

การวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานยิปซัมบอร์ด

โรงงานยิปซัมบอร์ด ที่ได้เลือกเป็นกรณีศึกษาของการวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็กเซอร์ยีนั้น ตั้งอยู่บนถนนบางไทร-บางปะอิน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ระยะทางห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 60 กม. ใช้เวลาเดินทางโดยรถโดยสารประจำทาง ประมาณ 1 ชม.

ผลผลิตหลักของโรงงานนี้คือ ปูนปลาสเตอร์สำหรับโบกผนังบ้านหรือสิ่งก่อสร้าง และแผ่นยิปซัมบอร์ด ซึ่งใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเช่นกัน โดยใช้เป็นฝ้าเพดานซึ่งกันความร้อนได้ ในการนี้ทางโรงงานมีนโยบายจะเพิ่มผลผลิตให้มากขึ้นตามความต้องการของตลาด ในขณะที่ลดต้นทุนการผลิตต่อตันแผ่นบอร์ดให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

4.1 กระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมบอร์ดของโรงงาน

แรยิปซัมจะถูกลำเลียงใส่เครื่องป้อน (Feeder) ซึ่งป้อนแร่เข้าเครื่องบด (Crusher) เพื่อบดให้ละเอียด จากนั้นแร่ที่บดเสร็จแล้วจะถูกส่งต่อไปยังเตาอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryer) ซึ่งจะทำหน้าที่เผาไล่ความชื้นจากแร่ให้หมด แร่ที่ออกจากเตาอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryer) จะมีความชื้นเป็น 0% และไหลต่อไปยังเครื่องบดละเอียด (Gypsum Hammer Mill) เพื่อบดแร่ให้ละเอียดมากพอที่จะนำไปเผาไล่น้ำผลึกของแรยิปซัมให้กลายเป็นปลาสเตอร์ (Plaster) ในอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แคลไซน์ (Calcine) ซึ่งเรียกว่า Imp.Mill โดยเผาที่อุณหภูมิ 125-130 °C เพื่อให้ได้ปลาสเตอร์แล้วส่งต่อเข้าไปยังไซโล (Silo) เพื่อเก็บรอไว้ส่งไปยังกระบวนการทำแผ่นบอร์ด กระบวนการผลิตแผ่นบอร์ดจะประกอบด้วยเครื่องผสม (Mixer) สำหรับผสมผงปลาสเตอร์กับสารเคมีและน้ำเข้าด้วยกันในรูปสเลอรี (Slurry) จากนั้นสเลอรีจะถูกเทเกลี่ยลงบนกระดาษที่วิ่งมาจากม้วนกระดาษ (paper roller) สำหรับเป็นแผ่นหน้าของบอร์ด ขณะเดียวกันสเลอรีจะถูกรีดให้มีความหนาตามที่ต้องการด้วยเครื่องรีด (Pinch Roller) กระดาษอีกหนึ่งสายที่อยู่ด้านบน จะวิ่งปะกบกับแผ่นบอร์ดที่เคลื่อนผ่านเครื่องรีด จากนั้นแผ่นบอร์ดที่ได้จะถูกลำเลียงบนสายพาน (conveyer) ไปตัดโดยใบมีด (cutter) ให้ได้

ความยาวของบอร์ดตามมาตรฐานที่ต้องการ แผ่นบอร์ดที่ตัดขนาดเรียบร้อยแล้วจะถูกลำเลียงเข้าไปยังเตาอบบอร์ด (Board Dryer) แบบอุโมงค์ ซึ่งใช้แหล่งความร้อนจากไอน้ำ (Steam) ในการผลิตลมร้อน เพื่ออบแผ่นบอร์ดให้แห้งตามที่กำหนดไว้

ขนาดของบอร์ดที่ผลิตมี 2 ขนาดด้วยกันคือ

1. ขนาดบอร์ดหนา 1.27 ซม. กว้าง 122 ซม. และยาว 259 ซม.
2. ขนาดบอร์ดหนา 9 มม. กว้าง 1.20 เมตร และยาว 2.40 เมตร โดยกระบวนการผลิตแผ่นบอร์ดของโรงงานอย่างง่ายได้แสดงไว้ในรูป 4.1

4.2 การใช้พลังงานในอดีตของโรงงาน

พลังงานที่ใช้ในโรงงานที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ

1. พลังงานจากแหล่งน้ำมันเตา (fuel oil) ซึ่งใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนกับอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต
2. พลังงานจากแหล่งไฟฟ้าซึ่งใช้กับมอเตอร์, ฝัดลม เป็นต้น ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต

ดังได้แสดงไว้ในรูป 4.2-4.6 และได้แสดงปริมาณการใช้พลังงานทั้งจากแหล่งความร้อนและแหล่งพลังงานไฟฟ้า ในตารางที่ 4.1-4.7

