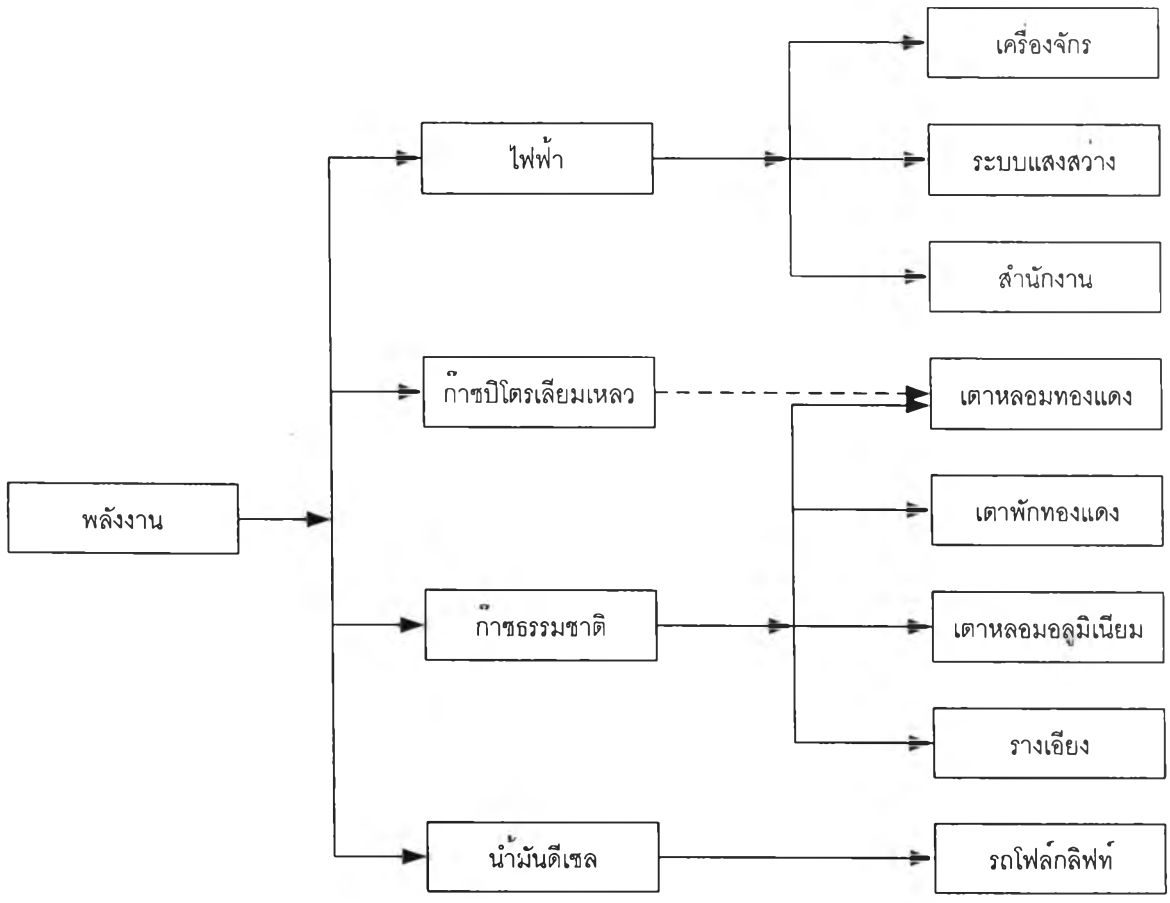
บทที่ 4

เตาหลอมทองแดงและระบบการหลอมทองแดง

4.1 การใช้พลังงานภายในโรงงาน

โรงงานมีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ พลังงานไฟฟ้า ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล ซึ่งมีการใช้ในส่วนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.1 และปริมาณการใช้พลังงานแต่ละชนิดของโรงงานแสดงในตารางที่ 4.1 โดยปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมทองแดง เตาพักทองแดง และผลผลิตลวดทองแดงของโรงงานแสดงในตารางที่ 4.2 และปริมาณผลผลิตของโรงงานในปี 2545 แสดงในตารางที่ 4.3 – 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การใช้พลังงานของโรงงาน

ตารางที่ 4.1 การใช้พลังงานของโรงงานในปี 2545

เดือน	ปริมาณการใช้การใช้พลังงานแต่ละชนิด						
	ไฟฟ้าที่ซื้อ	On Peak	Partial Peak	Off Peak	LPG	NG	น้ำมันดีเซล
	(10^3 KW-h)	(KW)	(KW)	(KW)	(ton)	(MMBTU)	(10^3 litres)
มกราคม	843	1,770	4,110	4,080	44.54	2,916.33	0.005
กุมภาพันธ์	1,116	2,130	4,260	4,170	108.95	4,498.47	0.005
มีนาคม	1,373.7	2,460	4,500	4,650	85.33	7,098.05	0.005
เมษายน	1,461.6	2,130	2,520	2,190	-	6,464.26	0.005
พฤษภาคม	1,248.9	2,490	4,710	4,500	118.83	7,243.14	0.005
มิถุนายน	976.2	2,310	2,580	4,500	-	3,757.74	0.005
กรกฎาคม	939	1,740	3,960	3,900	48	5,416.8	0.005
สิงหาคม	827.7	2,130	3,690	2,040	0.3	754.49	0.005
กันยายน	1,363.5	2,490	5,280	4,020	53.55	10,228.57	0.005
ตุลาคม	1,086	2,310	4,470	4,290	39.93	2,879.12	0.005
พฤศจิกายน	986.63	1,710	4,170	3,960	41.87	4,015.39	0.005
ธันวาคม	960.62	2,490	4,710	4,440	21.81	6,197.24	0.005
ค่าความร้อนเฉลี่ย (MJ/Unit)	3,600				50,220	1,055	36,420
ความร้อนรวม (10^3 MJ)	47,458.26				28,279.38	64,853.43	2.18

ตารางที่ 4.2 การใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมทองแดง เตาพักทองแดง และผลผลิตลวดทองแดงของโรงงาน ในปี 2544

ปริมาณการใช้ก๊าซ LPG และ NG ของส่วนผลิตลวดทองแดงในปี 2544			ปริมาณการผลิตลวดทองแดงขนาด 8.00 mm และ 12.4 mm. ในปี 2544
เดือน	LPG	NG	
	(kg)	(Nm^3)	(ตัน)
มกราคม	55,080	112,030	1,111.87
กุมภาพันธ์	94,370	128,358	2,648.79
มีนาคม	21,120	41,515	574.83
เมษายน	41,140	84,835	920.48
พฤษภาคม	87,020	93,481	2,545.15
มิถุนายน	30,220	48,814	768.55
กรกฎาคม	53,610	110,894	1,484.23
สิงหาคม	74,580	90,977	2,221.22
กันยายน	10,820	26,079	204.65
ตุลาคม	101,280	137,573	2,025.08
พฤศจิกายน	58,032	101,910	1,991.08
ธันวาคม	54,790	75,259	1,315.79

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลผลิตลวดทองแดงและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2544

เดือน	ปริมาณผลผลิต (Ton)	ชั่วโมงการทำงาน (hr)
มกราคม	474.88	17
กุมภาพันธ์	1,312.4	144
มีนาคม	1,321.85	56
เมษายน	-	-
พฤษภาคม	1,650.65	94
มิถุนายน	-	-
กรกฎาคม	1,408.27	51
สิงหาคม	-	-
กันยายน	1,332.89	87
ตุลาคม	1,271.26	73
พฤศจิกายน	1,109.63	120
ธันวาคม	960.62	58
รวม	10,842.45	700

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลผลิตลวดอลูมิเนียมและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2544

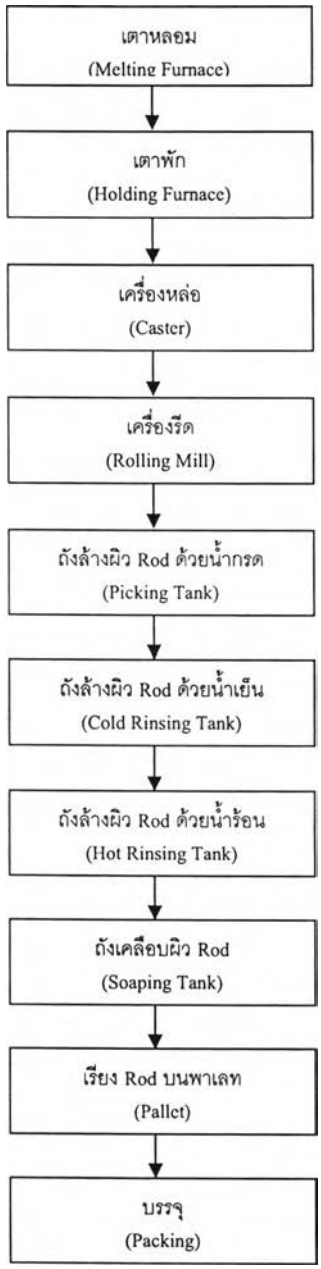
เดือน	ปริมาณผลผลิต (Ton)	ชั่วโมงการทำงาน (hr)
มกราคม	327.09	115
กุมภาพันธ์	560.16	170
มีนาคม	1,301.43	389
เมษายน	1,389.13	279
พฤษภาคม	1,233.07	399
มิถุนายน	876.97	263
กรกฎาคม	632.24	197
สิงหาคม	202.51	66
กันยายน	1,475.39	481
ตุลาคม	208.3	72
พฤศจิกายน	577.96	185
ธันวาคม	1,177.75	420
รวม	9,962	3,036

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลผลิตลวดอลูมิเนียมและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2545

เดือน	ปริมาณผลผลิต (Ton)	ชั่วโมงการทำงาน (hr)
มกราคม	562.83	302
กุมภาพันธ์	478.34	261
มีนาคม	1,469.65	311
เมษายน	930.13	164
พฤษภาคม	1,328.93	306
มิถุนายน	834.17	394
กรกฎาคม	558.21	295
สิงหาคม	764.56	343
กันยายน	655.49	286
ตุลาคม	724.47	229
พฤศจิกายน	687.06	395
ธันวาคม	632.23	260
รวม	9,626.07	3,546

4.2 กระบวนการผลิตเส้นลวดทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด มีขั้นตอนและกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีภาพประกอบดังแสดงในรูปที่ 4.3



แผ่นทองแดง (Cathode) หรือท่อนทองแดงและเศษทองแดงที่ไม่ได้มาตรฐานจากกระบวนการผลิต ถูกนำเข้าสู่เตาหลอมโดยสายพานลำเลียง และทองแดงจะถูกทำให้หลอมโดยหัวเผาทั้งหมด 26 หัว ด้วยกำลังการผลิต 25 ตัน/ชั่วโมง

น้ำทองแดงที่ได้จากเตาหลอมจะไหลเข้ามาเก็บไว้ในเตาพัก เพื่อปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการหล่อคือระหว่าง 1120 – 1150 °C

เครื่องหล่อจะทำการหล่อทองแดงจากเตาพักให้เป็นท่อนหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 80x60 มม. โดยทำการหล่อต่อเนื่องด้วยความเร็วในการหล่อ 10.5 m/min

ท่อนหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ได้จะผ่านเข้าเครื่องรีดซึ่งมีทั้งหมด 14 ชุด และจะทำการรีดท่อนทองแดงให้เป็นเส้นลวดจากชุดที่ 1 ถึง ชุดที่ 14 ซึ่งจะได้เส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ออกมาขนาด 8 มม.

