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าทรีไมล์ไอส์แลนด์ (Three Mile Island) ในมลรัฐเพนซิลวาเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา โรงไฟฟ้าแห่งนี้ใช้เตาปฏิกรณ์แบบ PWR อุบัติเหตุเริ่มต้นจากเหตุขัดข้องที่เครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งทำให้ระบบควบคุมสั่งหยุดการทำงาน ของเตาปฏิกรณ์และสั่งให้ระบบหล่อเย็นสูบน้ำเข้าเตาปฏิกรณ์เพื่อระบายความร้อนที่เกิด จากกระบวนการประวิง แต่ผู้ปฏิบัติการปิดเครื่องสูบน้ำเข้าเตาปฏิกรณ์เตาปฏิกรณ์โดยรู้เท่าไม่ ถึงการณ์ ผลก็คือ แท่งเชื้อเพลิงบางส่วนหลอมละลายและมีกัมมันตภาพรังสีรั่วไหลจากเตา ปฏิกรณ์ แต่อาคารคอนกรีตที่คลุมเตาปฏิกรณ์ป้องกันไม่ให้กัมมันตภาพรังสีรั่วไหลออกไปได้ จึงไม่มีผู้เสียชีวิตหรือได้รับบาดเจ็บ อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุครั้งนี้สั่นคลอนความเชื่อมั่นของ ชาวอเมริกันที่มีต่อระบบความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- เมื่อวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2529 เกิดอุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าเซอร์โนบิล (Chernobyl) ในสหภาพ โซเวียตรัสเซีย (ปัจจุบันอยู่ในประเทศ ยูเครน) โรงไฟฟ้า แห่งนี้ใช้ เตาปฏิกรณ์แบบ RBMK อุบัติเหตุเกิดจากความผิดพลาดในการทดลองเดินเครื่องเตาปฏิกรณ์ที่ภาระต่ำ โดยผู้ปฏิบัติ การสั่งให้ระบบหล่อเย็นหยุดทำงานและหยุดการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สอด แท่งควบคุมเข้าเตาปฏิกรณ์ ผลที่ตามมาคือฟิชชั่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่สามารถควบคุม ได้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้น้ำหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์กลายเป็นไอน้ำความดันสูง และส่งแรงระเบิดขึ้นข้างบนซึ่งไม่มีอาคารคอนกรีตคลุม กัมมันตภาพรังสีปริมาณมากแพร่ กระจายออกสู่ภายนอกในวงกว้าง ในเบื้องต้น มีผู้เสียชีวิต 31 คนและบาดเจ็บ 203 คน นอกจากนี้ยังมีผู้ป่วยจากการสัมผัสสารกัมมันตรังสีจำนวนมากที่เสียชีวิตจากโรคมะเร็งใน ภายหลัง
- เมื่อวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2554 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 8.9 ริกเตอร์สเกลนอกซายฝั่งภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศญี่ปุ่น และมีคลื่นสึนามิสูงกว่า 10 เมตรถล่มเมืองฟูกุชิมา (Fukushima) ซึ่งเป็นที่ตั้งของโรงไฟฟ้าฟูกุชิมาไดอิชิ (Fukushima Daiichi) โรงไฟฟ้าแห่งนี้ใช้ เตาปฏิกรณ์แบบ BWR จำนวน 6 เตา ถึงแม้ว่าเตาปฏิกรณ์ทุกเครื่องสามารถหยุดทำงานได้ ทันทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหว แต่คลื่นสึนามิซึ่งสูงถึง 14 เมตรทำให้น้ำทะเลท่วมเครื่องสูบน้ำ และระบบหล่อเย็นของเตาปฏิกรณ์ล้มเหลว ความร้อนจากกระบวนการประวิงทำให้เกิดการ ระเบิดที่เตาปฏิกรณ์จำนวน 4 เตา ซึ่งส่งผลให้มีสารกัมมันตรังสีรั่วไหลออกจากโรงไฟฟ้าใน ปริมาณมาก

คำถามท้ายบท

- 1. ระบุข้อได้เปรียบของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน
- ธาตุที่มีสัญลักษณ์ ²³⁹₉₄Pu มีโปรตอนกี่ตัวและนิวตรอนกี่ตัว
- 3. น้ำมวลหนักมีน้ำหนักโมเลกุลเท่าไร
- 4. ทำไมรังสีเบต้าจึงเป็นอันตรายต่อมนุษย์มากกว่ารังสีอัลฟา
- 5. รังสีใดมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำที่สุด
- ⁹⁰₃₈Sr เป็นนิวเคลียสที่ไม่มีเสถียรภาพและจะสลายตัวเป็น ⁹⁰₃₉Y พร้อมกับปล่อยอนุภาคออกมา อนุภาคนั้นคืออะไร
- นิวเคลียสของธาตุหนึ่งมีจำนวนเริ่มต้น 360 นิวเคลียส ครึ่งชีวิตของนิวเคลียสนี้เท่ากับ 2 ชั่วโมง อยากทราบว่าจะเหลือนิวเคลียสของธาตุนี้เท่าไรหลังจากเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง
- 8. ฟิชชั่นแตกต่างกับฟิวชั่นอย่างไร
- 9. กระบวนการประวิงหมายถึงอะไร
- 10. โมเดอเรเตอร์ทำหน้าที่อะไรในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์
- 11. สารที่ใช้ทำแท่งควบคุมควรมีคุณสมบัติอย่างไร
- 12. อธิบายการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง
- 13. ทำไมเตาปฏิกรณ์แบบน้ำเดือดจึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเตาปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง
- 14. ทำไมเชื้อเพลิงของเตาปฏิกรณ์แบบน้ำหนักความดันสูงจึงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติแทนที่จะ เป็นยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ
- 15. ก๊าซอะไรที่ใช้เป็นสารหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์แบบหล่อเย็นด้วยก๊าซ
- 16. โมเดอเรเตอร์ของเตาปฏิกรณ์แบบ RBMK ทำด้วยวัสดุใด
- 17. ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะมีไอโซโทปใดในปริมาณมากกว่าที่พบในธรรมชาติ
- 18. ยูเรเนียมออกไซด์ (U₃O₈) ที่ได้จากกระบวนการถลุงแร่ยูเรเนียมมีสีอะไร
- 19. อธิบายวิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยแรงหนีศูนย์กลาง
- 20. กระบวนการเสริมสมรรถนะแร่ยูเรเนียมด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซนิยมใช้ในประเทศใด

- 21. หน่วยงานใดของสหประชาชาติทำหน้าที่ควบคุมโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลก
- 22. ทำไมจึงไม่มีโอกาสที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะระเบิดเหมือนระเบิดนิวเคลียร์
- 23. เตาปฏิกรณ์ของโรงไฟฟ้าทรีไมล์ไอส์แลนด์เป็นแบบใด
- 24. กำหนดให้มวลของโปรตอนคือ 1.007277 amu มวลของนิวตรอนคือ 1.008665 amu และ มวลของ ${}^{16}_{8}$ O คือ 15.99491 amu จงหาพลังงงานยึดเหนี่ยวของ ${}^{16}_{8}$ O (1 amu = 1.66×10^{-27} kg, 1 eV = 1.6×10^{-19} J และ c = 3.0×10^8 m/s)
- 25. นิวเคลียสของ U-235 ให้พลังงาน 200 MeV ในขณะที่ถ่านหิน 1 กิโลกรัมให้พลังงาน 20000 kJ อยากทราบว่า 1 g ของ U-235 ให้พลังงานเทียบเท่ากับถ่านหินปริมาณเท่าไร (1 eV = 1.6 × 10⁻¹⁹ J และมี 6.022 × 10²³ นิวเคลียสใน 1 mol ของ U-235)