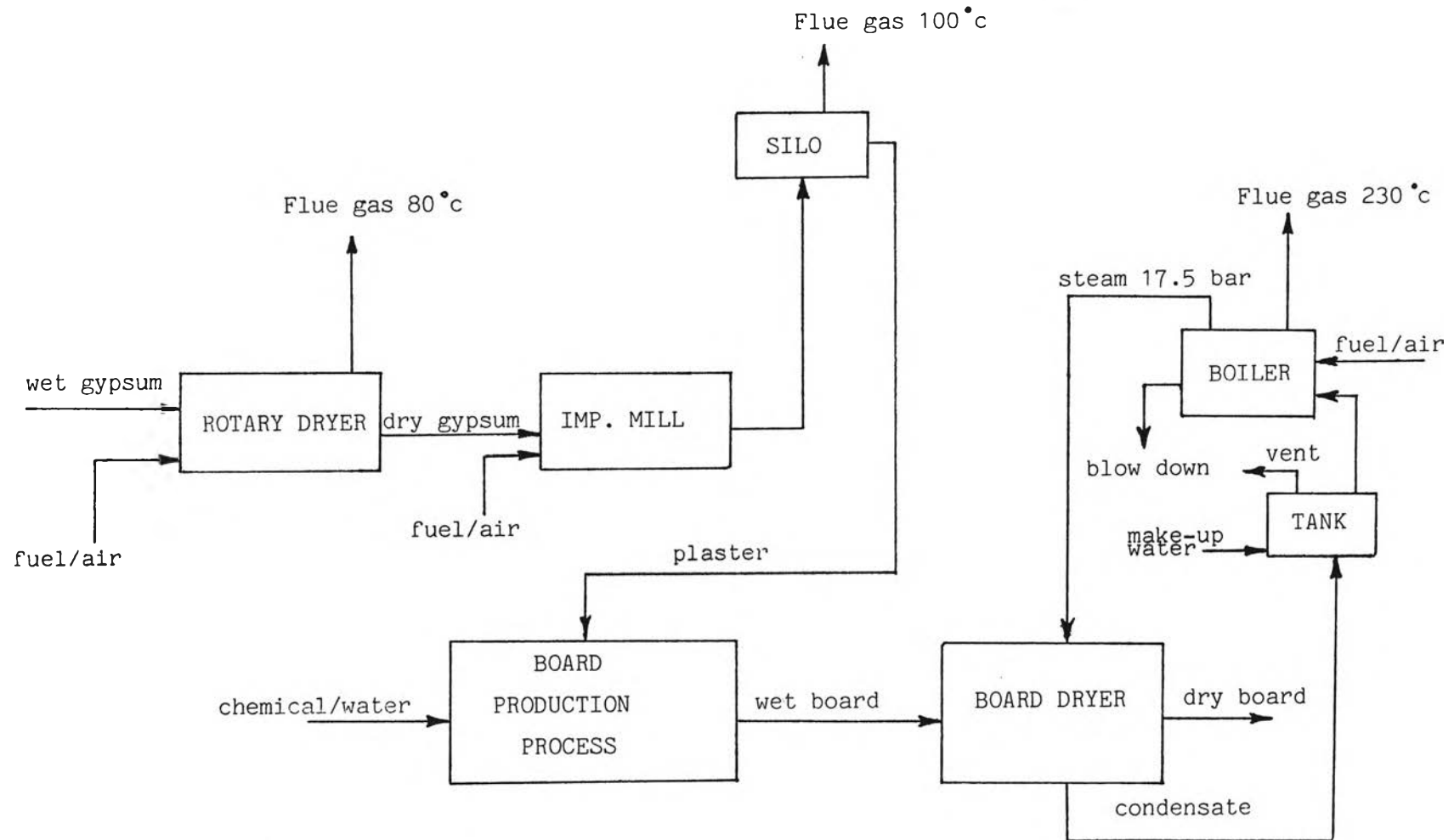


Fig 4.1 Simplified Block Diagram of Board Production Process.