Rod ที่ออกมาจากเครื่องรีดจะผ่านการล้างผิวด้วยน้ำกรด (H_2SO_4) ความเข้มข้น 20 %

Rod ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกรดแล้วจะถูกล้างด้วยน้ำเย็นที่ถังน้ำเย็น

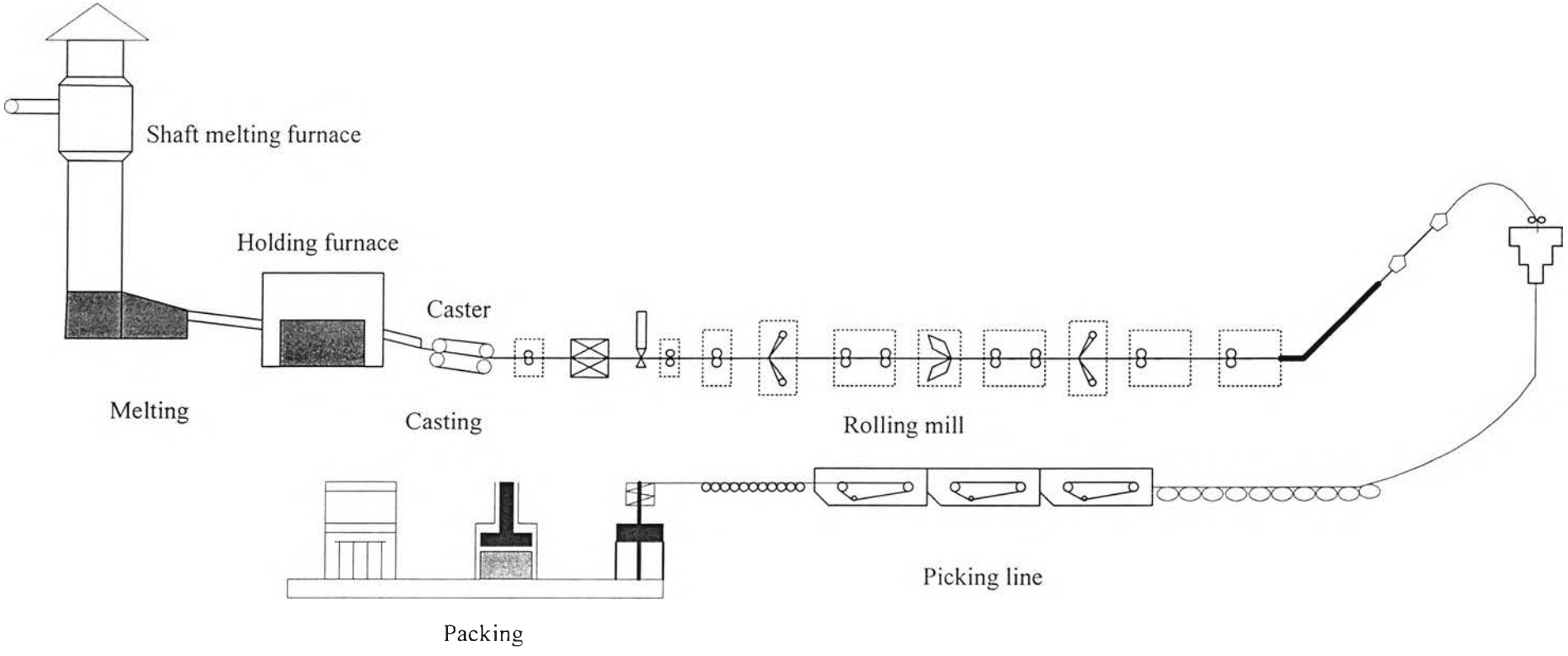
Rod ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำเย็นแล้วจะถูกล้างด้วยน้ำร้อนที่ถังน้ำร้อน

Rod ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้วจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ถังเคลือบผิวเพื่อกันการเกิด Oxide ที่ผิว

Rod ที่ผ่านการเคลือบผิวจะถูกทำให้แห้งด้วย Blower ก่อนที่จะโรยตัวลงบนพาเลทที่เตรียมไว้จนได้น้ำหนัก 3.5 ตัน

เมื่อได้น้ำหนักตามที่กำหนดพาเลทก็จะเคลื่อนตัวลงโดยใช้เวลาเป็นตัวกำหนดและจะเคลื่อนตัวออกและทำการบรรจุ

รูปที่ 4.2 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตลวดทองแดง



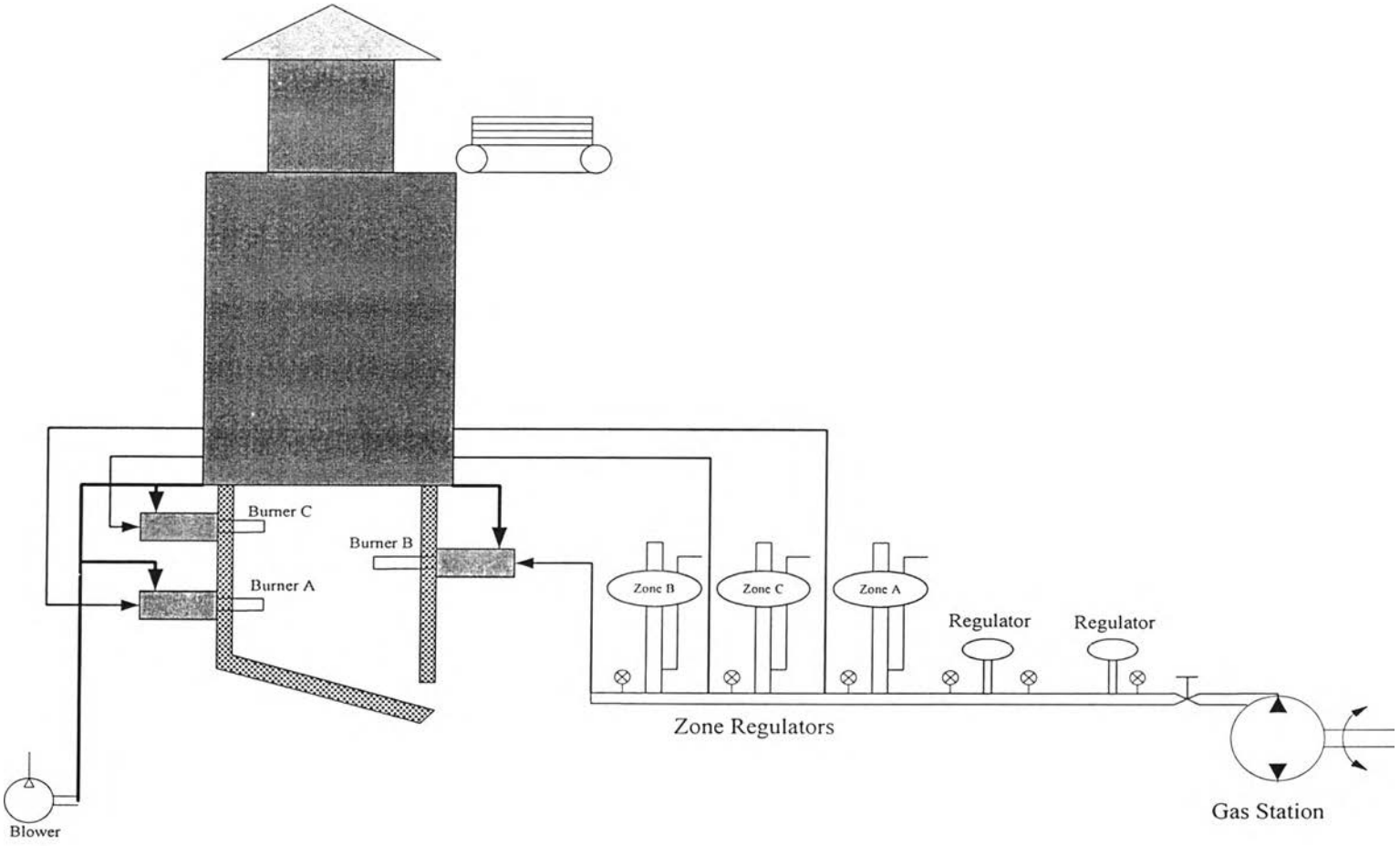
รูปที่ 4.3 กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

4.3 เตาหลอมทองแดง (Shaft melting furnace)