บทที่ 12

เศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า

12.1 มูลค่าปัจจุบัน

เป็นที่ทราบกันดีว่ามูลค่าของเงินขึ้นกับเวลา เงินจำนวนหนึ่งในปัจจุบันมีค่ามากเงินจำนวน เดียวกันในอนาคตเนื่องจากถ้านำเงินไปฝากธนาคารก็จะได้ดอกเบี้ยหรือถ้านำเงินไปลงทุนก็ได้ ผลตอบแทนซึ่งส่งผลให้มูลค่าของเงินสูงขึ้น ในทางธุรกิจอัตราการเพิ่มขึ้นของมูลค่าเงินจึงเรียกว่า อัตราส่วนลด (discount rate) เพื่อการเปรียบเทียบเงินในเวลาที่ต่างกัน มูลค่าเงินในอนาคต (future value) จะต้องแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบัน (present value) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$PV = f_{PV}FV \tag{12.1}$$

โดยที่ PV คือ มูลค่าปัจจุบัน, FV คือ มูลค่าเงินหลังจากเวลาผ่านไป n ปีและ

$$f_{PV} = \frac{1}{(1+i)^n}$$
(12.2)

คือแฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบัน (present worth factor) และ *i* คืออัตราส่วนลด จะเห็นว่า f_{PV} ลดลง ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนลดที่เพิ่มขึ้น

้วิธีทำ
กำหนดให้
$$PV$$
 = 1000000 บาทและ FV = 1100000 บาท ดังนั้น
 $f_{PV} = \frac{PV}{FV}$
= 0.909
 $= \frac{1}{(1+i)^3}$

i = 0.0323

ในการดำเนินธุรกิจ รายรับและรายจ่ายจะเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ เรียกว่าเงินชุด (series payment) การหามูลค่าบัจจุบันของเงินชุดสามารถใช้สมการ (12.1) และ (12.2) ได้โดยแยกพิจารณามูลค่า ปัจจุบันของเงินในอนาคตแต่ละก้อน มูลค่าบัจจุบันรวมของเงินชุดจะเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินใน อนาคตแต่ละก้อน วิธีนี้อนุญาตให้ใช้อัตราส่วนลดที่ต่างกันสำหรับเงินในอนาคตแต่ละก้อนได้

ตัวอย่าง โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งต้องการเปลี่ยนเครื่องควบแน่น การจ่ายค่าคอนเดนเซอร์จะจ่าย สามครั้ง ครั้งแรกจ่ายทันที 500000 บาท หลังจากนั้นหนึ่งปีจ่ายอีก 600000 บาทโดยใช้อัตราส่วน ลด 5% ครั้งสุดท้ายจ่าย 700000 บาทเมื่อเวลาผ่านไปสองปีโดยใช้อัตราส่วนลด 4.5% จงหามูลค่า ปัจจุบันของเครื่องควบแน่น

วิธีทำ

 $PV = PV_0 + PV_1 + PV_2$ $PV_0 = 500000$ $PV_1 = \frac{600000}{(1+0.05)}$ = 471729 $PV_2 = \frac{700000}{(1+0.045)^2}$ = 641011 $\implies PV = 1612740 \text{ ling}$

ถ้าเงินชุดเกิดขึ้นทุกปีรวม n ปีนับจากปัจจุบันและในแต่ละปีจำนวนเงินเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นสัดส่วนคงที่เมื่อเทียบกับจำนวนเงินในปีก่อนหน้าและอัตราส่วนลดมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่ พิจารณา การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสามารถใช้สูตรคณิตศาสตร์แทนการแยกคำนวณหามูลค่า ปัจจุบันของเงินในอนาคตแต่ละก้อน กำหนดให้ FV_k เป็นจำนวนเงินที่จะเกิดขึ้นเมื่อสิ้นปีที่ k และ

$$FV_{k+1} = (1+r)FV_k$$

โดยที่ 100r เป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น (r>0) หรือลดลง (r<0) ของจำนวนเงิน สูตรคำนวณหา มูลค่าปัจจุบันของเงินชุดคือ

$$PV = \frac{FV_1}{i-r} \left[1 - \left(\frac{1+r}{1+i}\right)^n \right]$$
(12.3)

้มีกรณีพิเศษที่ r=i การใช้สมการ (12.3) อาจไม่สะดวก สูตรการคำนวณค่า PV สำหรับกรณีนี้คือ

$$PV = \frac{nFV_1}{1+i} \tag{12.4}$$

ตัวอย่าง ค่าจ้างของพนักงานของบริษัทแห่งหนึ่งเท่ากับ 1000000 บาทเมื่อสิ้นปีแรก ถ้าอัตรา เงินเฟ้อทำให้บริษัทต้องเพิ่มค่าจ้าง 5% ทุกปี จงหามูลค่าปัจจุบันของค่าจ้าง 5 ปีถ้าอัตราส่วนลด เท่ากับ 7%

วิธีทำ

เนื่องจาก FV_1 = 1000000 บาท, r = 0.05 และ i = 0.07 ดังนั้น

$$PV = \frac{1000000}{0.07 - 0.05} \left[1 - \left(\frac{1.05}{1.07}\right)^5 \right]$$
$$= 4501444$$
บาท

เงินซุดเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการดำเนินโครงการธุรกิจ มูลค่าปัจจุบันของเงินซุดจะใช้ในการ ประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการ นอกจากนี้มูลค่าปัจจุบันของเงินซุดยังใช้เปรียบ เทียบโครงการต่างๆ และใช้ในกระบวนการดัดแปลงแก้ไขโครงการให้มีความเหมาะสมที่สุด (optimization process) อย่างไรก็ตามมูลค่าปัจจุบันของเงินซุดมักเป็นตัวเลขจำนวนมหาศาลและไม่ ได้บอกว่ากระแสการเงินในแต่ละปีที่ดำเนินโครงการเป็นเท่าไร มูลค่าเฉลี่ยต่อปี (levelized value) หมายถึงจำนวนเงินที่เกิดขึ้นเท่า ๆ กันในแต่ละปีซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันรวมเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของ เงินซุด มูลค่าเฉลี่ยต่อปีสามารถใช้ประเมินโครงการได้เหมือนกับมูลค่าปัจจุบันของเงินซุด บ่อยครั้ง ที่การประเมินโครงการด้วยมูลค่าเฉลี่ยต่อปีจะมีความสะดวกกว่าเพราะทำให้ทราบว่าแต่ละปีของ โครงการจะมีรายรับหรือรายจ่ายเท่าไร

มูลค่าเฉลี่ยต่อปีอาจเรียกว่ามูลค่ารายปี (annual value) สามารถคำนวณได้ถ้ามีข้อมูลที่ครบ ถ้วนของเงินชุดซึ่งได้แก่ มูลค่าเงินในอนาคตแต่ละก้อนและอัตราส่วนลดซึ่งสมมุติว่ามีค่าคงที่ ถ้า กำหนดให้จำนวนปีของเงินชุดคือ n การหามูลค่าเฉลี่ยต่อปีเริ่มจากการหาแฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบัน ของเงินในอนาคตแต่ละก้อน (f_{PV1}, f_{PV2}, ..., f_{PVn}) จากสมการ (12.2) จากนั้นคำนวณมูลค่า ปัจจุบันของเงินในอนาคตแต่ละก้อน (PV₁, PV₂, ..., PV_n) จากสมการ (12.1) สูตรของมูลค่าเฉลี่ย ต่อปีหรือ AV คือ

$$AV = \frac{PV_1 + PV_2 + \dots + PV_n}{f_{PV1} + f_{PV2} + \dots + f_{PVn}}$$
(12.5)

ตัวอย่าง ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งเท่ากับ 50 บาท/GJ ในปีแรก ราคาในปีที่ 2 ถึง 5 เพิ่มปีละ 5% จากราคาในปีก่อนหน้า จงหามูลค่าเฉลี่ยต่อปีของเชื้อเพลิงในช่วงเวลา 5 ปีถ้า อัตราส่วนลดเท่ากับ 4.5%