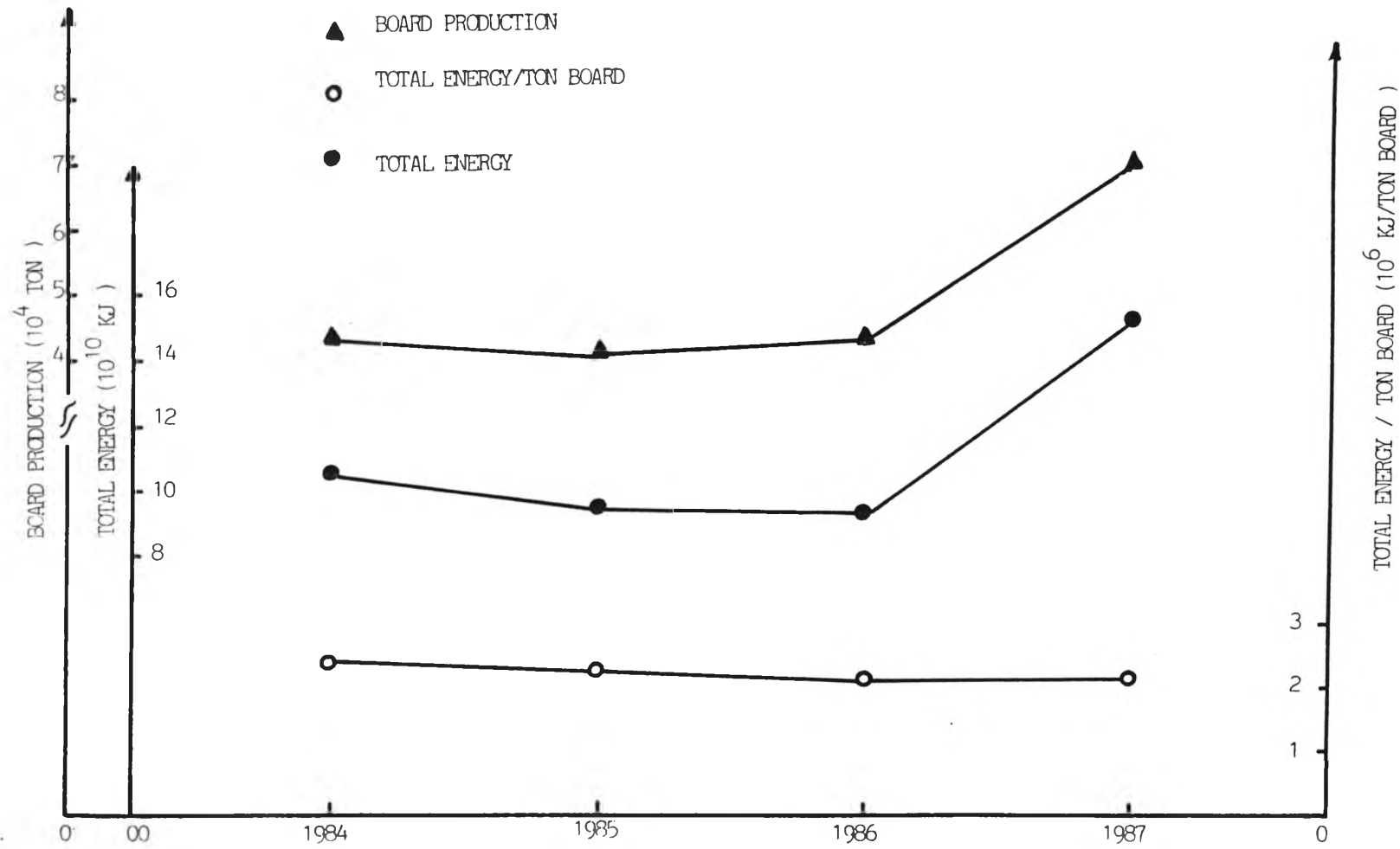


Fig. 4.2 Historical Yearly Energy Consumption

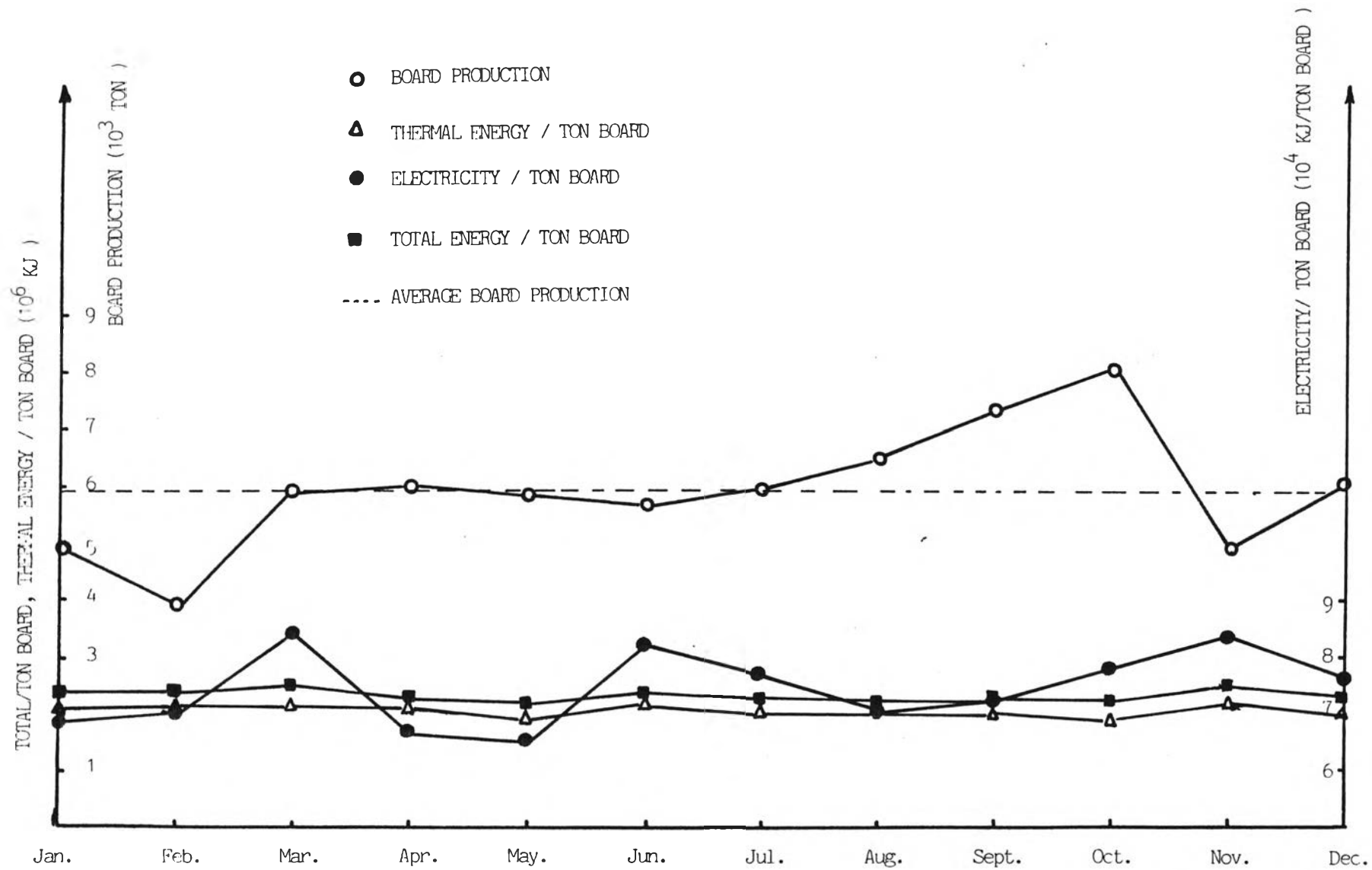
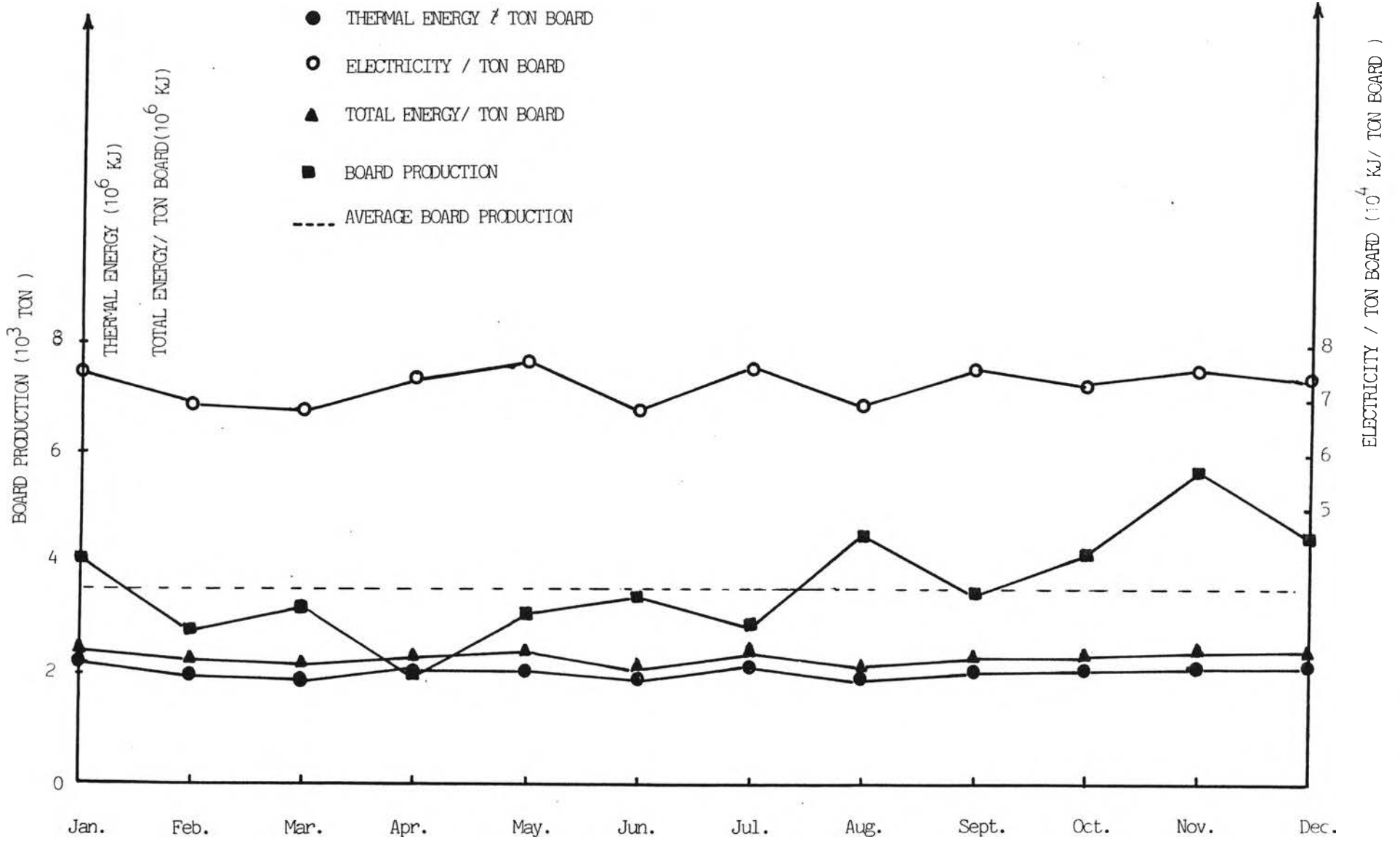