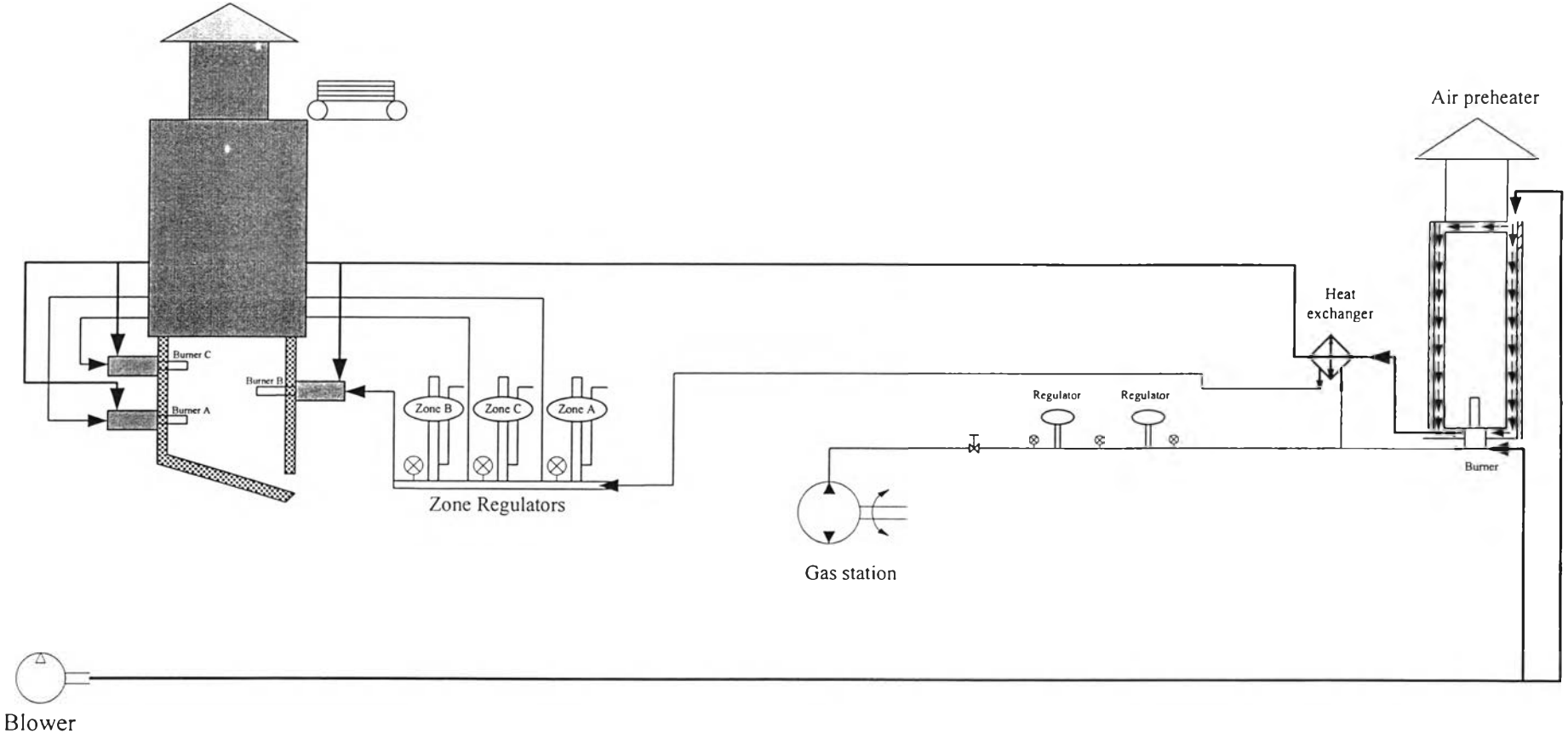
เตาหลอมทองแดงที่ใช้ในบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด เป็นเตาหลอมทรงกระบอกวางในแนวตั้งโดยมีหัวเผาแบบที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงติดตั้งรอบเตา มีหัวเผาทั้งหมด 3 แถว แถวล่างสุด (แถว A) มีหัวเผาทั้งหมด 8 หัว แถวกลาง (แถว B) มีหัวเผา 9 หัว และแถวบนสุด (แถว C) มีหัวเผา 9 หัว รวมทั้งหมดเป็น 26 หัว โดยทั่วไปแล้วเตาหลอมนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการหลอมแผ่นทองแดง (Cathode) หรือท่อนทองแดง (Bar) รวมทั้งลวดทองแดง (Rod) ได้อย่างต่อเนื่อง โดยตัวเตาต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย มีรูปแบบการทำงานง่าย รวมทั้งให้ความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนสูง การสตาร์ทและหยุดเตาทำได้รวดเร็ว สามารถควบคุมการทำงานและปรับอัตราการหลอมได้ง่าย

การเผาไหม้ภายในเตาหลอมทองแดงชนิดนี้เกิดจากหัวเผาที่อยู่รอบเตาทั้ง 26 หัวถ่ายเทพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ให้กับทองแดงที่อยู่ภายในเตา ทำให้ทองแดงหลอมเหลว ขนาดของเปลวไฟสั้นและสะดวกต่อการควบคุมเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งจะช่วยป้องกันออกซิเจนที่อาจเจือปนในน้ำทองแดง เพราะในกระบวนการผลิตต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในลวดทองแดงให้ได้ตามมาตรฐานคุณภาพตามที่โรงงานกำหนด (น้อยกว่า 250 ppm)

เนื่องจากเตาหลอมถูกออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยการอุ่นอากาศ จึงช่วยให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและความสามารถในการผลิต (Capacity) สูงขึ้น รูปที่ 4.4 แสดงเตาหลอมทองแดงก่อนที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ และรูปที่ 4.5 แสดงเตาหลอมทองแดงหลังจากที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ



รูปที่ 4.4 เตาหลอมทองแดงก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ



รูปที่ 4.5 เตาหลอมทองแดงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์เครื่องจักรก่อนทำการหลอม

1. เตรียมไม้สนสำหรับลดออกซิเจนในน้ำทองแดง
2. เตรียมท่อนทองแดงเพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำทองแดงที่สูงเกินไปก่อนทำการหลอม
3. เตรียมท่อเหล็กสำหรับเป่ากรณีที่เกิดการอุดตันของทองแดง
4. เตรียมออกซิเจน
5. ตรวจสอบการชำรุดเสียหายของเครื่องจักร
6. เตรียมหัววัดอุณหภูมิและหัววัดออกซิเจนในน้ำทองแดง
7. เตรียมและตรวจสอบเครื่องวัดค่า CO
8. ตรวจสอบการทำงานของเครื่อง Multi Lab. ที่ใช้ในการแสดงค่าอุณหภูมิและค่าออกซิเจนในน้ำทองแดง
9. เตรียมระบบเตาพัก และตรวจสอบอิฐปากเตาและภายในเตา
10. เตรียม Launder และตรวจสอบสภาพอิฐ
11. เตรียมเตาหลอมทองแดงและตรวจสอบสภาพอิฐในเตาและการขวางปากเตาของทองแดง

4.3.2 ขั้นตอนการสตาร์ทเตาพัก (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ)

1. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นจนความดันของปั๊มอยู่ที่ประมาณ 16 – 41 psig
2. ตรวจสอบความดันของก๊าซที่ท่อประธาน โดยที่ความดันของก๊าซอยู่ที่ประมาณ 120 – 130 psig
3. ตรวจสอบความดันก๊าซหลังจากผ่านอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ (Regulator) โดยต้องมีความดันอยู่ที่ประมาณ 30 – 35 psig
4. เปิดวาล์วท่อก๊าซเข้าสู่เตาพักทุกตัว
5. เปิดปากเตาด้านหน้าและด้านหลังออก
6. เปิดวาล์วก๊าซก่อนและหลังอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซเพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบ
7. เปิด Blower โดยทำการกดปุ่มหมายเลข 10
8. กดปุ่มเครื่องหมาย "+" ของเครื่อง E-MAX (หมายเลข 5) จนกระทั่งความดันอากาศของหัวเผาตัวที่ 1 ประมาณ 50 – 80 WC (หมายเลข 2)
9. รอประมาณ 3 – 4 นาทีจนกระทั่งมีเสียงสัญญาณดัง
10. กดปุ่มเครื่องหมาย "–" ของเครื่อง E-MAX (หมายเลข 5) จนกระทั่งความดันอากาศของหัวเผาตัวที่ 1 (หมายเลข 2) ลดลงถึง 18 – 20 WC
11. กดปุ่มสตาร์ท 1 (หมายเลข 11) พร้อมกับสับ Safety valve ของก๊าซพร้อมกันทั้ง 2 ตัว จนกระทั่งหัวเผาติดแล้วสัญญาณก็จะดับ

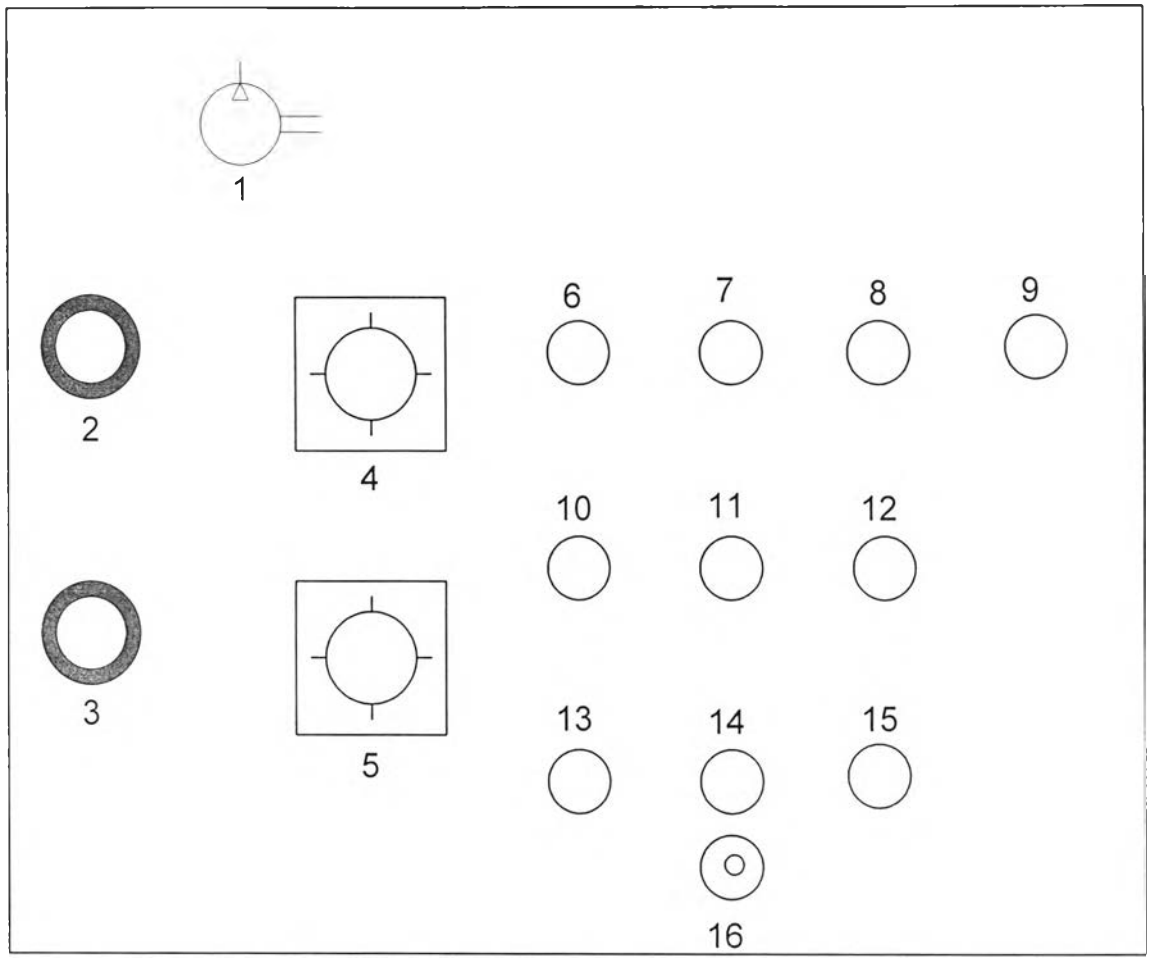
12. หลังจากที่หัวเผาติดแล้วให้เพิ่มความดันอากาศของหัวเผาตามสภาพการเผาไหม้โดยทำการกดปุ่มเครื่องหมาย "+" หรือ "–" ของเครื่อง E-MAX (หมายเลข 5)
13. ทำการตรวจสอบค่า CO เพื่อตรวจสภาพการเผาไหม้เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดคือมีค่าประมาณ 1.80 – 3.00 %Vol.
14. ในกรณีที่ต้องสตาร์ทหัวเผาตัวที่ 2 ทำได้โดย
    1. หมุนสวิตช์สตาร์ท 2 ไปที่ตำแหน่ง "ON"
    2. เปิดลมโดยการปรับที่โซ่ตามลักษณะการเผาไหม้
    3. ตรวจสอบค่า CO