[วิธีทำ] ตารางข้างล่างแสดงการคำนวณแฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบันและมูลค่าปัจจุบันจากสมการ (12.1)

	ปีที	FV	f_{PVi}	PV_i		
	1	50.00	0.9569	47.85		
	2	52.50	0.9157	48.07		
	3	55.13	0.8763	48.31		
	4	57.88	0.8386	48.54		
	5	60.78	0.8025	48.78		
แทนค่า PV_i และ f_{PVi} (i = 1, 2, 3, 4, 5) ในสมการ (12.5)						
4V - 47.85 + 48.07 + 48.31 + 48.54 + 48.78						
0.9569 + 0.9157 + 0.8763 + 0.8386 + 0.8025						
= 55.02 บาท/GJ						

การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การหา อัตราส่วนลดที่ทำให้ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของรายรับและรายจ่ายมีค่าเป็นศูนย์ ผลต่างนี้ เรียกว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value) อัตราส่วนลดที่คำนวณได้เรียกว่าอัตราผลตอบแทน ภายใน (internal rate of return) เป็นอัตราส่วนลดที่ทำให้โครงการถึงจุดคุ้มทุน ถ้าอัตราส่วนลดจริง แตกต่างจากอัตราผลตอบแทนภายในโดยทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวกโครงการนั้นถือว่า คุ้มค่าแก่การลงทุน

ตัวอย่าง โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งใช้เงินลงทุนสร้างโรงไฟฟ้า 1500 ล้านบาท หลังจากเดินเครื่องแล้ว ได้กำไรปีละ 150 ล้านบาท จงหาอัตราผลตอบแทนภายในถ้าโรงไฟฟ้ามีอายุการใช้งาน 20 ปี จง ประเมินความคุ้มค่าของโรงไฟฟ้านี้ถ้าอัตราส่วนลดเท่ากับ 8%

วิธีทำ

เนื่องจากรายจ่ายเกิดขึ้นในปัจจุบันคือ 1500 ล้านบาท มูลค่าปัจจุบันของรายจ่าย (*PV_{out}*) จึง เท่ากับ 1500 ล้านบาท รายรับเป็นเงินชุดที่เกิดขึ้นทุกปีรวม 20 ปี มูลค่าปัจจุบันของรายรับ (*PV_{in}*) หาได้จากสมการ (12.3) โดย *r* = 0

$$PV_{in} = \frac{150}{i-0} \left[1 - \left(\frac{1+0}{1+i}\right)^{20} \right]$$

แก้สมการหา i ได้เพราะ $PV_{in} = PV_{out}$ = 1500

$$\frac{1}{i} \left[1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^{20} \right] = 10$$
$$\implies i = 0.078$$

ถ้า *i* = 0.08 มูลค่าปัจจุบันของรายรับจะมีค่าน้อยกว่า 1500 ล้านบาทซึ่งทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ติดลบและโรงไฟฟ้าไม่คุ้มค่า

12.2 เส้นโค้งภาระ

โรงไฟฟ้าแต่ละโรงต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมากในการสร้างและเดินเครื่อง การสร้างโรงไฟฟ้าเป็น กระบวนการที่ซับซ้อน ใช้เงินลงทุนมากและใช้เวลานาน ดังนั้นการวางแผนล่วงหน้าจึงเป็นเรื่อง สำคัญ ถ้าความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศเพิ่มขึ้นเกินความคาดหมาย โรงไฟฟ้าอาจถูกสร้างขึ้น ไม่ทันผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการและทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนไฟฟ้าอันจะนำไปสู่ความ สูญเสียที่ใหญ่หลวงต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศได้ ในทางกลับกันการคาดหมายว่าเศรษฐกิจจะ เติบโตเกินความเป็นจริงจะนำไปสู่การสร้างโรงไฟฟ้ามากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้โรงไฟฟ้าหลายโรงไม่ สามารถเดินเครื่องเต็มที่และต้องผลิตไฟฟ้าที่มีต้นทุนสูง

นักวางแผนจะพยายามคาดคะเนความต้องการไฟฟ้าในอนาคตเพื่อวางแผนสร้างโรงไฟฟ้าขึ้น มารองรับความต้องการได้ทันท่วงที ข้อมูลที่ใช้ในการคาดคะเนได้มาจากหลายแหล่งข้อมูล แต่ ข้อมูลที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือ ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าในอดีตและบัจจุบัน เพราะข้อมูลนี้จะใช้ วิเคราะห์แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคตได้เป็นอย่างดีเมื่อใช้ประกอบกับข้อมูลอื่นๆ ข้อมูล ความต้องการใช้ไฟฟ้ามักจะถูกนำเสนอในรูปของ เส้นโค้งภาระ (load curve) สมมุติว่าพลังไฟฟ้า ที่เมืองหนึ่งต้องการใช้มีค่าคงที่ในแต่ละเดือนแต่จะมีค่าเปลี่ยนไปทุกเดือน รูปที่ 12.1 แสดงกราฟ แท่งซึ่งความสูงของแต่ละแท่งแปรผันตามพลังไฟฟ้า ในความเป็นจริงพลังไฟฟ้าที่เมืองนี้ต้องการใช้ จะมีค่าเปลี่ยนไปตลอดเวลา กราฟระหว่างความต้องการไฟฟ้ากับเวลาจึงเป็นเส้นโค้งในรูปที่ 12.1 เนื่องจากพลังไฟฟ้าอาจได้จากโรงไฟฟ้าแห่งใดแห่งหนึ่ง พลังไฟฟ้านี้จึงเป็นภาระ (load) ของโรง ไฟฟ้า เส้นโค้งในรูปที่ 12.1 จึงเรียกว่า เส้นโค้งภาระ (load curve) โดยทั่วไปเส้นโค้งภาระเป็นกราฟ ระหว่างพลังไฟฟ้ากับเวลาโดยช่วงเวลาอาจเป็น 1 ชั่วโมง 1 วันหรือ 1 เดือนก็ได้แล้วแต่วัตถุประสงค์ ของการเขียนเส้นโค้งการะ



รูปที่ 12.1: ตัวอย่างเส้นโค้งภาระในช่วงเวลา 12 เดือน

สิ่งที่น่าสังเกตเกี่ยวกับเส้นโค้งภาระคือ ความไม่คงที่ของความต้องการไฟฟ้า ซึ่งสิ่งนี้เป็นธรรม ชาติของความต้องการไฟฟ้า กล่าวคือ ความต้องการไฟฟ้าในช่วงกลางวันย่อมมากกว่าช่วงกลาง คืนเพราะการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ที่ใช้ไฟฟ้าเกิดขึ้นในช่วงกลางวันมากกว่ากลางคืน และความ ต้องการไฟฟ้าในช่วงหน้าร้อนอาจมากกว่าช่วงหน้าหนาวเพราะมึการใช้เครื่องปรับอากาศในหน้า ร้อนมากกว่าหน้าหนาว แฟกเตอร์สองค่าที่ใช้วัดความไม่คงที่ของความต้องการไฟฟ้าคือ ภาระสูงสุด (peak load) และแฟกเตอร์ภาระ (load factor)

ไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ระบบพลังไฟฟ้าจึงต้องอยู่ในสภาวะสมดุลตามรูปที่ 12.2 กล่าวคือ พลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ เวลาหนึ่งลบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปจะต้องเท่ากับพลังไฟฟ้าที่ถูกใช้ ณ เวลานั้นบวกพลังไฟฟ้าที่ถูกเก็บสะสม ณ เวลาเดียวกัน โดยทั่วไประบบสะสมพลังไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากไม่มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น พลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะต้องมากกว่าพลังไฟฟ้าที่ ต้องการใช้เสมอ เมื่อใดก็ตามที่ความต้องการใช้ไฟฟ้ามากกว่าความสามารถในการผลิตไฟฟ้า ระบบ พลังไฟฟ้าจะเกิดปัญหาไฟฟ้าดับ (blackout) ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อเศรษฐกิจของประเทศอย่างรุนแรง ดังนั้นในทางทฤษฏีพลังไฟฟ้ารวมของระบบจะต้องมากกว่าภาระสูงสุดซึ่งก็คือ ค่าสูงสุดของเส้นโค้ง ภาระ นอกจากนี้โรงไฟฟ้าอาจต้องปิดซ่อมเป็นระยะๆ ดังนั้นในทางปฏิบัติพลังไฟฟ้ารวมของระบบ ควรมากกว่าภาระสูงสุด 15% ถึง 20% เพื่อความมั่นใจว่าระบบพลังไฟฟ้าจะสามารถรองรับภาระ สูงสุดได้ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามพลังไฟฟ้ารวมของระบบที่มากเกินความจำเป็นจะทำให้ต้นทุนการ ผลิตไฟฟ้าสูงเกินไป



รูปที่ 12.2: สมดุลระบบพลังไฟฟ้า

ภาระสูงสุดในรูปที่ 12.1 มีค่าประมาณ 93 MW และเกิดขึ้นในเดือนที่ 7 สำหรับประเทศไทย ภาระสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงที่อุากาศร้อนที่สุดซึ่งตามปกติจะอยู่ระหว่างมีนาคมถึงพฤษภาคม ตาราง ที่ 12.1 เปรียบเทียบภาระสูงสุดของประเทศไทยกับกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมของประเทศซึ่งเป็นผล รวมของกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทุกโรงในประเทศระหว่างปี พ.ศ. 2548 ถึง 2561 จะเห็นว่า ภาระสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปียกเว้นบางปีที่เกิดวิกฤติเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้อง ขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยด้วยการสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่มทุกปีซึ่งทำให้การคาดการณ์ ภาระสูงสุดมีความสำคัญต่อการวางแผนสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อให้มีกำลังการผลิตไฟฟ้าที่พอเหมาะ

พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งภาระคือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในช่วงเวลาที่พิจารณา ถ้าแกนตั้งมีหน่วย เป็น kW แกนนอนมีหน่วยเป็นชั่วโมงพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งภาระจะมีหน่วยเป็น kW.h หรือ 1 หน่วย ไฟฟ้า ภาระเฉลี่ย (average load) คำนวณจากพื้นที่ใต้เส้นโค้งภาระหารด้วยช่วงเวลา อัตราส่วนของ

ปี พ.ศ.	ภาระสูงสุด (MW)	กำลังการผลิตไฟฟ้ารวม (MW)
2548	20538	26450
2549	21064	27106
2550	22586	28530
2551	22568	29892
2552	22045	29212
2553	24010	30920
2554	23900	31447
2555	26121	32600
2556	26598	33681
2557	26942	34668
2558	27346	38815
2559	29619	41556
2560	28578	42433
2561	28338	43374

ตารางที่ 12.1: ภาระสูงสุดและกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมของประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2548 ถึง 2561

ภาระเฉลี่ย (P_{ave}) ต่อภาระสูงสุด (P_{max}) คือ แฟกเตอร์ภาระ (LF)

$$LF = \frac{P_{ave}}{P_{max}} \tag{12.6}$$

ถ้าแฟกเตอร์ภาระมีค่าน้อย ช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจะเป็นช่วงสั้น ๆ ในขณะที่ความ ต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาอื่นจะน้อยกว่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดมาก ดังนั้นโรงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมา เพื่อตอบสนองความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจะเดินเครื่องไม่เต็มที่ในช่วงเวลาส่วนใหญ่ ในทางกลับกัน แฟกเตอร์ภาระที่มากหมายความว่า โรงไฟฟ้าเดินเครื่องเกือบเต็มที่ตลอดเวลา

ในกรณีที่ความต้องการไฟฟ้าที่มีเส้นโค้งภาระตามรูปที่ 12.1 ได้รับพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า เพียงหนึ่งโรง เส้นโค้งภาระของโรงไฟฟ้านั้นก็จะเป็นเส้นโค้งเดียวกันกับในรูปที่ 12.1 แต่ถ้ามีโรงไฟฟ้า มากกว่าหนึ่งโรงจ่ายไฟฟ้าให้อาณาเขตดังกล่าว เส้นโค้งภาระของโรงไฟฟ้าแต่ละโรงจะมีลักษณะ แตกต่างจากรูปที่ 12.1 โดยขึ้นกับการเลือกใช้งานโรงไฟฟ้าแต่ละโรง โรงไฟฟ้าแต่ละโรงได้รับการ ออกแบบให้มีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด (rated capacity) ค่าหนึ่ง อัตราส่วนระหว่างพลังไฟฟ้าเฉลี่ย ที่โรงไฟฟ้าผลิตในช่วงเวลาหนึ่งกับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่าแฟกเตอร์ความสามารถ (capacity factor)

$$CF = \frac{P_{ave}}{P_{rated}} \tag{12.7}$$

เป็นที่น่าสังเกตว่า P_{ave} ในสมการ (12.7) หมายถึงพลังไฟฟ้าเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าซึ่งอาจไม่เท่ากับ พลังไฟฟ้าเฉลี่ยของความต้องการไฟฟ้าในระบบนอกจากนี้ P_{rated} ก็ไม่จำเป็นต้องเท่ากับ P_{max} ใน สมการ (12.6) ดังนั้นแฟกเตอร์ภาระของทั้งระบบอาจไม่เท่ากับแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้า ที่จ่ายไฟให้ระบบในกรณีที่มีโรงไฟฟ้าหลายแห่งจ่ายไฟให้ระบบ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีโรงไฟฟ้า เพียงแห่งเดียวจ่ายไฟให้ระบบ เส้นโค้งภาระของระบบและโรงไฟฟ้าจะเป็นเส้นโค้งเดียวกัน ดังนั้น P_{ave} ในสมการ (12.6) และ (12.7) จึงมีค่าเท่ากันซึ่งทำให้

$$CF = \frac{LF.P_{max}}{P_{rated}}$$
(12.8)

ตัวอย่าง เมืองหนึ่งต้องการไฟฟ้าภายในช่วงเวลาหนึ่งวันตามตารางข้างล่างนี้

เวลา (h)	0-6	6-10	10-12	12-16	16-20	20-22	22-24
ภาระ (MW)	30	70	90	60	100	80	60

ก. จงวาดเส้นโค้งภาระของในช่วงเวลาดังกล่าวและหาแฟกเตอร์ภาระของระบบ

 ข. ถ้ามีโรงไฟฟ้าเพียงแห่งเดียวจ่ายไฟฟ้าให้ระบบโดยที่กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของโรงไฟฟ้า เท่ากับ 100 MW จงหาแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าแห่งนี้

 ค. ถ้ามีโรงไฟฟ้าสองแห่งที่จ่ายไฟให้ระบบโดยโรงไฟฟ้าแห่งแรกมึกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของ โรงไฟฟ้าเท่ากับ 70 MW และจ่ายไฟให้ระบบไม่เกิน 70 MW ตลอด 24 ชั่วโมงในขณะที่โรงไฟฟ้าแห่งที่ สองมึกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 30 MW และจ่ายไฟให้ระบบเมื่อความต้องการไฟฟ้าเกิน 70 MW จงหาแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าทั้งสองแห่ง

วิธีทำ

รูปที่ 12.3 แสดงเส้นโค้งภาระของระบบ แฟกเตอร์ภาระของระบบคำนวณได้ดังนี้

$$P_{ave} = \frac{30 \times 6 + 70 \times 4 + 90 \times 2 + 60 \times 4 + 100 \times 4 + 80 \times 2 + 60 \times 2}{24}$$
$$= 65 \text{ MW}$$
$$\text{LF} = \frac{65}{100} = 0.65$$

