

ภาคผนวก

การคำนวณค่าความร้อน

ตารางผนวกที่ 1 High Heating Values of the Constituents of Producer Gas

Type of gas	Higher Heating Value (kJ/kg mol)
CO	282,990
H ₂	285,840
CH ₄	890,360

ที่มา: Kaupp and Coss (1984)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อน (HHV) ในแก๊สเชื้อเพลิง

จากสมการ Ideal gas หาปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 1 atm

$$\begin{aligned}
 PV &= nRT \\
 \text{เมื่อ } n &= \text{mol} \\
 R &= 8.314 \text{ kJ/kg mole K} \\
 T &= 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 P &= 1.013 \times 10^2 \text{ k/m}^2 \\
 \text{ดังนั้น } V &= (8.314 \times 298) / 1.013 \times 10^2 \\
 &= 24.46 \text{ m}^3/\text{kg mole} \\
 \text{HHV} &= (\text{mol fraction} \times \text{HHV}) / V \\
 &= \text{kJ/m}^3
 \end{aligned}$$

การคำนวณค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิง จากเชื้อเพลิงแห้ง

ค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซเชื้อเพลิง	14.60	MJ/kg of fuel
น้ำหนักแห้งเชื้อเพลิงแปรรูป	=	328 kg – (328 kg x 2.95/100)
	=	318 kg
น้ำหนักแห้งห้ำมันสำปะหลัง	=	328 kg – (328 kg x 7.30/100)
	=	304 kg
รวมน้ำหนักเชื้อเพลิงแห้ง	=	622 kg
พลังงานที่ได้ทั้งหมด	=	14.60 MJ/kg of fuel x 622 kg
	=	9,081 MJ หรือ 2,523 kWh

การคำนวณปริมาณของแข็งระเหยตกค้างในถ่านชาร์

น้ำหนักเชื้อเพลิงแห้ง	18.90	kg
ของแข็งระเหยในเชื้อเพลิง	88.14	%
ของแข็งระเหยในถ่านชาร์		
อัตราอากาศไหล 30 m ³ /hr	45.90	%
อัตราอากาศไหล 50 m ³ /hr	37.77	%
ปริมาณถ่านชาร์		
อัตราอากาศไหล 30 m ³ /hr	4.8	kg
อัตราอากาศไหล 50 m ³ /hr	4.5	kg

ของแข็งตกค้างในถ่านชาร์ ที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr

ของแข็งตกค้าง	=	4.8 kg x (45.90/100) x 100 / (18.90 kg x (88.14/100))
	=	13 %

ของแข็งตกค้างในถ่านชาร์ ที่ อัตราอากาศไหล $50 \text{ m}^3/\text{hr}$

$$\begin{aligned}\text{ของแข็งตกค้าง} &= 4.5 \text{ kg} \times (37.77/100) \times 100 / (18.90 \text{ kg} \times (88.14/100)) \\ &= 10 \%\end{aligned}$$

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 2 ความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกด้วยเครื่องทรมเมล
ที่อัตราเร็วในการป้อนมูลฝอยต่างๆ

No.	Purity of separated plastic waste (% wet weight)		
	750 kg/hr	1,276 kg/hr	1,333 kg/hr
1	55	42	50
2	57	53	51
3	52	50	43
4	59	55	29
5	58	60	41
Range	52-59	42-60	29-56
Mean±SD	56±2.77	52±6.67	43±8.84

ตารางผนวกที่ 3 ความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติกในแต่ละขั้นตอนของการคัดแยกแบบแห้ง

No.	Purity of separated plastic waste (% wet weight)		
	Before separate	After manual separate	After trommel separate
1	31.69	59.18	79.45
2	25.34	32.43	77.70
3	17.36	37.50	72.97
4	26.85	42.18	75.68
5	21.71	54.42	89.86
6	32.67	58.00	81.89
Range	17.36-32.67	32.43-59.18	72.97-82.96
Mean±SD	25.94±5.85	47.28±11.40	79.59±5.89