4.3.3 ขั้นตอนการหยุดเตาพัก

1. ปรับความดันอากาศของหัวเผาตัวที่ 1 หรือตัวที่ 2 โดยกดปุ่มที่มีเครื่องหมาย "–" ของเครื่อง E-MAX โดยให้มีความดันอยู่ที่ประมาณ 20 -30 WC
2. ปิดสวิตช์ Inter lock (หมายเลข 18) ไปที่ตำแหน่ง "OFF"
3. กดปุ่ม "Fuel stop"เพื่อปิดการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผา
4. ปิดวาล์วก๊าซที่เข้าสู่เตาพักทั้งหมด
5. กดปุ่มที่มีเครื่องหมาย "+" ของเครื่อง E-MAX เพื่อปรับความดันอากาศของหัวเผาตัวที่ 1 ให้มีความดันประมาณ 70 – 80 WC รอจนกระทั่งอิฐเตาพักเริ่มมีสีดำ
6. กดปุ่ม "Blower stop" เพื่อหยุดการจ่ายลม (หมายเลข 7)
7. ตรวจสอบสภาพทั่วไปของเตาพัก สภาพหัวเผา และ Slag ในเตาพัก

หมายเหตุ กรณีที่มีการหลอมต่อเนื่องโดยไม่หยุดเตาพักให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. กดปุ่มที่มีเครื่องหมาย "+" ของเครื่อง E-MAX (หมายเลข 13) เพื่อให้ความดันอากาศของหัวเผาตัวที่ 1 (หมายเลข 2) มีความดันอยู่ที่ประมาณ 20 – 40 WC
2. ทำการปิดลมของหัวเผาตัวที่ 2 โดยการดึงโซ่ปรับอากาศที่หัวเผานั้นให้ปิดสนิท
3. ปิดวาล์วก๊าซ (หมายเลข 21) มาอยู่ที่ตำแหน่ง "OFF"



หมายเลข 1	Holding blower AMP	หมายเลข 2	Air pressure burner NO. 1
หมายเลข 3	Air pressure burner NO. 2	หมายเลข 4	Recorder
หมายเลข 5	E-MAX	หมายเลข 6	Blower fault
หมายเลข 7	Blower run	หมายเลข 8	Burner NO. 1
หมายเลข 9	Burner NO. 2	หมายเลข 10	Blower start
หมายเลข 11	Start 1	หมายเลข 12	Start 2
หมายเลข 13	Blower stop	หมายเลข 14	-
หมายเลข 15	Lamp test	หมายเลข 16	E-Stop

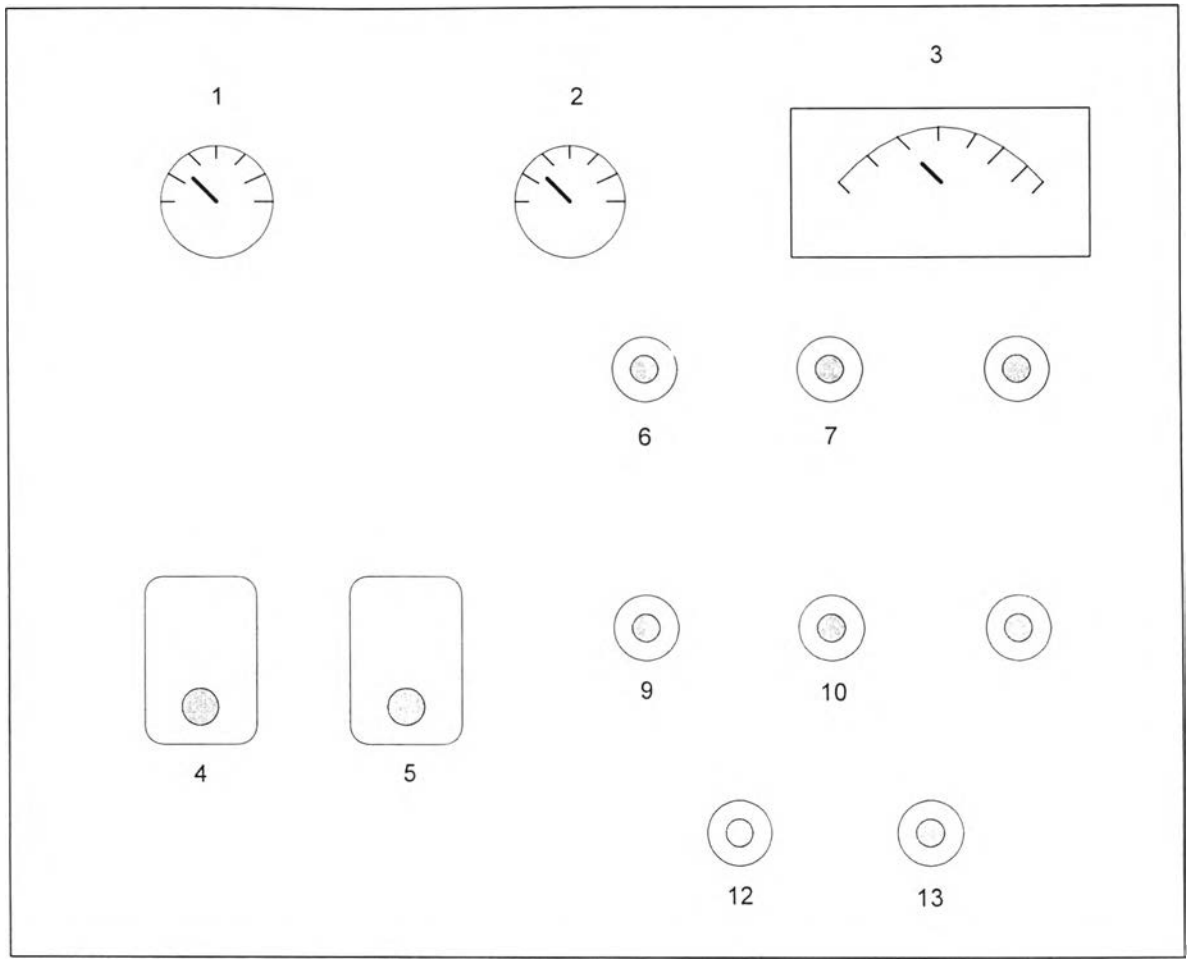
รูปที่ 4.6 ระบบควบคุมเตาพักทองแดง

4.3.4 ขั้นตอนการสตาร์ท Launder (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)

1. ตรวจสอบความดันก๊าซในให้อยู่ที่ประมาณ 30 – 35 psig
2. ตรวจสอบตำแหน่งวาล์วก๊าซของหัวเผาทุกหัวว่าอยู่ในตำแหน่ง ปิด
3. หมุนคลายสวิตช์ "Blower stop" (หมายเลข 9)
4. เปิด Blower โดยทำการกดปุ่ม "Blower start" (หมายเลข 6)
5. ปรับความดันก๊าซที่หัวเผาของ Launder (หมายเลข 4, 5) ให้มีความดันประมาณ 1 – 1.5 psig
6. เปิดวาล์วก๊าซเข้าสู่ Launder
7. เปิด Safety valve
8. เปิดวาล์วก๊าซ By pass
9. เปิดวาล์วก่อนและหลังอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซที่เข้าสู่ Launder
10. ใช้ไฟจุดหัวเผาที่ต้องการใน Launder
11. ปรับสภาพการเผาไหม้ของหัวเผาโดยสังเกตจากเปลวไฟ โดยที่เปลวไฟควรที่จะเป็นสีฟ้า
12. ปรับความดันก๊าซของหัวเผาใน Launder ให้มีความดันประมาณ 2 – 3 psig (หมายเลข 4, 5)

4.3.5 ขั้นตอนการหยุด Launder หลังการหยุดหลอม

1. ตักน้ำทองแดงในบ่อพักของ Launder ออกให้หมด
2. ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงโดยกดปุ่ม "Launder fuel stop" (หมายเลข 12, 13)
3. ปิดวาล์วก๊าซที่เข้าสู่ Launder และที่หัวเผาทั้งหมด
4. ปิดลมโดยกดปุ่ม "Blower stop" (หมายเลข 9)
5. ตรวจสอบสภาพของอิฐรอบ Launder และการอุดดันของหัวเผา