ในกรณีที่มีโรงไฟฟ้าแห่งเดียวจ่ายไฟให้ระบบ CF = LF เนื่องจาก P_{ave} ของโรงไฟฟ้าและของ ระบบมีค่าเท่ากันและ $P_{rated} = P_{max}$ = 100 MW

ในกรณีที่มีโรงไฟฟ้าสองแห่งจ่ายไฟให้ระบบ เส้นโค้งภาระของระบบแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก อยู่ใต้เส้นประในรูปที่ 12.3 จ่ายไฟโดยโรงไฟฟ้าแห่งแรก ส่วนที่สองอยู่เหนือเส้นประจ่ายไฟโดยโรง ไฟฟ้าแห่งที่สอง แฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าแห่งแรกคำนวณได้ดังนี้

$$P_{ave,1} = \frac{30 \times 6 + 70 \times 6 + 60 \times 4 + 70 \times 6 + 60 \times 2}{24}$$

= 57.5 MW


รูปที่ 12.3: เส้นโค้งภาระในปัญหาตัวอย่าง

$$CF_1 = \frac{57.5}{70} = 0.82$$

โรงไฟฟ้าแห่งที่สองเดินเครื่องเมื่อความต้องการไฟฟ้าสูงกว่า 70 MW และนับเวลาเดินเครื่องเป็น 24 h เช่นกันแม้ว่าบางช่วงเวลาจะไม่ได้ผลิตไฟฟ้าก็ตาม ดังนั้น

$$P_{ave,2} = \frac{20 \times 2 + 30 \times 4 + 10 \times 2}{24}$$

= 7.5 MW
$$CF_2 = \frac{7.5}{30} = 0.25$$

12.3 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

ไฟฟ้าก็เหมือนกับสินค้าทั่วไปที่ต้องมีต้นทุนการผลิต ต้นทุนของค่าไฟฟ้ามาจากค่าใช้จ่ายในการ ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ต้นทุนที่แปรผันตามพลังงานไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้เรียกว่าต้นทุนผันแปร (variable cost) ส่วนต้นทุนที่ไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เรียกว่าต้นทุนคงที่ (fixed cost) ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตโดยโรงไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อโรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ในทาง ตรงข้ามต้นทุนผันแปรต่อหน่วยไฟฟ้าจะมีค่าคงที่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตโดยโรงไฟฟ้าแปรผัน ตามแฟกเตอร์ความสามารถ ดังนั้นกราฟระหว่างต้นทุนคงที่ต่อหน่วยไฟฟ้าและต้นทุนผันแปรต่อ หน่วยไฟฟ้ากับแฟกเตอร์ความสามารถจึงมีลักษณะตามรูปที่ 12.4 โปรดสังเกตว่าต้นทุนรวมต่อ หน่วยไฟฟ้าซึ่งเป็นผลรวมของต้นทุนไม่ผันแปรต่อหน่วยไฟฟ้าและต้นทุนผันแปรต่อหน่วยไฟฟ้ามี ค่าลดลงเมื่อแฟกเตอร์การะเพิ่มขึ้น



ฐปที่ 12.4: ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้ากับแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้า

กราฟระหว่างต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้ากับแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทแตก ต่างกันเนื่องจากโครงสร้างของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โครงสร้างของต้นทุนการผลิต ไฟฟ้าแบ่งเป็น ค่าเชื้อเพลิง (fuel cost) ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (operation and maintenance cost) และค่าก่อสร้าง (construction cost)

12.3.1 ค่าเชื้อเพลิง

ค่าเชื้อเพลิงจัดเป็นค่าใช้จ่ายผันแปร ค่าเชื้อเพลิงเป็นค่าใช้จ่ายหลักของโรงไฟฟ้าดีเซล โรงไฟฟ้า พลังความร้อนและโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซเนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลของโรงไฟฟ้ามีราคาแพง โรงไฟฟ้า นิวเคลียร์มีค่าเชื้อเพลิงที่ถูกกว่า โรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่มีค่าเชื้อเพลิงเลยเพราะน้ำจากเขื่อนเป็นของฟรี

ค่าเชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า (c_f) คำนวณจากค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้า (C_f) หารด้วยพลังงาน ไฟฟ้าที่ผลิตได้ (E) ถ้าหน่วยของ E คือ kJ แต่หน่วยของ c_f คือ บาทต่อหน่วยไฟฟ้า (kW.h) สูตรของ c_f คือ

$$c_f = \frac{3600C_f}{E}$$
 (12.9)

สมมุติว่าโรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ η ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ในหนึ่งปีคือ

$$E = \eta.Q \tag{12.10}$$

โดยที่ Q คือปริมาณความร้อนรวมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าความร้อนของ เชื้อเพลิง (HHV) ซึ่งมีหน่วยเป็น kJ/kg และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (m_f) ซึ่งมีหน่วยเป็น บาท/kg

$$Q = m_f.HHV \tag{12.11}$$

ตามปกติราคาเชื้อเพลิง (F_f) มีหน่วยเป็นบาทต่อกิโลกรัม ดังนั้น

$$C_f = m_f \cdot F_f \tag{12.12}$$

12.3. ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

แทนค่า E และ C_f ในสมการ (12.9)

$$c_f = \frac{3600F_f}{\eta.HHV} \tag{12.13}$$

ตัวอย่าง วิศวกรออกแบบโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งพิจารณาจัดซื้อถ่านหินจาก 4 ประเทศคือ จีน ออส-เตรเลีย อินโดนิเซียและไทยซึ่งมีราคา 1000, 1500, 1300 และ 1100 บาทต่อตันตามลำดับ ถ่านหิน จากทั้ง 4 ประเทศมีค่าความร้อนเท่ากับ 20, 22, 18 และ 15 MJ/kg ตามลำดับ อยากทราบว่าการ ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินจากประเทศใดมีค่าเชื้อเพลิงถูกที่สุด

วิธีทำ

สมมุติว่าประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าไม่ขึ้นกับชนิดของถ่านหิน สมการ (12.12) แสดงให้เห็นว่า c_f แปรผันตาม F_f/HHV ตารางข้างล่างเปรียบเทียบ F_f/HHV ของถ่านหินจาก 4 ประเทศ

ประเทศ	F_f (บาท/kg)	HHV (MJ/kg)	F_f/HHV (บาท/MJ)
จีน	1.0	20	0.050
ออสเตรเลีย	1.5	22	0.068
อินโดนิเซีย	1.3	18	0.072
ไทย	1.1	15	0.073

เพราะฉะนั้นการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินจากประเทศจีนมีค่าเชื้อเพลิงถูกที่สุด

ตัวอย่าง โรงไฟฟ้าขนาด 800 MW แห่งหนึ่งมีประสิทธิภาพ 38% และแฟกเตอร์ความสามารถ 82% โรงไฟฟ้าแห่งนี้ใช้ถ่านหินที่มีค่าความร้อน 20000 kJ/kg ถ้าต้องการให้ค่าเชื้อเพลิงไม่เกิน 0.5 บาทต่อหน่วย อยากทราบว่าถ่านหินต้องมีราคาไม่เกินเท่าไร

ี่วิธีทำ F_f คำนวณจากสมการ (12.13)

$$F_f = rac{c_f.\eta.HHV}{3600}$$

= $rac{0.5 imes 0.38 imes 20000}{3600}$
= 1.06 UNN/kg

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าเชื้อเพลิงไม่ขึ้นกับขนาดของโรงไฟฟ้าและแฟกเตอร์ความสามารถ

12.3.2 ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา

ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาประกอบด้วยค่าแรงงานในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า ค่าแรงงานส่วนใหญ่เป็นค่าจ้างบุคลากรของโรงไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ช่างเทคนิค วิศวกร เจ้าหน้าที่สำนักงาน ผู้บริหาร เป็นต้น นอกจากนี้ค่าดำเนินการและบำรุงรักษายังรวมถึงค่าอะไหล่ ค่าวัสดุซ่อมบำรุง ค่าน้ำ ค่าวัสดุในสำนักงานและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ค่าดำเนินการและบำรุงรักษามีบางส่วนเป็นค่าใช้จ่ายคงที่ และบางส่วนเป็นค่าใช้จ่ายผันแปร โรงไฟฟ้าพลังความร้อนมักค่าดำเนินการและบำรุงรักษาสูงเมื่อ เทียบกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าดีเซล

ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาต่อหน่วยไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$c_{om} = \frac{C_{om}}{E} \tag{12.14}$$

โดยที่ C_{om} คือ ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาของโรงไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาหนึ่งปีและ E ที่จำนวน หน่วยไฟฟ้าทีโรงไฟฟ้าผลิตได้ในหนึ่งปี สมมุติว่าโรงไฟฟ้าเดินเครื่อง 8760 ชั่วโมงต่อปี ปริมาณไฟฟ้า ที่ผลิตได้ในหนึ่งปีคือ

$$E = 8760 P_{ave}$$
 (12.15)

โดยที่ P_{ave} คำนวณจากสมการ (12.7) ถ้าทราบแฟกเตอร์ความสามารถและกำลังการผลิตไฟฟ้า สูงสุดของโรงไฟฟ้า ดังนั้นสมการ (12.14) กลายเป็น

$$c_{om} = \frac{C_{om}}{8760.CF.P_{rated}} \tag{12.16}$$

ตัวอย่าง โรงไฟฟ้าขนาด 600 MW มีค่าดำเนินการและบำรุงรักษารวม 500 ล้านบาทต่อปี ถ้า แฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าเท่ากับ 35% จงหาค่าดำเนินการและบำรุงรักษาต่อหน่วยไฟฟ้า

วิธีทำ

$$c_{om} = rac{500 \times 10^6}{8760 \times 0.35 \times 600 \times 10^3}$$

= 0.27 บาท/kW.h

12.3.3 ค่าก่อ**ส**ร้าง

ค่าก่อสร้างหมายถึง ค่าใช้จ่ายในการออกแบบและวางแผน ค่าที่ดิน ค่าปรับปรุงที่ดินเพื่อก่อสร้าง ค่าสิ่งปลูกสร้าง ค่าเครื่องจักร ค่าทดสอบเดินเครื่องโรงไฟฟ้าหลังสร้างเสร็จใหม่ๆ และค่าควบคุมงาน ก่อสร้าง ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ค่าก่อสร้างประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคา (depreciation) ค่าตอกเบี้ยในการกู้ยืมเงินเพื่อก่อสร้างโรงไฟฟ้า ค่าภาษี และค่าประกันภัย ค่าเสื่อมราคาหมายถึงค่า ใช้จ่ายที่สูญเสียไปในแต่ละปีกับการเสื่อมสภาพของโรงไฟฟ้า เมื่อครบอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า ซึ่งอาจกินเวลา 30-40 ปี โรงไฟฟ้าจะมีราคาน้อยกว่าเมื่อเริ่มเดินเครื่องใหม่ ราคาที่เหลืออยู่ของโรง

ไฟฟ้าเรียกว่า มูลค่าซาก (salvage value) ซึ่งมักระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า ผลต่างระหว่างมูลค่าเริ่มต้น (A) และมูลค่าซาก (G) เป็นค่าเสื่อมราคารวมของโรงไฟฟ้า ค่าเสื่อม ราคา (D) หมายถึงเงินที่ต้องเก็บออมไว้ในแต่ละปีเพื่อชดเชยมูลค่าที่สูญเสียไปของโรงไฟฟ้า ถ้าโรง ไฟฟ้ามีอายุการใช้งาน N ปีการคำนวณค่าเสื่อมราคามีสองวิธีคือ

• วิธีเส้นตรง (staight-line method) กำหนดให้คำนวณค่าเสื่อมราคาดังนี้

$$D = \frac{A - G}{N} \tag{12.17}$$

ค่าเสื่อมราคาในวิธีเส้นตรงเป็นเงินทุนที่เก็บออมทุกปีแต่ไม่มีการนำเงินทุนนี้ไปลงทุนเพื่อหา ดอกผล

• วิธีกองทุนจม (sinking-fund method) กำหนดให้คำนวณค่าเสื่อมราคาดังนี้

$$D = \frac{(A-G)i}{(1+i)^N - 1}$$
(12.18)

โดยที่ *i* คืออัตราส่วนลดหรืออัตราดอกเบี้ย ค่าเสื่อมราคาในวิธีกองทุนจมเป็นเงินทุนที่เก็บ ออมทุกปีและมีการนำเงินทุนนี้ไปลงทุนเพื่อหาดอกผล

ในแต่ละปีค่าเสื่อมราคา ค่าตอกเบี้ย ค่าภาษี และค่าประกันภัยมักระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่า ก่อสร้างโรงไฟฟ้าเรียกว่า อัตราค่าใช้จ่ายคงที่ (fixed-charge rate) ซึ่งอาจจะเท่ากันหรือแตกต่าง กันในแต่ละปีก็ได้ ถ้าค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าคือ C_c และอัตราค่าใช้จ่ายคงที่คือ I ค่าก่อสร้างต่อหน่วย ไฟฟ้ามีค่าดังนี้

$$c_c = \frac{IC_c}{8760.CF.P_{rated}} \tag{12.19}$$

โรงไฟฟ้าแต่ละประเภทจะมีค่าก่อสร้างไม่เท่ากัน กล่าวคือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์และโรงไฟฟ้าพลัง น้ำมักมีค่าก่อสร้างสูง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนมีค่าก่อสร้างน้อยกว่า ในขณะที่โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ และโรงไฟฟ้าดีเซลมีค่าก่อสร้างต่ำ ค่าก่อสร้างอาจคำนวณได้ดังนี้

$$C_c = F_c P_{rated} \tag{12.20}$$

โดยที่ F_c คือค่าก่อสร้างต่อกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไป F_c จะลดลงตามกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่ม ขึ้น ดังนั้นในแง่ของการลงทุน โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่คุ้มค่ากว่าโรงไฟฟ้าขนาดเล็กถ้าสามารถใช้งานโรง ไฟฟ้าได้เต็มที่

ตัวอย่าง โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งใช้เงินลงทุนก่อสร้าง 65 ล้านบาท โดยมีอายุการใช้งาน 15 ปี จง คำนวณหาจำนวนเงินที่จะต้องออมไว้ในแต่ละปีเพื่อเปลี่ยนอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดอายุการ ใช้งาน กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 5% และมูลค่าซากเท่ากับ 5 ล้านบาท ใช้วิธีเส้นตรงในการ คำนวณค่าเสื่อมราคา

์ วิธีทำ
เนื่องจาก
$$A = 65$$
 ล้านบาท $G = 5$ ล้านบาทและ $N = 15$ ปี ดังนั้น
$$D = \frac{65 - 5}{15}$$
$$= 4 ล้านบาทต่อปี$$

ตัวอย่าง จงคำนวณค่าก่อสร้างต่อหน่วยไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าขนาด 150 MW ที่มีค่าลงทุนก่อ สร้าง 20000 บาท/kW โดยกำหนดให้อัตราดอกเบี้ยและค่าเสื่อมราคาเป็น 10% ของเงินลงทุน โรง ไฟฟ้าแห่งนี้เป็นโรงไฟฟ้าแห่งเดียวที่จ่ายไฟให้ระบบที่มีภาระสูงสุด 120 MW และแฟกเตอร์ภาระ 50%

วิธีทำ

์ ค่าก่อสร้างรวมเท่ากับ 20000 × 150 × 10³ = 3000 ล้านบาท I = 0.1 สมการ (12.8) สามารถใช้ หาค่าแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้า

$$CF = \frac{0.5 \times 120}{150}$$
$$= 0.4$$

ดังนั้น

$$c_c = rac{0.1 imes 3000 imes 10^6}{8760 imes 0.4 imes 150 imes 10^3} = 0.57$$
 บาท/kW.h