ตารางผนวกที่ 4 ผลการคัดแยกมูลฝอยพลาสติกด้วยกระบวนการคัดแยกแบบแห้ง

No.	Weight (kg wet weight)						Trommel separation (min)	Separated plastic (% ww)
	Excavated solid waste	Manual separation		Trommel separation				
		Other	Plastic	<25 mm	25-50mm	>50 mm		
1	709	169	540	224	150	166	45	23
2	531	138	393	183	90	120	30	23
3	729	173	556	269	110	177	40	24
4	517	101	416	210	56	150	35	29
5	714	166	548	230	142	176	40	25
6	507	129	378	163	58	157	45	31
7	699	148	551	247	122	182	55	26
8	514	99	415	88	61	266	35	52
9	717	188	529	219	94	216	45	30
10	521	105	416	113	73	230	50	44
11	703	159	544	256	121	167	45	24
12	527	114	413	83	67	263	34	50
13	723	203	520	240	99	181	55	25
14	402	60	344	175	59	110	35	27
15	434	71	363	107	46	210	37	48
16	442	50	392	160	55	176	50	40
17	637	107	530	208	102	220	60	35
18	577	115	462	256	107	199	60	34
19	645	109	536	231	115	190	55	29
20	410	82	328	132	56	140	35	34
21	505	99	406	174	82	135	40	27
Range	402-723	50-203	328-551	83-269	46-150	110-266	30-60	23-52
Mean	579±114	123±42	456±79	184±56	89±31	182±42	44±9	32±9
Rate of trommel separation (kg/hr)							462-830 (634±114)	

ตารางผนวกที่ 5 ความหนาแน่นรวมของมูลฝอยที่ผ่านการคัดแยกแบบแห้ง

No.	kg/m ³		
	Excavated solid waste	Manual separation	Trommel separation
1	121	111	37
2	195	168	53
3	204	164	61
4	168	213	86
5	182	182	51
6	195	168	52
7	195	168	47
8	209	167	53
9	222	189	66
10	209	189	59
11	195	202	69
12	209	189	71
13	155	155	54
14	209	195	88
15	141	108	74
16	145	67	54
17	135	88	67
18	101	88	67
19	173	81	54
20	145	67	54
21	165	75	53
Range	101-222	67-213	37-88
Mean±SD	175±34	144±50	60±13

ตารางผนวกที่ 6 ระยะเวลาตั้งแห้งเชื้อเพลิงแปรรูป

Day	No.1	No.2	No.3	Range	Mean±SD
1	26.93	24.69	26.20	24.69-26.93	25.94±1.14
2	22.66	20.92	19.92	19.92-22.66	21.17±1.39
3	14.21	12.80	13.79	12.80-14.21	13.60±0.72
4	12.79	6.28	9.65	6.28-12.79	12.99±3.26
5	4.68	2.09	2.07	2.07-4.68	2.95±1.50
6	2.10	2.01	2.00	2.00-2.10	2.04±0.06

ตารางผนวกที่ 7 คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงแปรรูป: เหน้ามันสำปะหลัง (1: 1)

Parameter	Value
Moisture (%)	5.50
volatile solid (% dw)	88.14
Fixed carbon (% dw)	1.82
Ash (% dw)	10.04
HHV (MJ/kg)	22.20

ตารางผนวกที่ 8 องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Air flow rate (m ³ /hr)	Gas composition (%)						HHV (MJ/Nm ³)
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	
30							
1	10.94	0.00	0.95	9.73	71.45	6.93	1.61
2	9.38	0.00	0.76	10.21	72.05	7.60	1.36
3	9.27	0.05	1.16	12.28	71.10	6.14	1.50
Range	9.27-10.94	0.00-0.05	0.76-1.16	9.73-12.28	71.10-72.05	6.14-7.60	1.36-1.61
Mean	9.86	0.02	0.96	10.74	71.53	6.89	1.49
SD	0.93	0.03	0.20	1.36	0.48	0.73	0.13
50							
1	12.83	0.10	1.60	11.01	69.03	5.43	2.08
2	8.77	0.04	1.08	8.37	71.36	10.38	1.41
3	10.72	0.07	1.47	8.48	70.43	8.83	1.78
Range	8.77-12.83	0.04-0.10	1.08-1.60	8.37-11.01	69.03-71.36	5.45-10.38	1.41-2.08
Mean	10.77	0.07	1.38	9.29	70.27	8.21	1.76
SD	2.03	0.03	0.27	1.49	1.17	2.53	0.34

ตารางผนวกที่ 9 คุณสมบัติแก๊สเชื้อเพลิงจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Air flow rate (m ³ /hr)	Gas yield (m ³ /kg)	HHV(MJ/kg)	Cold gas efficiency (%)
30			
1	5.1	8.19	37
2	4.7	6.38	29
3	4.2	6.34	29
Range	4.2-5.1	6.34-8.19	29-37
Mean±SD	4.7±0.5	6.97±1.06	32±4.6
50			
1	8.2	17.05	77
2	7.8	11.02	50
3	8.8	15.61	70
Range	7.8-8.8	11.02-17.05	50-77
Mean±SD	8.3±0.5	14.56±3.15	66±14.00

หมายเหตุ ประสิทธิภาพแก๊สเย็น (cold gas efficiency) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงแห้ง 1 kg ต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแห้ง