Fig. 4.3 Historical Monthly Energy Consumption in 1987



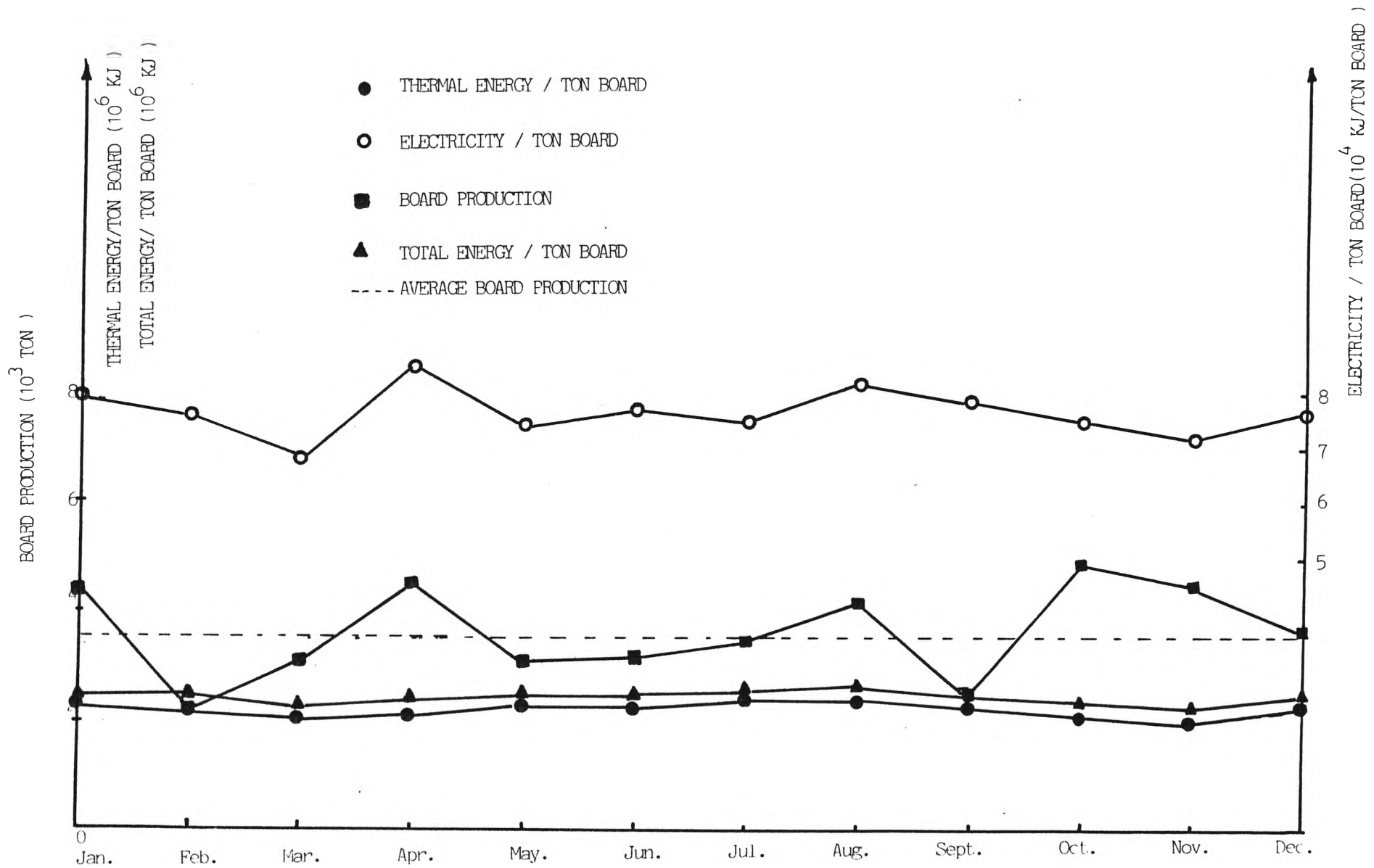


Fig. 4.5 Historical Monthly Energy Consumption in 1985

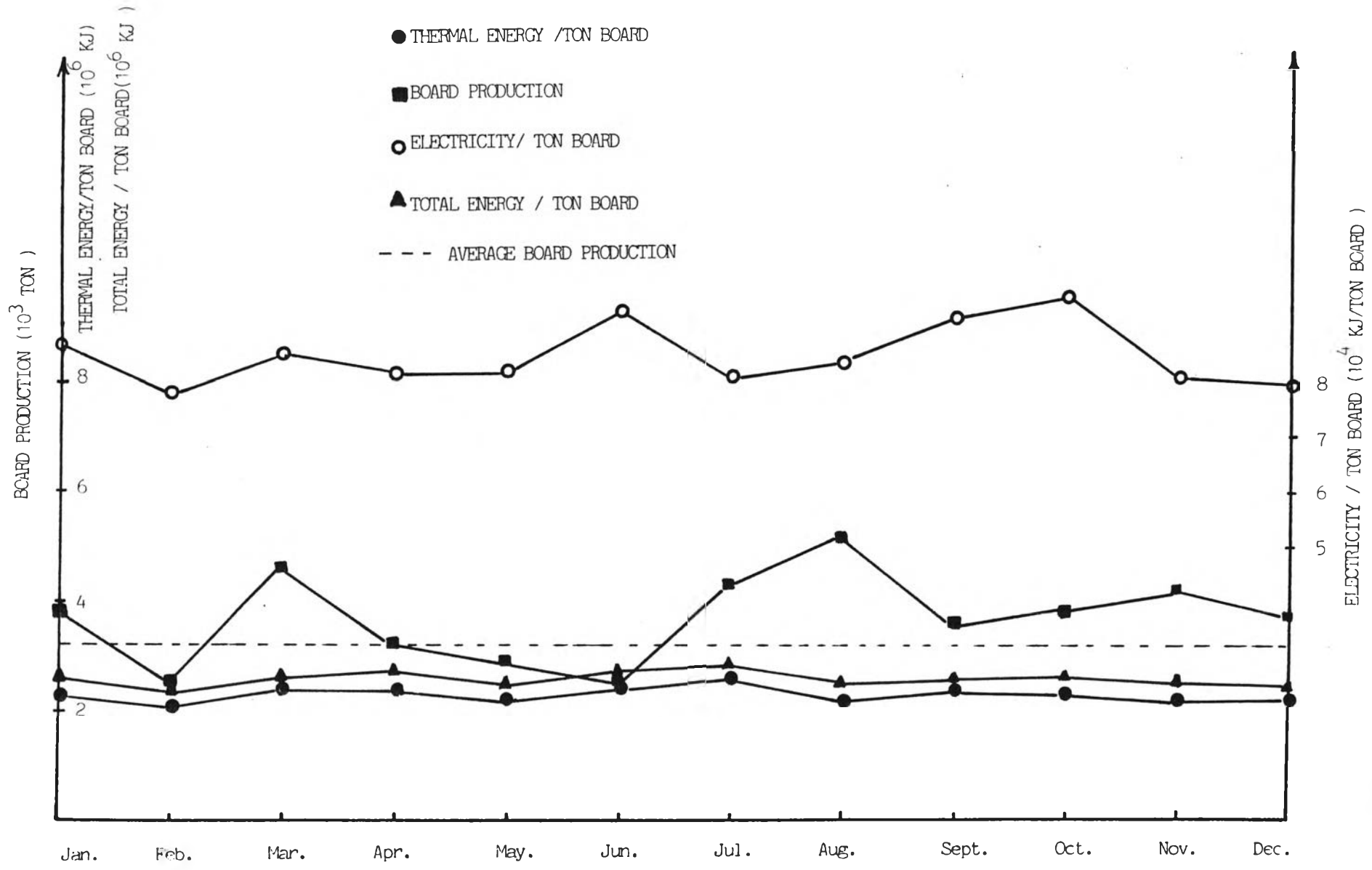


Fig. 4.6 Historical Monthly Energy Consumption in 1984

Table 4.1 Yearly Energy Consumption and Cost

LIST	UNIT	1984	1985	1986	1987
Fuel oil	liters	2,513,531	2,305,071	2,255,878	3,636,526
	kJ	1.0210×10^{11}	9.3634×10^{10}	9.1636×10^{10}	1.4772×10^{11}
	Cost share (MB)	10.4236	9.5591	5.9465	10.7641
	Specific cost (B/ton board)	235.2885	224.2197	134.2800	151.6977
Electricity	Kw-hr	1,046,746	917,156	902,756	1,477,217
	kJ	3.7683×10^9	3.3018×10^9	3.2499×10^9	5.3180×10^9
	Cost share (MB)	1.5073	1.3207	1.2999	1.8169
	Specific cost (B/ton board)	34.0251	30.9786	29.3550	25.6065
Fuel oil price	baht/liter	4.147	4.147	2.636	2.960
Elec. price	baht/unit	1.44	1.44	1.44	1.23
Board products	ton	44,301.415	42,632.871	44,284.276	70,957.664
Total energy	kJ	1.0587×10^{11}	9.6936×10^{10}	9.4886×10^{10}	1.5304×10^{11}
% Fuel oil share of total energy	%	96.44	96.59	96.57	96.52
% Electricity share of total energy	%	3.56	3.41	3.43	3.48
Total cost of energy	MB	11.9309	10.8798	7.2464	12.5810
% of fuel oil cost/total cost	%	87.37	87.86	82.06	85.56
% of electricity /total cost	%	12.63	12.14	17.94	14.44
<u>Total energy</u> ton board	kJ/ton board	2.3898×10^6	2.2737×10^6	2.1427×10^6	2.1568×10^6
<u>Total cost</u> ton board	B/ton board	269.3136	255.1983	163.6350	177.3042

Table 4.2 Monthly Energy Consumption in 1987

Monthly	BOARD PRODUCTION		FUEL OIL			ELECTRICITY		
	Pieces	ton	Liters	kJ	kJ/ton board	kw-hr	kJ _e	kJ _e /ton board
Jan.	168,850	4,896.650	258,572	1.0503x10 ¹⁰	2.1449x10 ⁶	93,785	3.3763x10 ⁸	6.895x10 ⁴
Feb.	136,819	3,967.751	212,857	8.6465x10 ⁹	2.1792x10 ⁶	77,983	2.8074x10 ⁸	7.0755x10 ⁴
Mar.	204,777	5,938.533	320,082	1.3002x10 ¹⁰	2.1894x10 ⁶	139,157	5.0097x10 ⁸	8.4359x10 ⁴
Apr.	205,869	5,970.201	312,310	1.2686x10 ¹⁰	2.1249x10 ⁶	110,973	3.9550x10 ⁸	6.1965x10 ⁴