หมายเลข 1 Upper launder burner control หมายเลข 2 Lower launder burner control

หมายเลข 3 Launder blower AMP หมายเลข 4 NO.1 Launder air burner pressure

หมายเลข 5 NO.2 Launder air burner pressure หมายเลข 6 Blower start

หมายเลข 7 Upper Launder หมายเลข 8 Lower launder

หมายเลข 9 Blower stop หมายเลข 10 Gas valve open

หมายเลข 11 Gas valve latch หมายเลข 12 Upper launder fuel stop

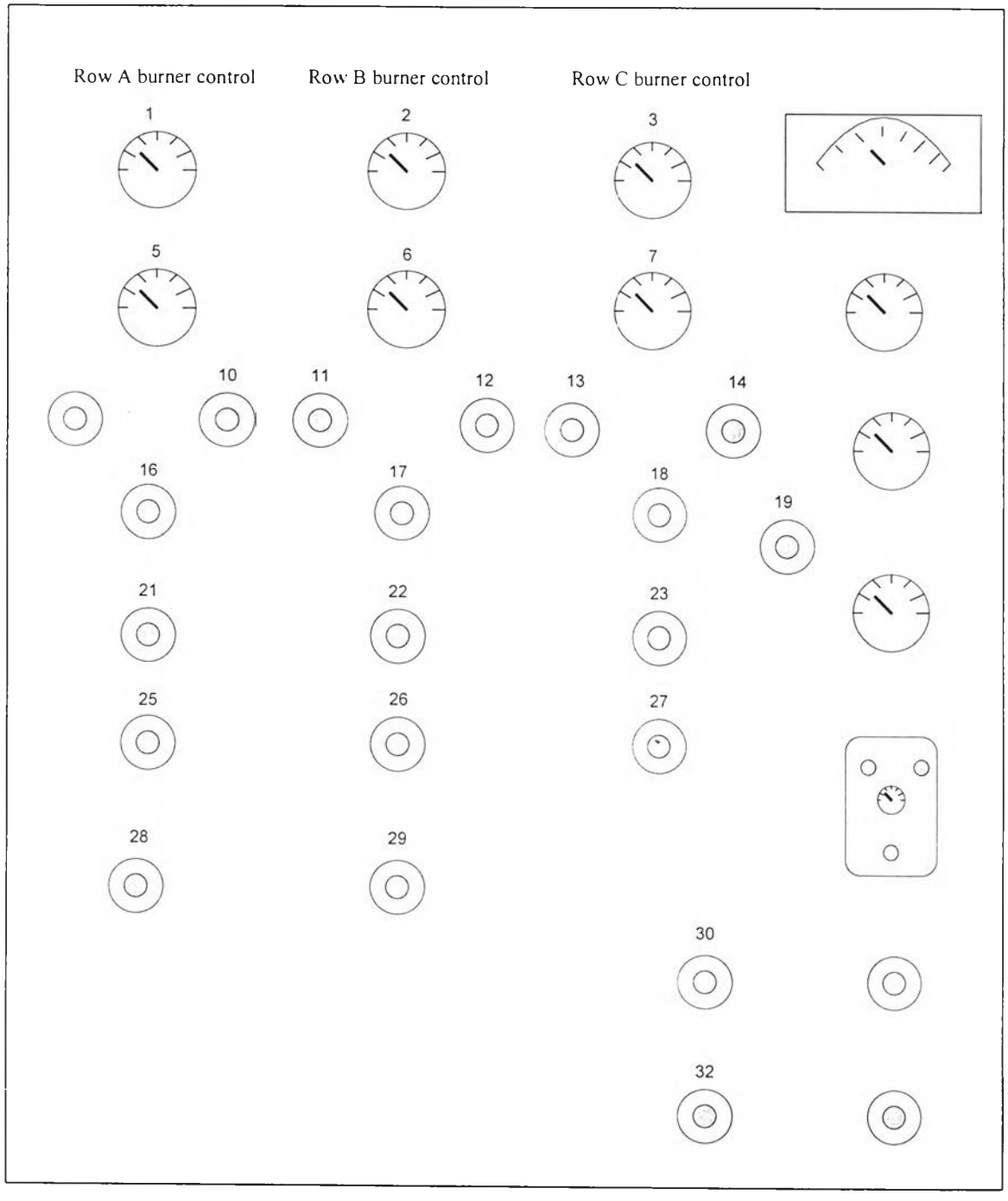
หมายเลข 13 Lower launder fuel stop

รูปที่ 4.7 สวิตช์ควบคุม Launder

4.3.6 **ขั้นตอนการสตาร์ทเตาหลอมทองแดง** (ดูรูปที่ 4.8 ประกอบ)

1. ตรวจสอบวาล์วก๊าซที่หัวเผารอบเตาหลอมซึ่งมีหัวเผาทั้งหมด 26 หัว แบ่งเป็น 3 แถว คือ Row A มีหัวเผา 8 หัว Row B มีหัวเผา 9 หัว และ Row C มีหัวเผา 9 หัว ทั้งหมดต้องอยู่ในตำแหน่ง "ปิด" และวาล์วลมที่หัวเผาต้องอยู่ในตำแหน่ง "เปิด" (หัวเผา Row C จะอยู่ด้านบนสุด ถัดมาเป็น Row B อยู่ตรงกลาง และ Row A จะอยู่ด้านล่างสุดของเตาหลอม ตามลำดับ)
2. เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในเตาหลอมทองแดงจะถูกส่งมาจากสถานีจ่ายก๊าซเข้าสู่เตาหลอมทองแดงโดยที่ความดันก๊าซที่ท่อประธานจะมีค่าประมาณ 128 – 130 psig
3. เปิดวาล์วก๊าซเข้าสู่ชุดปรับความดันก๊าซชุดที่ 1 โดยให้ความดันอยู่ที่ประมาณ 30-35 psig
4. เปิดเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ให้มีความดันประมาณ 25 – 30 psig
5. ตรวจสอบปุ่ม "Blower surge controller"(หมายเลข 24) ให้อยู่ที่ตำแหน่ง "ปิด"
6. กดปุ่ม "Blower start" (หมายเลข 30) สัญญาณไฟจะแสดงที่ปุ่มหมายเลข 31
7. ปรับปุ่ม "Blower surge controller" ไปที่ตำแหน่ง "เปิด"
8. ปรับความดันอากาศที่ Air manifold pressure ปุ่ม "Row A Lower"(หมายเลข 9) ,"Row B Lower"(หมายเลข 11), "Row C Lower"(หมายเลข 13) ให้มีความดันประมาณ 15 – 20 WC
9. กดปุ่ม "Ignition start"(หมายเลข 16) เพื่อทำการจุดระเบิด
10. รอสัญญาณไฟ "Gas valve latch"(หมายเลข 22) ติด
11. เปิด Safety valve by pass
12. รอจนกระทั่งความดันก๊าซที่ผ่าน Safety valve by pass มีความดัน 32 – 33 psig
13. เมื่อก๊าซมีความดันตามที่กำหนดแล้วสัญญาณไฟ "Gas valve latch" จะติด
14. เปิด Safety valve main gas ทั้ง 2 ตัวพร้อมกันเพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่เตาหลอมทองแดง
15. หลังจากการเปิด Safety valve gas แล้วสัญญาณไฟ "Gas valve latch open"(หมายเลข 26) จะติด
16. เปิดวาล์วก๊าซที่เตาหลอมทองแดงโดยเริ่มเปิดที่หัวเผา Row A ก่อนและตรวจสอบว่าหัวเผาทุกหัวต้องจุดติด โดยการสังเกตจากกระจกดูไฟ (Glass) ที่หัวเผา
17. เพิ่มความดันอากาศ Air manifold pressure Row A (หมายเลข 9) ไปที่ 30 WC ในช่วงเริ่มต้นสตาร์ท
18. รอจนกระทั่งสังเกตเห็นน้ำทองแดงเริ่มละลายและไหลออกมาจากเตาหลอม
19. เปิดวาล์วก๊าซที่หัวเผาของ Row B และ Row C ตามลำดับ และตรวจสอบว่าหัวเผาทุกหัวต้องจุดระเบิดติด

20. เพิ่มความดันอากาศ Air manifold pressure Row A และ Row C เป็น 20 WC (หมายเลข 12) และ 15 WC (หมายเลข 14) ตามลำดับ
21. รอจนกระทั่งน้ำทองแดงไหลเข้าสู่เตาพักและค่อยๆเพิ่มความดันอากาศโดยกดปุ่ม "Raise" (หมายเลข 10) ให้ Row A มีความดันประมาณ 45 – 50 WC และกดปุ่ม "Raise" (หมายเลข 12) ให้ Row B มีความดันอยู่ประมาณ 35 – 40 psig และกดปุ่ม "Raise" (หมายเลข 14) ให้ Row C มีความดันประมาณ 25 – 30 WC
22. ในขณะที่เริ่มสตาร์ทเตาหลอมจะต้องมีการตรวจสอบค่า CO เพื่อดูสภาพการเผาไหม้ของหัวเผาแต่ละหัว โดยทำการดึงของผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศที่ผสมกันที่หัวเผามาทำการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิประมาณ 900 °C โดยจะต้องควบคุมให้ปริมาณ CO อยู่ที่ประมาณ 1.80 – 3.00 %Vol. ในกรณีที่ค่า CO น้อยกว่า 1.80 %Vol. ให้ทำการเพิ่มปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงขึ้นโดยการปรับที่ limiting orifice ที่หัวเผาแต่ละหัว แต่ถ้าค่า CO มากกว่า 3.00 %Vol. ก็ปรับให้ปริมาณเชื้อเพลิงน้อยลง
23. ตรวจสอบสภาพทั่วไปของการหลอมในขณะเริ่มสตาร์ทเตาหลอม เช่น การวัดอุณหภูมิและออกซิเจน ทำการลดออกซิเจนลงถ้ามีออกซิเจนปนในน้ำทองแดงมากเกินไป ตรวจสอบ Slag ที่ปนมากับน้ำทองแดงที่ราง Launder และต้องคอยตรวจสอบการอุดตันของหัวเผาในเตาหลอมเป็นระยะๆ



รูปที่ 4.8 สวิตช์ควบคุมเตาหลอมทองแดง

สวิตช์ควบคุมการทำงานของเตาหลอมทองแดง

หมายเลข 1 Row A gas-air pressure control
หมายเลข 2 Row B gas-air pressure control
หมายเลข 3 Row C gas-air pressure control
หมายเลข 4 Furnace blower AMP
หมายเลข 5 Row A air manifold pressure
หมายเลข 6 Row B air manifold pressure
หมายเลข 7 Row C air manifold pressure
หมายเลข 8 Furnace gas pressure
หมายเลข 9 Row A Lower
หมายเลข 10 Row A Raise
หมายเลข 11 Row B Lower
หมายเลข 12 Row B Raise
หมายเลข 13 Row C Lower
หมายเลข 14 Row C Raise
หมายเลข 15 Gas for system
หมายเลข 16 Ignition start
หมายเลข 17 High firing rate
หมายเลข 18 Cooling water furnace start
หมายเลข 19 Reset alarm cooling water furnace
หมายเลข 20 Furnace combustion air pressure
หมายเลข 21 Ignition stop
หมายเลข 22 Gas valve latch
หมายเลข 23 Cooling water furnace stop
หมายเลข 24 Blower surge controller
หมายเลข 25 Temporary ignition
หมายเลข 26 Gas valve open
หมายเลข 27 Reset alarm vaporizer
หมายเลข 28 Furnace fuel stop
หมายเลข 29 Gas valve latch
หมายเลข 30 Blower start
หมายเลข 31 Lamp show
หมายเลข 32 Blower stop
หมายเลข 33 Lamp show