12.3.4 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีโครงสร้างต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เส้นกราฟแต่ละเส้นในรูป ที่ 12.5 แทนต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโรงไฟฟ้าสามประเภท โรงไฟฟ้าประเภทที่ 1 มีต้นทุน ไม่ผันแปรสูงแต่ตันทุนผันแปรต่ำ ตัวอย่างของโรงไฟฟ้าประเภทที่ 1 คือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้า พลังความร้อน และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าประเภทที่ 2 มีต้นทุนไม่ผันแปรและตันทุนผันแปรต่ำ ปานกลาง ตัวอย่างของโรงไฟฟ้าประเภทที่ 2 คือ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้งานมานานและได้รับ การบำรุงรักษาอย่างดีแต่ก็ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าโรงไฟฟ้าใหม่ โรงไฟฟ้าประเภทที่ 3 มีต้นทุน ไม่ผันแปรต่ำแต่ตันทุนผันแปรสูง ตัวอย่างของโรงไฟฟ้าประเภทที่ 3 คือ โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซและโรง ไฟฟ้าดีเซล จะเห็นว่าโรงไฟฟ้าประเภทที่ 1 เหมาะกับการเดินเครื่องเต็มที่หรือตลอดเวลา (แฟกเตอร์



รูปที่ 12.5: เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าสามประเภท

ความสามารถสูง) โรงไฟฟ้าประเภทที่ 2 เหมาะกับการเดินเครื่องไม่เต็มที่หรือเดินเครื่องในช่วงเวลา ที่ไม่นานนัก (แฟกเตอร์ความสามารถปานกลาง) และโรงไฟฟ้าประเภทที่ 3 เหมาะกับการเดินเครื่อง เล็กน้อยหรือในช่วงเวลาสั้นๆ (แฟกเตอร์ความสามารถต่ำ)

ถ้านำรูปที่ 12.1 มาวาดใหม่โดยเปลี่ยนแกนนอนเป็น % ของช่วงเวลาและเรียงลำดับค่าความ ต้องการใช้ไฟฟ้าจากมากไปหาน้อยจะได้เส้นโค้งการกระจายภาระ (load distribution curve) ดัง แสดงในรูปที่ 12.6 เส้นโค้งนี้แสดงให้เห็นว่าภาระความต้องการไฟฟ้าอาจแบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรก คือ ภาระหลัก (base load) ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์ภาระสูง ส่วนที่สองคือ ภาระเสริม (intermediate load) ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์ภาระปานกลาง ส่วนที่สามคือ ภาระสูงสุด (peak load) ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์ภาระต่ำ



รูปที่ 12.6: เส้นโค้งการกระจายภาระ

ในกรณีที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าจากตามรูปที่ 12.6 การเลือกใช้โรงไฟฟ้าสามประเภทผลิต ไฟฟ้าร่วมกันจะส่งผลให้ต้นทุนรวมต่อหน่วยมีค่าต่ำสุด กล่าวคือ โรงไฟฟ้าประเภทที่ 1 เหมาะกับ การผลิตไฟฟ้าสำหรับภาระส่วนฐานเนื่องจากรูปที่ 12.5 แสดงให้เห็นว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของ โรงไฟฟ้าประเภทที่ 1 มีค่าต่ำสุดเมื่อแฟกเตอร์ภาระมีค่าสูง ในทำนองเดียวกันโรงไฟฟ้าประเภทที่ 2 เหมาะกับการผลิตไฟฟ้าสำหรับภาระส่วนกลางและโรงไฟฟ้าประเภทที่ 3 เหมาะกับการผลิตไฟฟ้า สำหรับภาระส่วนยอด โรงไฟฟ้าประเภทที่ 1, 2 และ 3 จึงเรียกว่าโรงไฟฟ้าภาระหลัก โรงไฟฟ้าภาระ เสริมและโรงไฟฟ้าภาระสูงสุดตามลำดับ ซึ่งทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งสามหน่วยควรมีลักษณะดังนี้

- โรงไฟฟ้าภาระหลักควรใช้เชื้อเพลิงราคาถูก มีค่าใช้จ่ายต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง อย่างไร ก็ตามค่าก่อสร้างอาจแพงและใช้เวลาก่อสร้างนาน โรงไฟฟ้าแบบนี้มักเป็นใช้พลังความร้อนที่ ได้จากจากถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- โรงไฟฟ้าภาระ เสริม ควรมีขนาด เล็กกว่าโรงไฟฟ้าหลัก อาจ เป็นโรงไฟฟ้าเก่าที่เคย เป็นโรง ไฟฟ้าหลัก ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าภาระเสริมจะต่ำกว่าของโรงไฟฟ้าภาระหลัก นอกจาก นี้ค่าใช้จ่ายจะสูงกว่าเนื่องจากความต้องการการบำรุงรักษาที่มากกว่า
- โรงไฟฟ้าภาระสูงสุดควรมีค่าก่อสร้างต่ำ สร้างเสร็จเร็ว แต่มักมีค่าเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่าย สูง ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าภาระสูงสุดมักจะต่ำ แต่มันสามารถตอบสนองความต้องการ ไฟฟ้าได้เร็ว หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบนี้มักทำงานด้วยกังหันก๊าซโดยใช้ก๊าซธรรมชาติ และเครื่อง ยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันดีเซล เป็นที่น่าสังเกตว่าเชื่อนมีหน้าที่อื่นนอกเหนือจากผลิตไฟฟ้า จึง อาจไม่เหมาะสมที่จะใช้โรงไฟฟ้าพลังน้ำเป็นอาจใช้เป็นโรงไฟฟ้าภาระหลัก แต่อาจเหมาะ สมที่จะเป็นใช้โรงไฟฟ้าภาระสูงสุดมากกว่าซึ่งประเทศไทยก็นิยมใช้โรงไฟฟ้าพลังน้ำเป็นโรง ไฟฟ้าภาระสูงสุด

12.3.5 อัตราค่าไฟฟ้า

ธุรกิจไฟฟ้าในประเทศไทยมีลักษณะพิเศษที่เป็นธุรกิจผูกขาด แม้ว่าการผลิตไฟฟ้าโดยภาค เอกชนมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นในปัจจุบันเมื่อเทียบกับอดีต แต่การจำหน่ายไฟฟ้ายังคงเป็นธุรกิจที่จำกัด ให้รัฐวิสาหกิจสองแห่งคือ การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การตั้งอัตราค่าไฟฟ้าโดย รัฐวิสาหกิจทั้งสองแห่งนี้มีการควบคุมโดยรัฐบาลเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ต่อไปนี้

- เพื่อให้อัตราค่าไฟฟ้าสะท้อนถึงต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด และเพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะส่งเสริมให้มีการใช้ไฟฟ้าน้อยลง ในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้า สูงสุดของระบบไฟฟ้าซึ่งจะช่วยลดการลงทุนในการผลิตและการจัดจำหน่ายไฟฟ้าได้ในระยะ ยาว
- เพื่อให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีฐานะการเงินที่ มั่นคง และสามารถขยายการดำเนินงานในอนาคต ได้อย่างเพียงพอ
- เพื่อให้ความเป็นธรรมแก่ผู้ใช้ไฟประเภทต่าง ๆ มากขึ้น โดยการลดการอุดหนุนค่าไฟฟ้าจากผู้ ใช้ไฟกลุ่มหนึ่ง โดยผู้ใช้ไฟฟ้าอีกกลุ่ม
- เพื่อให้การปรับอัตราค่าไฟฟ้ามีความคล่องตัว และเป็นไปโดยอัตโนมัติสอดคล้องกับราคา เชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะตลาดที่มีการแข่งขันมากขึ้น