May.	201,083	5,831.407	284,378	1.1552x10 ¹⁰	1.9810x10 ⁶	105,882	3.8118x10 ⁸	6.5366x10 ⁴
Jun.	195,344	5,664.976	302,331	1.2281x10 ¹⁰	2.1679x10 ⁶	129,331	4.6559x10 ⁸	8.2187x10 ⁴
Jul.	205,436	5,957.644	300,436	1.2204x10 ¹⁰	2.0485x10 ⁶	128,609	4.6299x10 ⁸	7.7713x10 ⁴
Aug.	233,593	6,484.197	322,733	1.3109x10 ¹⁰	2.0217x10 ⁶	127,641	4.5951x10 ⁸	7.0866x10 ⁴
Sept.	252,387	7,319.223	361,949	1.4703x10 ¹⁰	2.0088x10 ⁶	147,304	5.3029x10 ⁸	7.2451x10 ⁴
Oct.	276,764	8,026.156	385,855	1.5674x10 ¹⁰	1.9529x10 ⁶	174,877	6.2956x10 ⁸	7.8438x10 ⁴
Nov.	168,851	4,896.679	266,962	1.0844x10 ¹⁰	2.2146x10 ⁶	113,726	4.0941x10 ⁸	8.3609x10 ⁴
Dec.	207,043	6,004.274	308,061	1.2514x10 ¹⁰	2.0842x10 ⁶	127,949	4.6062x10 ⁸	7.6715x10 ⁴
Total	2,446,816	70,957.664	3,636,526	1.4772x10 ¹¹		1,477,217	5.3180x10 ⁹	

Table 4.3 Monthly Energy Consumption in 1986

Monthly	BOARD PRODUCTION		FUEL OIL			ELECTRICITY		
	Pieces	ton	Liters	kJ	kJ/ton board	kw. hr	kJ _e	kJ _e /ton board
Jan.	142,123	4,121.567	226,369	9.1953x10 ⁹	2.2310x10 ⁶	86,055	3.0980x10 ⁸	7.5165x10 ⁴
Feb.	96,947	2,811.463	143,630	5.8344x10 ⁹	2.0752x10 ⁶	54,164	1.9499x10 ⁸	6.9355x10 ⁴
Mar.	112,886	3,273.694	159,798	6.4911x10 ⁹	1.9828x10 ⁶	61,867	2.2272x10 ⁸	6.8033x10 ⁴
Apr.	70,693	2,050.097	104,315	4.2374x10 ⁹	2.0669x10 ⁶	42,144	1.5172x10 ⁸	7.4006x10 ⁴
May.	108,766	3,154.214	163,030	6.6224x10 ⁹	2.0995x10 ⁶	67,515	2.4305x10 ⁸	7.7055x10 ⁴
Jun.	117,322	3,402.338	158,345	6.4321x10 ⁹	1.8905x10 ⁶	64,564	2.3243x10 ⁸	6.8315x10 ⁴
Jul.	98,849	2,866.621	152,650	6.2008x10 ⁹	2.1631x10 ⁶	60,885	2.1919x10 ⁸	7.6463x10 ⁴
Aug.	157,227	4,559.583	215,609	8.7583x10 ⁹	1.9208x10 ⁶	87,815	3.1613x10 ⁸	6.9333x10 ⁴
Sept.	121,051	3,510.479	175,310	7.1212x10 ⁹	2.0286x10 ⁶	74,595	2.6854x10 ⁸	7.6497x10 ⁴
Oct.	146,709	4,254.561	219,532	8.9176x10 ⁹	2.0960x10 ⁶	87,136	3.1369x10 ⁸	7.3730x10 ⁴
Nov.	198,582	5,758.878	300,400	1.2204x10 ¹⁰	2.1192x10 ⁶	122,367	4.4052x10 ⁸	7.6484x10 ⁴
Dec.	155,889	4,520.781	236,860	9.6215x10 ¹⁰	2.1283x10 ⁶	93,649	3.3714x10 ⁸	7.4575x10 ⁴
Total	1,527,044	44,284.276	2,255,878	9.1636x10 ¹⁰		902,756	3.2499x10 ⁹	