รูปที่ 4.8 (ต่อ) สวิตช์ควบคุมเตาหลอมทองแดง

4.4. เชื้อเพลิงที่ใช้กับระบบเตาหลอมทองแดง

ก่อนที่โรงงานจะเปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง ได้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอม เนื่องจากให้ค่าความร้อนสูง ทำให้ทองแดงในเตาหลอมละลายได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือ ราคาแพง ต้องสร้างถังเก็บก๊าซ และมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ซึ่งในกรณีที่เกิดการรั่วไหลจะทำให้ก๊าซลอยตัวต่ำ ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติ และโรงงานมีความสะดวกในการนำก๊าซธรรมชาติในโรงงานมากกว่า ดังนั้นโรงงานจึงหันมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดงแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวในปัจจุบัน

4.4.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas)

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นก๊าซเหลวภายใต้ความดันซึ่งประกอบด้วย Propane (C_3H_8) และ Butane (C_4H_{10}) ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนที่พอเหมาะซึ่งผลิตได้จากการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติในโรงแยกก๊าซหรือผลิตจากกระบวนการกลั่นน้ำมันในโรงกลั่น ส่วนผสมระหว่าง Propane และ Butane ใน LPG จะมีสัดส่วนแตกต่างกันไปแล้วแต่การผลิต ซึ่งจะมีผลให้ค่าความดันไอต่างกันด้วย ในต่างประเทศจะจัด LPG ออกเป็นหลายเกรดตามส่วนผสม แต่สำหรับประเทศไทยกระทรวงพาณิชย์มีข้อกำหนดสำหรับ LPG เพียงเกรดเดียว โดยไม่ได้จำกัดปริมาณ Propane ทำให้ผู้ขายสามารถกำหนดสัดส่วนองค์ประกอบได้ตามความเหมาะสมของกระบวนการผลิตที่มี เช่น ปตท. จะกำหนดให้มี Propane ประมาณ 70% mole Butane 30% mole ส่วนไทยออยล์ จะมี Propane ประมาณ 30% mole และ Butane 70% mole เป็นต้น

1) คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยทั่วไป

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ LPG แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของ LPG โดยทั่วไป [17]

ชื่อ / คุณสมบัติ	LPG				
	โพรเพน	โพรพิลีน	นอร์มอลบิวเทน	ไอโซบิวเทน	น้ำมันเบนซิน
สูตรโมเลกุล	C_3H_8	C_3H_6	C_4H_{10}	C_4H_{10}	C_8H_{18}
จุดเดือด (^{0}C)	-42.07	-47.7	-0.5	-11.73	128
ความดันไอ (kg/cm^2,20^{0}C)	8	9.8	2	2.95	-
ความถ่วงจำเพาะ					
- ของเหลว (น้ำ = 1 ที่ 15^{0}C)	0.508	0.522	0.584	0.563	0.66-0.75
- ก๊าซ (อากาศ = 1 ที่ 15^{0}C)	1.548	1.453	2.071	2.067	-
จุดติดไฟ (^{0}C)	481	458	441	544	210-300
ค่าความร้อน (kcal/kg)	12034	11692	11832	11797	11200
ช่วงการลุกไหม้ (% ในอากาศ)	2.37-9.50	2.00-11.10	1.86-8.41	1.80-8.44	1.5-4.7
ความเร็วสูงสุดของเปลวไฟ (m/s ในท่อ)	0.81	1.01	0.825	1.825	0.83
ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (kg/kg)	15.71	14.8	15.49	15.49	14.7
ความร้อนแฝงของการระเหย (kcal/kg)	101.8	104.6	92.09	87.56	-
อ็อกเทนนัมเบอร์	125	85	91	99	91

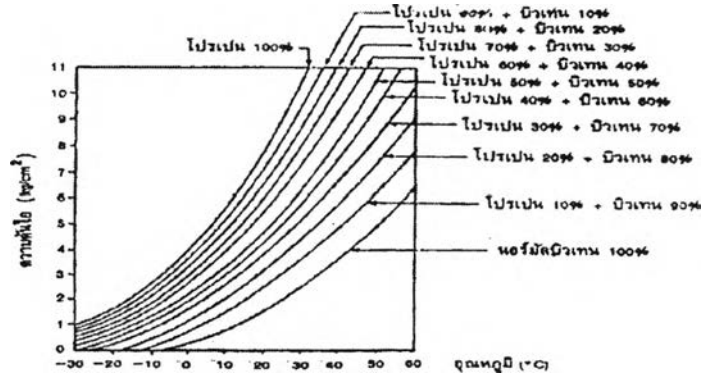
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อกำหนดคุณสมบัติของ LPG ซึ่งจะกำหนดความดันไอ (ASTM-D1267) ไม่ให้สูงเกินไปเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเก็บ การขนส่ง และการระเหยเป็นไอ (ASTM-D1837) และเพื่อให้มั่นใจว่าของเหลวกลายเป็นไอได้เพียงพอเมื่อใช้งาน นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดเรื่องปริมาณสารตกค้างที่สามารถระเหยเป็นไอและตกค้างอยู่ในถังให้มีอยู่น้อยที่สุด โดยจำกัดไม่ให้มีปริมาณสารโฮโดรคาร์บอนที่หนักเกินกว่า Butane มากเกินไป เนื่องจาก LPG ถูกนำไปใช้กับวัสดุประเภททองแดงอย่างกว้างขวาง จึงมีข้อกำหนดการทดสอบด้านการกัดกร่อนทองแดง ซึ่งจะต้องจำกัดปริมาณกำมะถันที่เจือปน สำหรับตัว LPG เองไม่มีสีและกลิ่น ถ้ารั่วออกมาจะไม่สามารถรู้ได้ ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายโดยเกิดไฟไหม้และระเบิดได้ จึงมีข้อกำหนดให้มีการเติมสารที่มีกลิ่น ซึ่งสามารถระเหยออกไปพร้อมกับ LPG เช่น Ethyl Mercaptan เพื่อเป็นการเตือนให้ทราบเมื่อมีการรั่วเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.7 ข้อกำหนดคุณภาพของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) [18]

คุณสมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ (ASTM-D)	ขีดจำกัด	
			ไทยออยล์	ปตท.
กลิ่น			Easily Detectable	Easily Detectable
ความดันไอที่ 37.8 °C	psig	1267	สูงสุด 100	สูงสุด 200
			ต่ำสุด 60	-
จุดเดือด 95% v ที่ 760 mmHg	°C	1837	สูงสุด 2.2	สูงสุด 2.2
ส่วนเหลือหลังจากการระเหย	ml/100ml	2158	สูงสุด 0.05	สูงสุด 0.05
ค่าความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 °C		1657	รายงาน	รายงาน
Pentane และไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า	%v	2163	สูงสุด 2.0	สูงสุด 2.0
Volatile Sulfur ที่ 15.6 °C	mg/m^3	2784	สูงสุด 343	สูงสุด 343
Copper Strip Corrosion		1838	สูงสุด No.1	สูงสุด No.1

2) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดันไอ

เนื่องจาก LPG มีจุดเดือดต่ำ ดังนั้นที่ความดันบรรยากาศ LPG จะอยู่ในสถานะก๊าซ และถูกอัดให้เป็นของเหลวภายใต้ความดัน ค่าความดันที่ทำให้ LPG เป็นของเหลวเรียกว่า ความดันไอ (Vapour pressure) และกรณีที่มีส่วนประกอบของ Propane มากขึ้น ค่าความดันไอก็จะสูงขึ้น เนื่องจาก Propane มีอุณหภูมิจุดเดือดต่ำ แต่ในกรณีที่ LPG อยู่ในสถานะของเหลวซึ่งบรรจุในถังที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรจะไม่มีผลต่อความดันไอ ดังนั้นสิ่งที่ทำให้ความดันภายในถังเปลี่ยนแปลงคือ อุณหภูมิและอัตราส่วนผสม ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิของก๊าซผสมระหว่าง Propane และ Butane

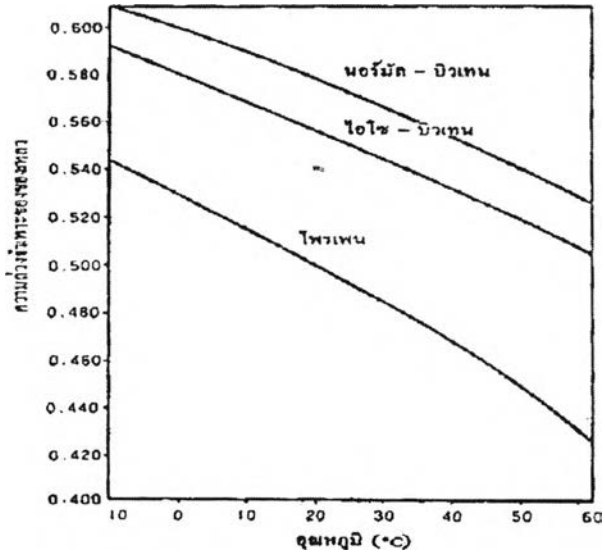


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิส่วนผสมต่างๆ กัน [17]

3) ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG)

LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ โดยสภาพของเหลวจะเปรียบเทียบกับน้ำที่ 4 °C ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเป็น 1 ส่วนความถ่วงจำเพาะในสภาพก๊าซจะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0 °C ความดัน 1 บรรยากาศซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเป็น 1

ความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นของเหลวมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ถ้าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิมีค่าสูง ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลงเช่น ที่อุณหภูมิปกติ 15 °C Propane เหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.508 ส่วน Butane เหลวมีค่าความถ่วงจำเพาะเป็น 0.584 โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลวตามอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว [17]

ความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นก๊าซ ของ Propane มีค่า 1.55 และ Butane มีค่า 2.07 ดังนั้น LPG จึงหนักกว่าอากาศเกือบสองเท่า ส่งผลให้ LPG ที่รั่วออกมาจะสะสมในระดับที่ต่ำกว่าซึ่งทำให้เกิดอันตรายได้ง่าย

4) กลิ่น สี และความเป็นพิษ

LPG บริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย ผู้ผลิตจะเติมกลิ่นลงไป เมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้นก็จะได้กลิ่น และเตรียมการป้องกันได้ LPG เป็นสารที่ไม่มีพิษ แต่ในกรณีที่เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ก็อาจเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ LPG เป็นตัวทำละลาย

เช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหย จึงสามารถละลายอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่นปะเก็น หรือซีลยางได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานกับ LPG ควรทำมาจากยางสังเคราะห์หรือวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ LPG

5) ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศา ค่าความร้อนจำเพาะนอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องคือความดันและปริมาตร ดังนั้นจะแบ่งค่าความร้อนจำเพาะออกเป็นค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (C_p) หรือที่ปริมาตรคงที่ (C_v) ดังแสดงตามความสัมพันธ์ของส่วนผสมและค่าความร้อนจำเพาะในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความร้อนจำเพาะของ LPG (kcal/kg-^{0}C) [17]

สถานะของแอลพีจี	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
สถานะของเหลวที่ 25 ^{0}C และความดันบรรยากาศ	0.6023	0.5748	0.584
สถานะก๊าซที่ความดันบรรยากาศ			
C_p ที่ 0 ^{0}C	0.359	0.342	0.372
15 ^{0}C	0.388	0.397	0.386
100 ^{0}C	0.456	0.438	0.438
500 ^{0}C	0.844	0.822	0.822
C_v ที่ 15 ^{0}C	0.343	0.361	0.348

6) อุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition temperature)

อุณหภูมิจุดติดไฟคือ อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเริ่มการลุกไหม้ตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องมีประกายไฟ จุดติดไฟของ Propane คือ 480-550 ^{0}C ในขณะที่ของ Butane คือ 440-540 ^{0}C เมื่อเทียบกับแก๊ซโซลีน ซึ่งมีจุดติดไฟต่ำกว่าที่ 280-430 ^{0}C เราจะพบว่า LPG มีความปลอดภัยสูงกว่าแก๊สโซลีนในด้านของอุณหภูมิจุดติดไฟ

7) ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

ในการสันดาป LPG อย่างสมบูรณ์ สารตั้งต้น (Reactant) หรือส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศทั้งหมดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

Propane : $C_3H_8 + 5O_2 \longrightarrow 3CO_2 - 4H_2O$

Butane : $C_4H_{10} + 6.5O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 5H_2O$

จากสมการพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการสันดาปอย่างสมบูรณ์จะต้องเป็น 5 เท่าของตัวไฮโดรคาร์บอนในกรณีของ Propane และ 6.5 เท่าในกรณีของ Butane เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21% ดังนั้นในการสันดาป Propane 1 หน่วยปริมาตรให้สมบูรณ์ต้องใช้อากาศ 5/0.21 = 24 หน่วยปริมาตร และในการสันดาป Butane 1 หน่วยปริมาตรให้สมบูรณ์ต้องใช้อากาศ 6.5/0.21 = 31 หน่วยปริมาตร

4.4.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

ก๊าซธรรมชาติเกิดจากแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) และการทับถมของสารอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งก๊าซธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็นก๊าซที่ผลิตได้จากแหล่งก๊าซใต้พิภพโดยตรง (Non-Associated Gas) และก๊าซที่ติดมากับน้ำมันดิบ (Associated Gas) จากหลุมน้ำมันดิบ ซึ่งส่วนผสมขึ้นอยู่กับแหล่งผลิต องค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็น Methane (CH_4) และมีไฮโดรคาร์บอนเบาตัวอื่นๆ ติดมาด้วยเช่น Ethane (C_2H_6), Propane (C_3H_8), Butane (C_4H_{10}), Pentane (C_5H_{12}) และสารที่หนักกว่าไฮโดรคาร์บอนที่ติดมาเหล่านี้รวมเรียกว่า Natural Gas Liquid (NGL) นอกจากนี้ยังอาจมีก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟล์ น้ำและอื่นๆ ติดมากับก๊าซธรรมชาติ แต่สำหรับสารตัวอื่นที่หนักกว่าจะต้องทำการสกัดออกเพื่อป้องกันปัญหาในการใช้และการขนส่ง การซื้อขายนั้นจะคิดราคาตามค่าความร้อนเชื้อเพลิง เช่น 70 บาทต่อล้านบีทียู ดังนั้นค่าความร้อนของก๊าซจึงมีความหมายมาก ส่วนค่ากำหนดอื่นๆ จัดเป็นส่วนประกอบที่จะช่วยให้ความมั่นใจในความสะอาดและความปลอดภัยในการใช้

1) องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

ตารางที่ 4.9 เป็นตารางแสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติซึ่งผลิตได้โดยตรงจากพื้นพิภพที่แหล่งผลิตต่างๆ ในต่างประเทศ ส่วนตารางที่ 4.10 เป็นตารางที่แสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่

ได้จากการกลั่นน้ำมันจากแหล่งผลิตต่างๆในต่างประเทศและตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตได้โดยตรงจากแหล่งผลิตต่างๆ [20]

Origin	Composition							
	Methane (CH_4)	Ethane (C_2H_6)	Propane (C_3H_8)	Butanes (C_4H_{10})	Pentane Plus (C_{5+})	Nitrogen (N_2)	Hydrogen sulfide (H_2S)	Carbon dioxide (CO_2)
Groningen (NLD)	81.3	2.9	0.4	0.1	0.1	14.3	-	0.9
Lacq (FRA)	69.0	3.0	0.9	0.5	0.5	1.5	15.3	9.3
Frigg (NOR)	95.7	3.6	ε	ε	ε	0.4	-	0.3
Hassi R'Mel (DZA)	83.7	6.8	2.1	0.8	0.4	5.8	-	0.2
Urengoy (CIS)	85.3	5.8	5.3	2.1	0.2	0.9	-	0.4
Uch (PAK)	27.3	0.7	0.3	0.3	-	25.2	-	46.2
Kapuni (NZL)	45.6	5.8	2.9	1.1	0.8	-	-	43.8
Type (averages[1])	98 to 95	1 to 3	0.5 to 1	02 to 0.5	0.2 to 0.5	-	-	-

[1] สัดส่วนของก๊าซแห้งที่ปราศจากสารเจือปน

ε หมายถึง มีปริมาณน้อยมาก

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันที่แหล่งผลิตต่างๆ [20]

Origin	Composition							
	Methane (CH_4)	Ethane (C_2H_6)	Propane (C_3H_8)	Butanes (C_4H_{10})	Pentane Plus (C_{5+})	Nitrogen (N_2)	Hydrogen sulfide (H_2S)	Carbon dioxide (CO_2)
Parentis (FRA)	73.6	10.2	7.6	5.0	3.6	-	-	-
Ekofisk (NOR)	83.3	8.5	3.4	1.5	1.0	0.3	-	2.0
Maracaibo (VEN)	82.0	10.0	3.7	1.9	0.7	1.5	-	0.2
Uthmaniyah (SAU)	55.5	18.0	9.8	4.5	1.6	0.2	1.5	8.9
Burgan (KWT)	74.3	14.0	5.8	2.0	0.9	2.9	0.1	-
Kirkuk (IRQ)	56.9	21.2	6.0	3.7	1.6	-	3.5	7.1
Ardjuna (IDN)	65.7	8.5	14.5	5.1	0.8	1.3	-	4.1
Type (averages[1])	80 to 60	10 to 20	5 to 12	2 to 5	1 to 3	-	-	-

[1] สัดส่วนของก๊าซแห้งที่ปราศจากสิ่งเจือปน โดยสัดส่วนนี้ขึ้นอยู่กับความดันที่อุปกรณ์แยกก๊าซ

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย [17]

องค์ประกอบ (ก๊าซธรรมชาติแห้ง)	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
องค์ประกอบที่เผาไหม้	
Methane (CH_4)	90.795
Ethane (C_2H_6)	3.277
Propane (C_3H_8)	0.187
Butane (C_4H_{10})	1.039
Pentane (C_5H_{12})	1.025
Hexane (C_{6+})	0.019
องค์ประกอบที่ไม่เผาไหม้	
Carbon dioxide (CO_2)	2.468
Nitrogen (N_2)	3.190

ตารางที่ 4.12 แสดงถึงองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของก๊าซธรรมชาติแห้ง (Dry gas) ซึ่งเป็นก๊าซธรรมชาติที่มี Methane เกือบทั้งหมด โดยมี Propane, Butane และไฮโดรคาร์บอนเหลวน้อยกว่า 0.1 แกลลอน/NG 1,000 ft^3 ส่วนก๊าซธรรมชาติเปียก (Wet gas หรือ Condensate gas) เป็นก๊าซธรรมชาติที่มี Propane, Butane และไฮโดรคาร์บอนเหลวมากกว่า 0.1197 แกลลอน/NG 1,000 ft^3 โดยส่วนใหญ่แล้วองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ มักจะแสดงในหน่วยของเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหรือเปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยตารางที่ 4.13 แสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติแห้ง และก๊าซธรรมชาติเปียก (%โดยโมล) [20]

Component	Dry gas	Wet gas or condensate gas
Hydrocarbons		
Methane (CH4)	70 to 90	50 to 92
Ethane (C_2H_6)	1 to 10	5 to 15
Propane (C_3H_8)	Traces to 5	2 to 14
Butane (C_4H_{10})	Traces to 2	1 to 10
Pentane (C_5H_{12})	Trances to 1	Traces to 5
Hexane (C_6H_{14})	Traces to 0.5	Traces to 3
Heptane+ (C_{7+})	0 to traces 0.5	Traces to 15
Nonhydrocarbon		
Nitrogen (N_2)	Traces to 15	Traces to 10
Carbon dioxide (CO_2)	Traces to 1	Traces to 4
Hydrogen sulfide (H_2S)	0 traces	0 to 6
Helium (He)	0 to 5	0

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ [20]

Compound	Molecular weight (kg/kmol)	Melting point temperatrue (K)	Boiling point temperatrure (K)	Volume (m^3/kmol)
Element				
Hydrogen	2.016	13.95	20.39	0.028604
Helium	4.003	1.76	4.22	0.032275
Nitrogen	28.014	63.15	77.35	0.34678
Oxygen	31.999	54.36	90.17	0.028020
Inorganic				
Water	18.015	273.15	373.15	0.018069
Carbon monoxide	28.010	68.15	81.70	0.035456
Carbon dioxide	44.010	216.58	194.67[1]	0.037278[2]
Hydrogen sulfide	34.082	187.68	212.80	0.036142
Paraffins				
Methane	16.043	90.67	111.66	1.037832
Ethane	30.070	90.35	184.55	0.055203
Propane	44.097	85.46	231.11	0.075642
Isobutane	58.123	113.54	261.43	0.097704
n-Butane	58.123	134.86	272.65	0.096553
Isopentane	72.150	256.58	282.65	0.119536
n-Pentane	72.150	143.42	309.22	0.116126
n-Hexane	86.177	177.84	341.88	0.131306
n-Heptane	100.204	182.57	374.58	0.147014
n-Octane	114.131	216.38	398.83	0.163507
n-Nonane	128.258	219.63	423.97	0.179321
n-Decane	142.285	246.49	447.30	0.195342
Cycloparaffins				
Cyclopentane	70.134	179.31	322.40	0.093509
Cyclohexane	84.161	279.69	353.87	0.108860
Aromatics				
Benzene	78.114	278.68	353.24	0.089495
Toluene	92.141	178.18	383.78	0.106556
Ethybenzene	106.167	178.20	409.35	0.122681
Isopropylbenzene	120.194	177.14	425.56	0.139798