ตารางผนวกที่ 10 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Air flow rate (m ³ /hr)	Chemical characteristic (%)				HHV (MJ/Nm ³)
	Moisture	VS	FS	Ash	
30					
1	1.11	40.69	12.77	46.54	1.61
2	0.44	54.47	11.41	34.12	1.36
3	0.70	42.53	10.37	47.10	1.50
Range	0.44-1.11	40.69-54.47	10.37-12.77	34.12-47.10	1.36-1.61
Mean±SD	0.75±0.34	45.90±7.48	11.52±1.20	42.59±7.34	1.49±0.13
50					
1	0.50	40.23	9.07	50.70	2.08
2	1.02	37.34	11.14	51.53	1.41
3	2.12	35.73	8.56	55.72	1.78
Range	8.77-12.83	0.04-0.10	1.08-1.60	8.37-11.01	1.41-2.08
Mean±SD	1.21±0.83	37.77±2.28	9.59±1.37	52.65±2.69	1.76±0.34

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยเผาเชื้อเพลิงแปรรูปกับเหง้ำมันต่ำปะหลัง (1: 1) 20 kg

Time (min)	Temperature of gasification (°C)						Temperature of producer gas (°C)					
	30 m ³ /hr			50 m ³ /hr			30 m ³ /hr			50 m ³ /hr		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10	401	370	546	363	359	467	130	112	151	108	88	103
20	382	477	531	333	373	445	140	125	155	115	105	112
30	378	499	464	483	643	458	140	130	160	125	150	120
40	408	478	454	516	593	623	150	145	165	120	160	130
50	374	486	550	504	528	660	155	152	158	128	155	138
60	406	471	582	576	576	633	170	165	160	125	152	138
70	486	496	518	489	663	674	175	160	150	110	148	130
80	495	458	535	591	609	651	150	165	144	128	144	103
90	492	460	530	611	595	647	155	155	166	115	139	85
100	452	466	556	484	637	667	148	157	145	140	130	60
110	489	439	541	515	600	674	134	145	140	130	135	60
120	484	497	490	541	564	644	138	150	140	140	128	65
130	457	483	510	598	671	623	128	143	138	140	130	70
140	505	484	555	613	645	665	120	147	120	105	115	62

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ผลการทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยเผาเชื้อเพลิงแปรรูปกับเหง้ามันสำปะหลัง (1: 1) 20 kg

Time (min)	Temperature of gasification (°C)						Temperature of producer gas (°C)					
	30 m ³ /hr			50 m ³ /hr			30 m ³ /hr			50 m ³ /hr		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
150	592	540	560	673	612	644	135	151	130	115	110	68
170	611	500	-	-	690	756	100	145	-	-	90	70
180	626	512	-	-	665	753	100	148	-	-	80	70
190	639	-	-	-	-	735	85	-	-	-	-	62
200						709						95
Mean±SD (range value) (C)	504±50 (439-639)			604±91(384-735)			140±18(85-165)			108±22(62-140)		
Combustion rate kg/hr (dw)	6.5±0.6 (5.9-7.1)			6.1±0.4(5.7-6.4)			-			-		
kg of char (dw)	4.8±1.0(3.9-5.9)			4.5±0.7(3.9-5.3)			-			-		
Char yield (kg/kg)	0.2±0.1(0.2-0.3)			0.2±0.1(0.2-0.3)			-			-		

หมายเหตุ การเผาครั้งที่ 1 อัตราอากาศ 50 m³/hr ใช้เชื้อเพลิง 16 kg

การคำนวณต้นทุนการผลิต

การคำนวณต้นทุนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จากมูลฝอยเทศบาลกลางแจ้ง ประมาณ 579 kg/day ซึ่งสามารถผลิตเชื้อเพลิงได้ 328 kg/day โดยคำนวณที่อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 2.4649 baht/unit, energy adjustment charge (Ft) 0.8494 baht/unit และภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2550) ดังนี้

ขั้นตอนการคัดแยกมูลฝอยพลาสติก

ค่าแรง พนักงาน 3 p (300 baht/p/d)	900	baht
ค่าไฟฟ้า		
เครื่องทอรวมเมต 5 hp 44 min	10	baht
เครื่องบดพลาสติก 3 hp 8 hr	63	baht
ค่าเสื่อม		
เครื่องทอรวมเมต	47	baht
เครื่องบดพลาสติก	10	baht
รวม	1,030	baht

ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป

ค่าแรง พนักงาน 3 p (300 baht/p/d)	900	baht
ค่าไฟฟ้าเครื่องอัดแท่ง 5 hp x 2 เครื่อง	184	baht
มันป่น 146 kg (4 baht/kg)	584	baht
ค่าเสื่อม เครื่องอัดแท่ง 27 baht x 2 เครื่อง	54	baht
รวม	1,722	baht