Table 4.4 Monthly Energy Consumption in 1985

Monthly	BOARD PRODUCTION		FUEL OIL			ELECTRICITY		
	Pieces	ton	Liters	kJ	kJ/ton board	kw- hr	kJ _e	kJ/ton board
Jan.	151,197	4,384.713	245,329	9.9655×10^9	2.2728×10^6	97,016	3.4926×10^8	7.9654×10^4
Feb.	75,054	2,165.566	117,797	4.7850×10^9	2.2096×10^6	51,688	1.8608×10^8	8.5926×10^4
Mar.	107,399	3,114.571	160,217	6.5082×10^9	2.0896×10^6	59,185	2.1307×10^8	6.8410×10^4
Apr.	154,473	4,479.717	232,958	9.4630×10^9	2.1040×10^6	105,492	3.7977×10^8	8.4775×10^4
May.	105,581	3,061.849	171,281	6.9576×10^9	2.2723×10^6	63,257	2.2773×10^8	7.4377×10^4
Jun.	108,644	3,150.676	175,761	7.1396×10^9	2.2661×10^6	67,591	2.4333×10^8	7.7231×10^4
Jul.	120,225	3,486.525	204,463	8.3055×10^9	2.3822×10^6	73,119	2.6323×10^8	7.5499×10^4
Aug.	145,644	4,223.676	248,215	1.0083×10^{10}	2.3873×10^6	96,552	3.4759×10^8	8.2296×10^4
Sept.	84,498	2,450.442	136,664	5.5514×10^9	2.2655×10^6	53,806	1.9370×10^8	7.9047×10^4
Oct.	167,356	4,853.324	251,512	1.0217×10^{10}	2.1052×10^6	101,055	3.6380×10^8	7.4959×10^4
Nov.	156,214	4,530.206	227,531	9.2425×10^9	2.0402×10^6	90,191	3.2469×10^8	7.1672×10^4
Dec.	93,814	2,720.606	153,343	6.2289×10^9	2.2895×10^6	58,204	2.0953×10^8	7.7016×10^4
Total	1,470,099	42,632.871	2,305,071	9.363×10^{10}		917,156	3.3018×10^9	

Table 4.5 Monthly Energy Consumption in 1984

Monthly	BOARD PRODUCTION		FUEL OIL			ELECTRICITY		
	Pieces	ton	Liters	kJ	kJ/ton board	kw - hr	kJ _e	kJ/ton board
Jan.	131,825	3,822.925	216,191	8.7819x10 ⁹	2.9272x10 ⁶	92,748	3.3389x10 ⁸	8.7338x10 ⁴
Feb.	86,748	2,515.692	129,962	5.2792x10 ⁹	2.0985x10 ⁶	54,790	1.9724x10 ⁸	7.8404x10 ⁴
Mar.	159,561	4,627.269	269,178	1.0934x10 ¹⁰	2.3629x10 ⁶	109,536	3.9433x10 ⁸	8.5292x10 ⁴
Apr.	110,408	3,201.832	189,134	7.6828x10 ⁹	2.3995x10 ⁶	73,100	2.6316x10 ⁸	8.2190x10 ⁴
May.	101,748	2,950.692	161,867	6.5752x10 ⁹	2.2283x10 ⁶	67,028	2.4130x10 ⁸	8.1777x10 ⁴
Jun.	82,033	2,378.957	140,377	5.7023x10 ⁹	2.3969x10 ⁶	61,935	2.2297x10 ⁸	9.3726x10 ⁴
Jul.	148,200	4,297.800	270,231	1.0977x10 ¹⁰	2.5541x10 ⁶	96,500	3.4740x10 ⁸	8.0832x10 ⁴
Aug.	179,776	5,213.504	284,945	1.1575x10 ¹⁰	2.2202x10 ⁶	121,245	4.3648 x10 ⁸	8.3721x10 ⁴
Sept.	123,302	3,575.758	198,056	8.0452x10 ⁹	2.2499x10 ⁶	91,486	3.2935x10 ⁸	9.2106x10 ⁴
Oct.	132,732	3,848.938	219,801	8.9285x10 ⁹	2.3197x10 ⁶	102,462	3.6886x10 ⁸	9.5834x10 ⁴
Nov.	144,066	4,177.914	231,275	9.3946x10 ⁹	2.2486x10 ⁶	94,264	3.3935x10 ⁸	8.1225x10 ⁴
Dec.	127,246	3,690.134	202,514	8.2263x10 ⁹	2.2293x10 ⁶	81,652	2.9395x10 ⁸	7.9658x10 ⁴
Total	1,527,635	44,301.415	2,513,531	1.0210x10 ¹¹		1,046,746	3.7683x10 ⁹	

Table 4.6 Energy Equivalent of Electricity and Total Energy in 1986 - 1987

Monthly	1986				1987			
	BOARD PRODUCTION(ton)	FUEL OIL (kJ)	ELECTRICITY (O.E.) (kJ)	TOTAL TON BOARD (kJ)	BOARD PRODUCTION(ton)	FUEL OIL (kJ)	ELECTRICITY (O.E.) (kJ)	TOTAL TON BOARD(kJ)
Jan.	4,121.567	9.1953×10^9	1.0327×10^9	2.4816×10^6	4896.650	1.0503×10^{10}	1.1254×10^9	2.3748×10^6
Feb.	2,811.463	5.8344×10^9	6.4997×10^8	2.3064×10^6	3,967.751	8.6465×10^9	9.3580×10^8	2.4150×10^6
Mar.	3,273.694	6.4911×10^9	7.4240×10^8	2.2096×10^6	5,938.533	1.3002×10^{10}	1.6699×10^9	2.4706×10^6
Apr.	2,050.097	4.2374×10^9	5.0573×10^8	2.3136×10^6	5,970.201	1.2686×10^{10}	1.3317×10^9	2.3479×10^6
May	3,154.214	6.6224×10^9	8.1018×10^8	2.3564×10^6	5,831.407	1.1552×10^{10}	1.2706×10^9	2.1989×10^6
Jun.	3,402.338	6.4321×10^9	7.7477×10^8	2.1182×10^6	5,664.976	1.2281×10^{10}	1.5520×10^9	2.4418×10^6
Jul.	2,866.621	6.2008×10^9	7.3062×10^8	2.4180×10^6	5,957.644	1.2204×10^{10}	1.5433×10^9	2.3075×10^6
Aug.	4,559.583	8.7583×10^9	1.0538×10^9	2.1520×10^6	6,484.197	1.3109×10^{10}	1.5317×10^9	2.2579×10^6
Sept.	3,510.479	7.1212×10^9	8.9514×10^8	2.2835×10^6	7,319.223	1.4703×10^{10}	1.7676×10^9	2.2503×10^6
Oct.	4,254.561	8.9176×10^9	1.0456×10^9	2.3418×10^6	8,026.156	1.5674×10^{10}	2.0985×10^9	2.2143×10^6
Nov.	5,758.878	1.2204×10^{10}	1.4686×10^9	2.3741×10^6	4,896.679	1.0844×10^{10}	1.3647×10^9	2.4933×10^6
Dec.	4,520.781	9.6215×10^9	1.1238×10^9	2.3769×10^6	6,004.247	1.2514×10^{10}	1.5354×10^9	2.3399×10^6