[1] อุณหภูมิปกติของการระเหิด

[2] คำนวณที่จุดวิกฤต (216.58 K)

2) **คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ**

2.1) **ความหนาแน่น (ρ)**

ความหนาแน่นของก๊าซ หมายถึง มวลต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซ (kg/m^3) โดยความหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน นอกจากนี้ความหนาแน่นยังมีการชี้เฉพาะลงไปว่าเป็นความหนาแน่นที่อ้างอิงกับสภาวะใด คือ สภาวะปกติ (Normal conditions) หรือ สภาวะมาตรฐาน (Standard conditions)

- สภาวะปกติ	อุณหภูมิ	0	^0C
	ความดัน	101325	Pa (1 atm)
- สภาวะมาตรฐาน	อุณหภูมิ	15	^0C
	ความดัน	101325	Pa (1 atm)
	(USA : 60 ^0F 14.7 psia)		

2.2) **ปริมาตรจำเพาะ (v)**

ปริมาตรจำเพาะ หมายถึง ปริมาตรที่เกิดขึ้นต่อหน่วยมวลของก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น มีหน่วยเป็น m^3/kg

2.3) **ความถ่วงจำเพาะ (SG)**

ความถ่วงจำเพาะ หมายถึง อัตราส่วนของความหนาแน่นของของไหลต่อความหนาแน่นของสารอ้างอิงในสภาวะอ้างอิงใดๆ สำหรับของเหลว สารอ้างอิงคือน้ำ ในขณะที่ก๊าซที่เป็นสารอ้างอิงคืออากาศ โดยในที่นี้สภาวะอ้างอิงนั้นหมายถึง ที่สภาวะปกติหรือที่สภาวะมาตรฐานเนื่องจากความหนาแน่นของของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น ส่วนความหนาแน่นของก๊าซขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของก๊าซสามารถหาได้จาก

$$SG_{gas} = \frac{\rho_{fuel}(1\ \text{atm}\ 15.56°C\ (60°\ F))}{\rho_{air}(1\ \text{atm}\ 15.56°C\ (60°\ F))} \qquad (4.1)$$

ถ้าสมมติว่าก๊าซประพฤติตัวเป็นก๊าซในอุดมคติจะได้ว่า

$$SG_{gas} = \frac{M_{gas}}{M_{air}} \qquad (4.2)$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่า ถ้าก๊าซมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 แสดงว่าก๊าซนั้นเบากว่าอากาศ ในขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 หมายความว่าก๊าซนั้นหนักกว่าอากาศ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการป้องกันการรั่วไหลของก๊าซในขณะที่มีการกักเก็บและขนย้าย

2.4) ความหนืดของก๊าซ (μ)

ความหนืดของก๊าซเป็นสิ่งจำเป็นต้องทราบในการคำนวณหาอัตราการไหลที่สภาวะที่แตกต่างกันในกระบวนการผลิตก๊าซ เนื่องจากก๊าซธรรมชาติโดยทั่วไปมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ซึ่งในกรณีนี้ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, μ) สามารถนิยามโดยสมการ

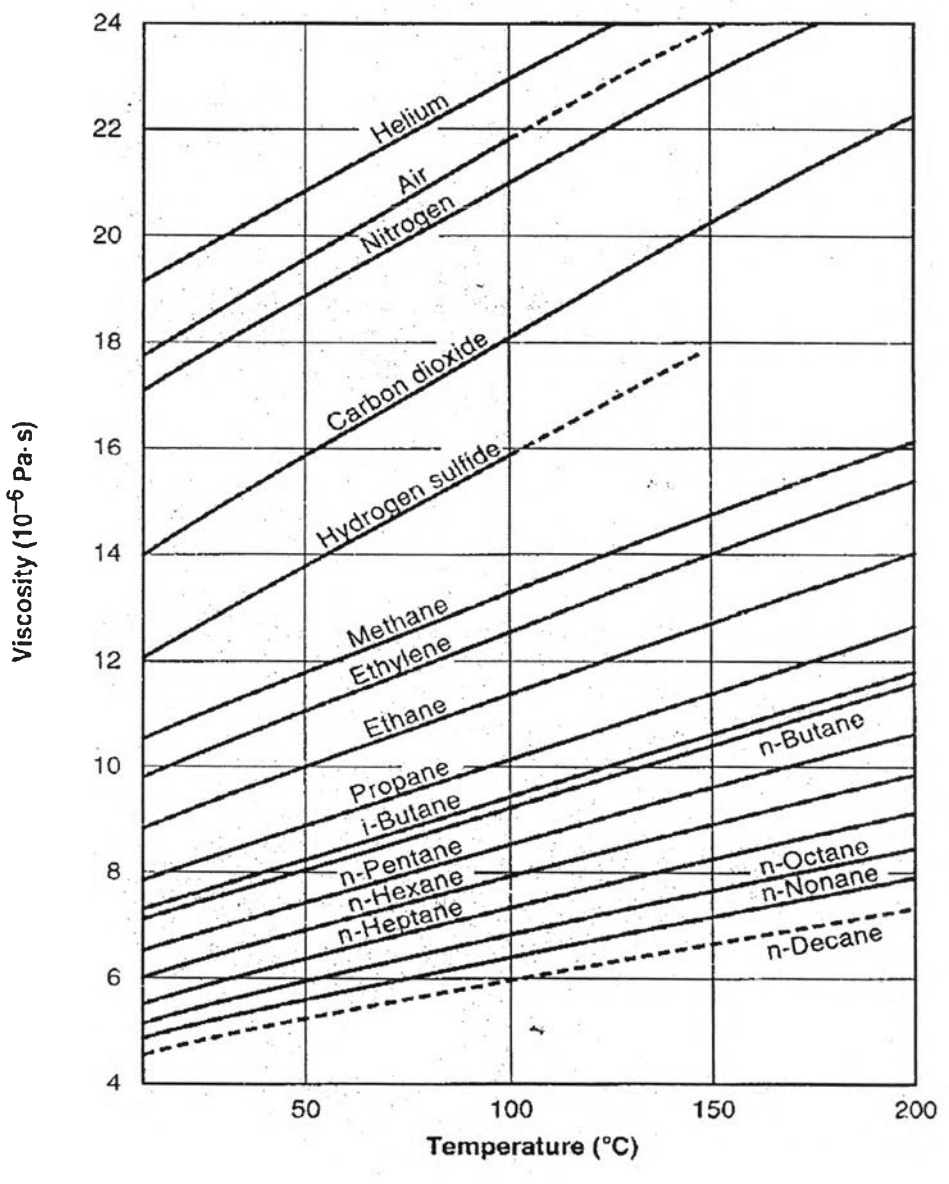
$$\tau_c = \mu \frac{du}{dy} \qquad (4.3)$$

เมื่อ

τ_c คือ ความเค้นเฉือน

$\frac{du}{dy}$ คือ เกรเดียนของความเร็วในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบความเค้นเฉือน

สำหรับหน่วย SI ค่าความหนืดพลวัตมีหน่วยเป็น $N.s/m^2$ ความหนืดขององค์ประกอบต่างๆของก๊าซธรรมชาติที่ความดันบรรยากาศแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความหนืดขององค์ประกอบต่างๆ ของก๊าซธรรมชาติที่ความดันบรรยากาศ [20]

2.5) ค่าความร้อน (HV)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ T ^{0}C คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วย โดยการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศและสารตั้งต้นมีอุณหภูมิ T ^{0}C จนกระทั่งสารผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเท่ากับสารตั้งต้น โดยอุณหภูมิที่ใช้พิจารณาอาจจะแตกต่างกันไป เช่น 0 ^{0}C, 15 ^{0}C และ 25 ^{0}C ซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างนี้มีผลกระทบต่อค่าความร้อนไม่มากนัก โดยค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติสามารถนิยามตามสถานะของน้ำที่เกิดขึ้นในสารผลิตภัณฑ์เมื่อเผาไหม้ได้ดังนี้

- ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV) ซึ่งถือว่าน้ำที่เกิดขึ้นในสารผลิตภัณฑ์มีสถานะเป็นไอ
- ค่าความร้อนทั้งหมด (Gross heating value, GHV) เป็นการรวมพลังงานความร้อน เนื่องจากการกลั่นตัวของน้ำรวมเข้าไปด้วย

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความร้อนสุทธิและค่าความร้อนทั้งหมดของก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน ส่วนตารางที่ 4.15 แสดงค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย โดยส่วนใหญ่ค่าความร้อนของก๊าซมีหน่วยเป็น kJ/Nm^3 หรือบางทีอาจจะแสดงได้ในหน่วย th/Nm^3 (1 th = 4.1855 MJ)

ตารางที่ 4.14 ค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตต่างๆ [20]

Origin	GHV (kJ/Nm^3)	NHV (kJ/Nm^3)
Lacq	40,474	36,453
Groningen	35,158,	31,642
Sahara (Fos)	40,390	36,372
Sahara (Le Havre adjusted)	43,111	39,511

ตารางที่ 4.15 ค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย [17]

สภาวะอ้างอิง	ค่าความร้อน
MSC (Metric standard Conditions) T = 15 ^{0}C P = 101325 Pa.	37.71 MJ/m^{3} (gross) 34.00 MJ/m^{3} (net)
NTP (Normal Temperature Pressure) T = 0 ^{0}C P = 760 mmHg.	39.78 MJ/m^{3} (gross)
Imperial T = 60 ^{0}F, P = 30" Hg.	1013 Btu/ft^{3} (gross)

ถ้าองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในหัวเผามีค่าเปลี่ยนแปลงโดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับค่าวอบเบ (Wobbe index หรือ Wobbe number)

$$W = \frac{\mathrm{GHV}}{\sqrt{d_o}} \tag{4.4}$$

โดยที่

d_o คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของก๊าซธรรมชาติที่สภาวะปกติ

GHV คือ ค่าความร้อนรวมของก๊าซธรรมชาติ