ขั้นตอนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

อัตราเผาไหม้เชื้อเพลิง	6	kg/hr
ปริมาณการเผาไหม้เชื้อเพลิง	48	kg/unit/day
ค่าแรง พนักงาน (3 p x 300 baht/p/d)	900	baht
ค่าแก๊สสำหรับเผาไหม้ (328 kg x 1 baht/kg)	328	baht
ค่าไฟฟ้าปรับอากาศ (9 baht x 14 unit)	126	baht
ค่าเสื่อมเครื่องแก๊สซีไฟเออร์ (27 baht x 14 unit)	378	baht
รวม	1,732	baht
พลังงานที่ได้รับ (14.60 MJ/kg of fuel x 622 kg)	9,081	MJ หรือ 2,523 kWh

ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป} &= 1,030 \text{ baht} + 1,722 \text{ baht} \\ \text{(ทั้งหมด)} &= 2,752 \text{ baht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป} &= (1,030 \text{ baht} + 1,722 \text{ baht})/328 \text{ kg} \\ &= 8.39 \text{ baht/kg} \end{aligned}$$

ต้นทุนการผลิตพลังงาน

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตพลังงานทั้งหมด} &= 1,030 \text{ baht} + 1,722 \text{ baht} + 1,732 \text{ baht} \\ &= 4,484 \text{ baht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตพลังงาน} &= 4,484 \text{ baht}/9,081 \text{ MJ} \\ &= 0.49 \text{ baht/MJ หรือ } 1.69 \text{ baht/kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตพลังงาน} &= 4,484 \text{ baht}/328 \text{ kg of RDF} \\ \text{(เชื้อเพลิงแปรรูป)} &= 13.67 \text{ baht/kg of RDF} \end{aligned}$$

$$\text{ต้นทุนการผลิตพลังงาน} = 4,484 \text{ baht}/579 \text{ kg of solid waste}$$

$$\text{(มูลฝอย)} = 7.74 \text{ baht/kg of solid waste}$$

รายได้การผลิตพลังงาน

คำนวณที่อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 2.4649 baht/kWh

$$\begin{aligned} \text{รายได้การผลิตพลังงานทั้งหมด} &= 2.4649 \text{ baht/kWh} \times 2,523 \text{ kWh} \\ &= 6,219 \text{ baht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รายได้การผลิตพลังงาน} &= 6,219 \text{ baht}/328 \text{ kg of RDF} \\ \text{(เชื้อเพลิงแปรรูป)} &= 18.96 \text{ baht/kg of RDF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตพลังงาน} &= 6,219 \text{ baht} / 579 \text{ kg of solid waste} \\ \text{(มูลฝอย)} &= 10.74 \text{ baht/kg of solid waste} \end{aligned}$$

กำไรการผลิตพลังงาน

$$\begin{aligned} \text{กำไรการผลิตพลังงานทั้งหมด} &= 6,219 \text{ baht} - 4,484 \text{ baht} \\ &= 1,735 \text{ baht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รายได้การผลิตพลังงาน} &= (18.96 \text{ baht} - 13.67 \text{ baht})/\text{kg of RDF} \\ \text{(เชื้อเพลิงแปรรูป)} &= 5.29 \text{ baht/ kg of RDF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตพลังงาน} &= (10.74 \text{ baht} - 7.74 \text{ baht})/\text{kg of solid waste} \\ \text{(มูลฝอย)} &= 3 \text{ baht/kg of solid waste} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าเสื่อมสภาพ

คำนวณค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักร โดยกำหนดอายุการใช้งาน 10 ปี ทำงานต่อเนื่องทุกวัน

ตัวอย่าง

เครื่องทอรวมเมล ราคา 170,000 baht

$$\begin{aligned} \text{ค่าเสื่อมราคา} &= 170,000 \text{ baht} / (10 \text{ year} \times 365 \text{ day/year}) \\ &= 47 \text{ baht/day} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าไฟฟ้า

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 2.4649 baht/kWh, ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (energy adjustment charge, Ft) 0.8494 baht/kWh และภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2550)

ตัวอย่าง

เครื่องทอรวมเมล กำลังไฟฟ้า 5 hp (3.7 kW) ระยะเวลาทำงาน 44 min/day (0.73 hr/d)

$$\begin{aligned} \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} &= 3.7 \text{ kW} \times 0.7333 \text{ hr/day} \times 2.4649 \text{ baht/kWh} \\ &= 6.6552 \text{ baht/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต} &= 3.7 \text{ kW} \times 0.73 \text{ hr/d} \times 0.8494 \text{ baht/kWh} \\ &= 2.2934 \text{ baht/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ภาษีมูลค่าเพิ่ม(7\%)} &= (6.6552 \text{ baht/day} + 2.2934 \text{ baht/day}) \times 7/100 \\ &= 0.6264 \text{ baht/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} + \text{ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต} + \text{ภาษีมูลค่าเพิ่ม} \\ &= 6.6552 \text{ baht/day} + 2.2934 \text{ baht/day} + 0.6264 \text{ baht/day} \\ &= 9.5740 \text{ baht/day} \end{aligned}$$