Table 4.7 Energy Equivalent of Electricity and Total Energy in 1984 - 1985

Monthly	1984				1985			
	BOARD PRODUCTION(ton)	FUEL OIL (kJ)	ELECTRICITY (O.E.) (kJ)	TOTAL TON BOARD(kJ)	BOARD PRODUCTION(ton)	FUEL OIL (kJ)	ELECTRICITY (O.E.) (kJ)	TOTAL TON BOARD(kJ)
Jan.	3,822.925	8.7819x10 ⁹	1.1130x10 ⁹	2.5883x10 ⁶	4,384.713	9.9655x10 ⁹	1.1642x10 ⁹	2.5383x10 ⁶
Feb.	2,515.692	5.2792x10 ⁹	6.5748x10 ⁸	2.3598x10 ⁶	2,165.566	4.7850x10 ⁹	6.2026x10 ⁸	2.4960x10 ⁶
Mar.	4,627.269	1.0934x10 ¹⁰	1.3144x10 ⁹	2.6470x10 ⁶	3,114.571	6.5082x10 ⁹	7.1022x10 ⁸	2.3176x10 ⁶
Apr.	3,201.832	7.6828x10 ⁹	8.7720x10 ⁸	2.6735x10 ⁶	4,479.717	9.4630x10 ⁹	1.2659x10 ⁹	2.3950x10 ⁶
May.	2,950.692	6.5752x10 ⁹	8.0434x10 ⁸	2.5010x10 ⁶	3,061.849	6.9576x10 ⁹	7.5908x10 ⁸	2.5202x10 ⁶
Jun.	2,378.957	5.7023x10 ⁹	7.4322x10 ⁸	2.7094x10 ⁶	3,150.676	7.1396x10 ⁹	8.1109x10 ⁸	2.5235x10 ⁶
Jul.	4,297.800	1.0977x10 ¹⁰	1.1580x10 ⁹	2.8235x10 ⁶	3,486.525	8.3055x10 ⁹	8.7743x10 ⁸	2.6338x10 ⁶
Aug.	5,213.504	1.1575x10 ¹⁰	1.4549x10 ⁹	2.4993x10 ⁶	4,223.676	1.0083x10 ¹⁰	1.1586x10 ⁹	2.6616x10 ⁶
Sept.	3,575.758	8.0452x10 ⁹	1.0978x10 ⁹	2.5569x10 ⁶	2,450.442	5.5514x10 ⁹	6.4567x10 ⁸	2.5290x10 ⁶
Oct.	3,848.938	8.9285x10 ⁹	1.2295x10 ⁹	2.6392x10 ⁶	4,853.324	1.0217x10 ¹⁰	1.2127x10 ⁹	2.3550x10 ⁶
Nov.	4,177.914	9.3946x10 ⁹	1.1312x10 ⁹	2.5194x10 ⁶	4,530.206	9.2425x10 ⁹	1.0823x10 ⁹	2.2791x10 ⁶
Dec.	3,690.134	8.2263x10 ⁹	9.7982x10 ⁸	2.4948x10 ⁶	2,720.606	6.2289x10 ⁹	6.9845x10 ⁸	2.5463x10 ⁶

4.3 การวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต

4.3.1 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานรอบขอบเขตรวมของโรงงาน (Overall mass and energy balances around the whole plant)

กระบวนการผลิตแผ่นบอร์ดของทั้งโรงงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบย่อย (subprocess) ซึ่งมีจังหวะเวลาในการทำงานไม่ตรงกันตลอดสัปดาห์คือ

ระบบย่อยที่ 1: ประกอบด้วยอุปกรณ์ Rotary Dryer และ Imp. mill ระยะเวลาเดินเครื่องของระบบย่อย 596.589 ชม./เดือน

ระบบย่อยที่ 2: ประกอบด้วยหน่วยผลิตแผ่นบอร์ด (Board Production Process), หม้อไอน้ำ (Boiler) และเตาอบแผ่นบอร์ด (Board Dryer) ระยะเวลาเดินเครื่องของระบบย่อยนี้ 672 ชม./เดือน

ในรูป 4.7 แสดงสมดุลมวลของระบบย่อย 1 และ 2 ในหน่วย kg/h (ช่วงเวลาที่ใช้คำนวณเท่ากับ 1 เดือน) ซึ่งในระบบย่อย subprocess 1) มวลขาเข้าจะได้แก่ มวลเนื่องจากแร่ใยซั่ม 9.8164×10^3 kg/h เข้าที่อุปกรณ์เตาอบแบบหมุน (Rotary dryer), เนื่องจากเชื้อเพลิง ๗ ที่นี้ใช้น้ำมันเตาที่อุปกรณ์หลัก 2 ตัวคือเตาอบแบบหมุน และ Imp. mill และเนื่องจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้และใช้ในการทำงานของอุปกรณ์ นอกจากนี้ในรูป 4.7 ยังได้แสดงถึงมวลขาออกทั้งในระบบย่อย 1 และ 2 ด้วย

ส่วนในรูป 4.8 นั้น แสดงสมดุลมวลในหน่วย (kg/month) ของทั้งโรงงาน(ช่วงเวลาที่ใช้คำนวณเท่ากับ 1 เดือน) ซึ่งมวลขาเข้าและมวลขาออกของโรงงานได้แสดงไว้ในรูป 4.8 โดยละเอียดแล้ว อนึ่ง ใน 1 เดือนของการทำงานของระบบย่อย 1 และ 2 นั้นใช้เวลาต่างกันตั้งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ส่วนในรูป 4.9 แสดงสมดุลพลังงานรอบขอบเขตระบบย่อย 1 และ 2 ในหน่วย kJ/h ซึ่งได้แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบย่อย 1 ว่ามีพลังงานที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานขาเข้ารวมเป็น 72.96% และในระบบย่อยนี้มีค่าพลังงานที่สูญเสียจากระบบเป็นจำนวน 2.4059×10^6 kJ/h หรือ 3.40% และในระบบย่อย 2 มีประสิทธิภาพรวมเป็น 49.39% และมีความร้อนที่สูญเสียจากระบบเป็น 1.433×10^6 kJ/h หรือเท่ากับ 5.78% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมด

ส่วนในรูป 4.10 นั้น แสดงถึงประสิทธิภาพรวมของทั้งโรงงานว่าเป็นค่าเท่ากับ 54.71% ของพลังงานขาเข้ารวม นอกจากนี้ยังได้แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปจากขอบเขตด้วย