วัตถุประสงค์ทั้งสี่ประการทำให้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยค่อนข้างซับซ้อน ผู้ อ่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดได้ที่เว็บไซต์ของการไฟฟ้านครหลวง (http://www.mea.or.th) และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (http://www.pea.or.th) แต่จะไม่กล่าวในที่นี้ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจว่า โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้ามีลักษณะดังต่อไปนี้

- ผู้ใช้ไฟฟ้าถูกแบ่งเป็นเจ็ดประเภทคือ (1) บ้านอยู่อาศัย (2) กิจการขนาดเล็ก (3) กิจการขนาด กลาง (4) กิจการขนาดใหญ่ (5) กิจการเฉพาะอย่าง (หมายถึงโรงแรมและหอพัก) (6) ส่วน ราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร และ (7) การสูบน้ำเพื่อการเกษตร อัตราค่าไฟฟ้าของผู้ ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทอาจแตกต่างกันได้
- อัตราค่าไฟฟ้าเป็นอัตราก้าวหน้า กล่าวคือผู้ใช้ไฟฟ้าในปริมาณน้อยจะเสียค่าไฟฟ้าในอัตราที่ ต่ำกว่าผู้ใช้ไฟฟ้าในปริมาณมาก
- อัตราค่าไฟฟ้าแบ่งเป็นสามส่วนคือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (energy charge) ซึ่งเป็นอัตราค่าไฟฟ้า ต่อหน่วย (kW.h) และค่าพลังไฟฟ้า (demand charge) ซึ่งเป็นอัตราค่าไฟฟ้าต่อค่าภาระ เฉลี่ยสูงสุดในช่วงเวลา 15 นาที และค่าบริการรายเดือน ค่าพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าใช้จ่าย ผันแปรของโรงไฟฟ้า ในขณะที่ค่าพลังไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าใช้จ่ายคงที่
- เพื่อให้เป็นไปตามกฏของอุปสงค์และอุปทาน (supply and demand) ค่าพลังงานไฟฟ้าใน ช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก (peak period) ถูกกำหนดให้สูงค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้ ไฟฟ้าน้อย (off-peak period) ช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามากอยู่ระหว่าง 9.00 ถึง 22.00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์
- เพื่อส่งเสริมให้ใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ได้มีการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการ ใช้ (time of use หรือ TOU) เป็นทางเลือกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า อัตราค่าไฟฟ้าแบบบนี้จะช่วย ให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนเวลาใช้ไฟฟ้าจากช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามากเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้ ไฟฟ้าน้อยโดยไม่เปลี่ยนปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

คำถามท้ายบท

- 1. ต้นทุนผลิตไฟฟ้าอาจแบ่งเป็น 3 ส่วน จงระบุว่ามีอะไรบ้าง
- 2. อธิบายความหมายของต้นทุนคงที่
- 3. โรงไฟฟ้าภาระหลักควรมีลักษณะอย่างไร
- 4. โรงไฟฟ้าประเภทใดในประเทศไทยที่ไม่มีต้นทุนด้านเชื้อเพลิงเลย
- 5. ทำไมโรงไฟฟ้าพลังความร้อนจึงไม่เหมาะกับการใช้เป็นโรงไฟฟ้าภาระสูงสุด
- 6. ทำไมแฟกเตอร์ภาระต่ำ ๆ จึงเป็นสิ่งที่ไม่ดี
- ทำไมโรงไฟฟ้าทั่วไปจึงมีหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดย่อยหลายหน่วยแทนที่จะมีหน่วยผลิตไฟฟ้า ขนาดใหญ่เพียงหน่วยเดียว
- 8. อธิบายอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้หรือ TOU
- ค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งเท่ากับ 50 บาท/GJ ในปีแรก ค่าเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น 5% ทุกปี ในปีที่ 2 ถึง 5 ถ้าอัตราส่วนลดเท่ากับ 5% จงหามูลค่าปัจจุบันของค่าเชื้อเพลิงในช่วง 5 ปี
- โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งมีค่าก่อสร้าง 6000 ล้านบาท หลังจากสร้างเสร็จโรงไฟฟ้าแห่งนี้จะมีกำไร
 500 ล้านบาทต่อปีเริ่มตั้งแต่หนึ่งปีหลังจากสร้างเสร็จ ถ้าอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้าคือ 30 ปี จงหาอัตราผลตอบแทนภายใน (internal return rate)
- 11. โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งมีกำลังการผลิต 800 MW และเป็นโรงไฟฟ้าแห่งเดียวที่จ่ายไฟฟ้าให้ระบบ ที่มีภาระสูงสุด (peak load) เท่ากับ 750 MW ถ้าโรงไฟฟ้าเดินเครื่องปีละ 8760 ชั่วโมงและ ผลิตไฟฟ้าได้ 5 พันล้านหน่วย จงหาแฟกเตอร์ความสามารถ (capacity factor) ของโรงไฟฟ้า
- 12. โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งมีประสิทธิภาพรวม 42% ใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 22000 kJ/kg โดย เชื้อเพลิงมีราคา 1500 บาทต่อตัน จงหาต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า
- 13. ต้นทุนค่าดำเนินการและบำรุงรักษาของโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งเท่ากับ 0.31 บาทต่อหน่วย โรง ไฟฟ้าแห่งนี้กำลังการผลิต 700 MW เดินเครื่อง 8600 ชั่วโมงต่อปีและมีแฟกเตอร์ความสา-มารถ 45% อยากทราบว่า โรงไฟฟ้าแห่งนี้ต้องจ่ายค่าดำเนินการและบำรุงรักษาเท่าไรในหนึ่ง ปี
- 14. โรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งใช้เงินลงทุนสร้าง 800 ล้านบาทและมีอายุการใช้งาน 20 ปี จงคำนวณหา จำนวนเงินที่ต้องออมในแต่ละปีเพื่อเปลี่ยนอุปกรณ์เครื่องจักรของโรงไฟฟ้าเมื่อสิ้นอายุการ ใช้งาน กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 4% และมูลค่าซาก (salvage value) เท่ากับ 60 ล้าน บาท กำหนดให้ใช้วิธีคิดค่าเสื่อมราคาแบบกองทุนจม (sinking-fund method)

12.3. ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าขนาด 450 MW แห่งหนึ่งมีค่าก่อสร้าง 18000 บาท/kW โรงไฟฟ้ามีกำหนดเดินเครื่อง
 24 ชั่วโมงต่อวันและ 365 วันต่อปี กำหนดให้อัตราค่าใช้จ่ายคงที่เท่ากับ 9% จงคำนวณต้นทุน
 ค่าก่อสร้างต่อหน่วยไฟฟ้าถ้าแฟกเตอร์ความสามารถของโรงไฟฟ้าคือ 37%

บทที่ 12. เศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า

บรรณานุกรม

- [1] E. A. Avallone and T. Baumeister III, Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw-Hill, 1986.
- [2] D. Gunn and R. Horton, Indusrial Boilers, Longman, 1989.
- [3] A. F. Fraas, Heat Exchanger Design, Wiley-Interscience, 1989.
- [4] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. B: Boilers and Ancillary Plant (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [5] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. C: Turbines, Generators and Associated Plant (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [6] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. E: Chemistry and Metallurgy (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [7] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. F: Control and Instrumentation (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [8] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. G Station Operation and Maintenance (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [9] British Electricity International Ltd., Modern Power Station Practice, Vol. J Nuclear Power Generation (Third Edition), Pergamon Press, 1991.
- [10] Black & Veatch, Power Plant Engineering, Chapman & Hall, 1996.
- [11] P. K. Nag, Power Plant Engineering: Steam and Nuclear, Tata McGraw-Hill, 1998.
- [12] T. Kuppan, Heat Exchanger Design Handbook, Marcel Dekker, 2000.
- [13] K. Rayaprolu, Boilers for Power and Process, CRC Press, 2009.
- [14] R. L. Murray, Nuclear Energy, Elsevier, 2009.
- [15] J. Cheng, Biomass to Renewable Energy Processes, CRC Press, 2010.