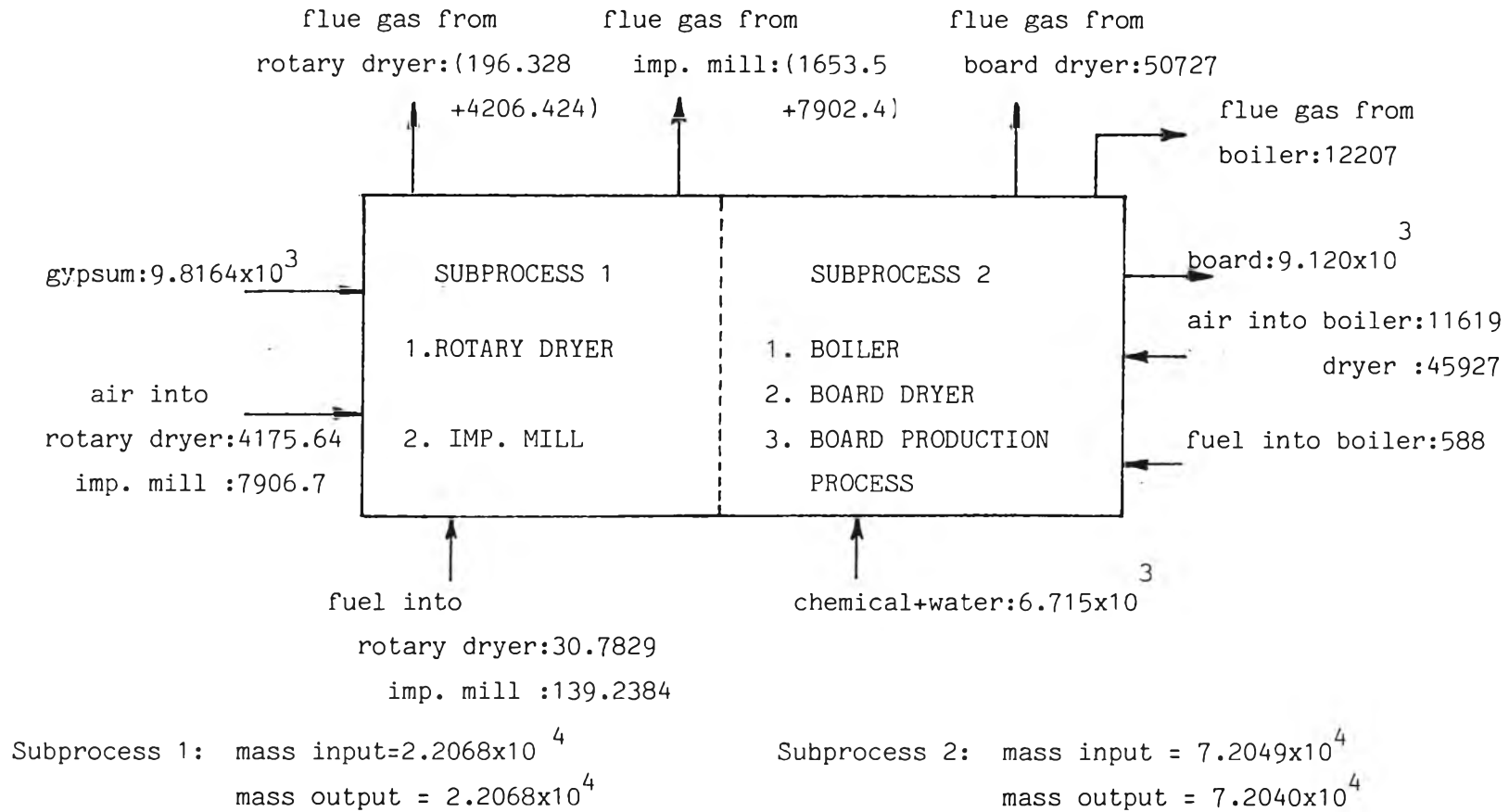


Fig 4.7 Mass Balance around Subprocesses 1 & 2 (kg/h)

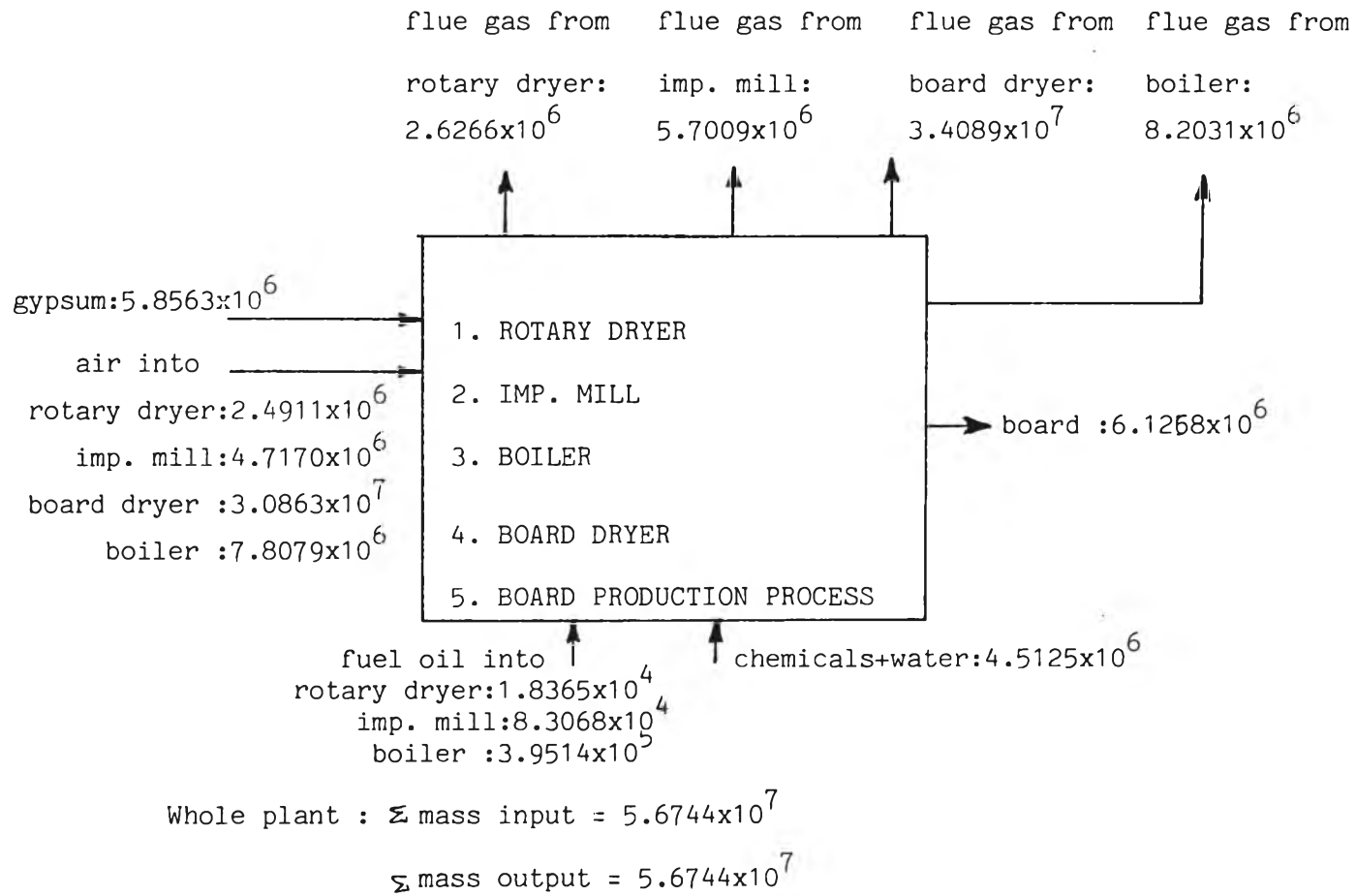
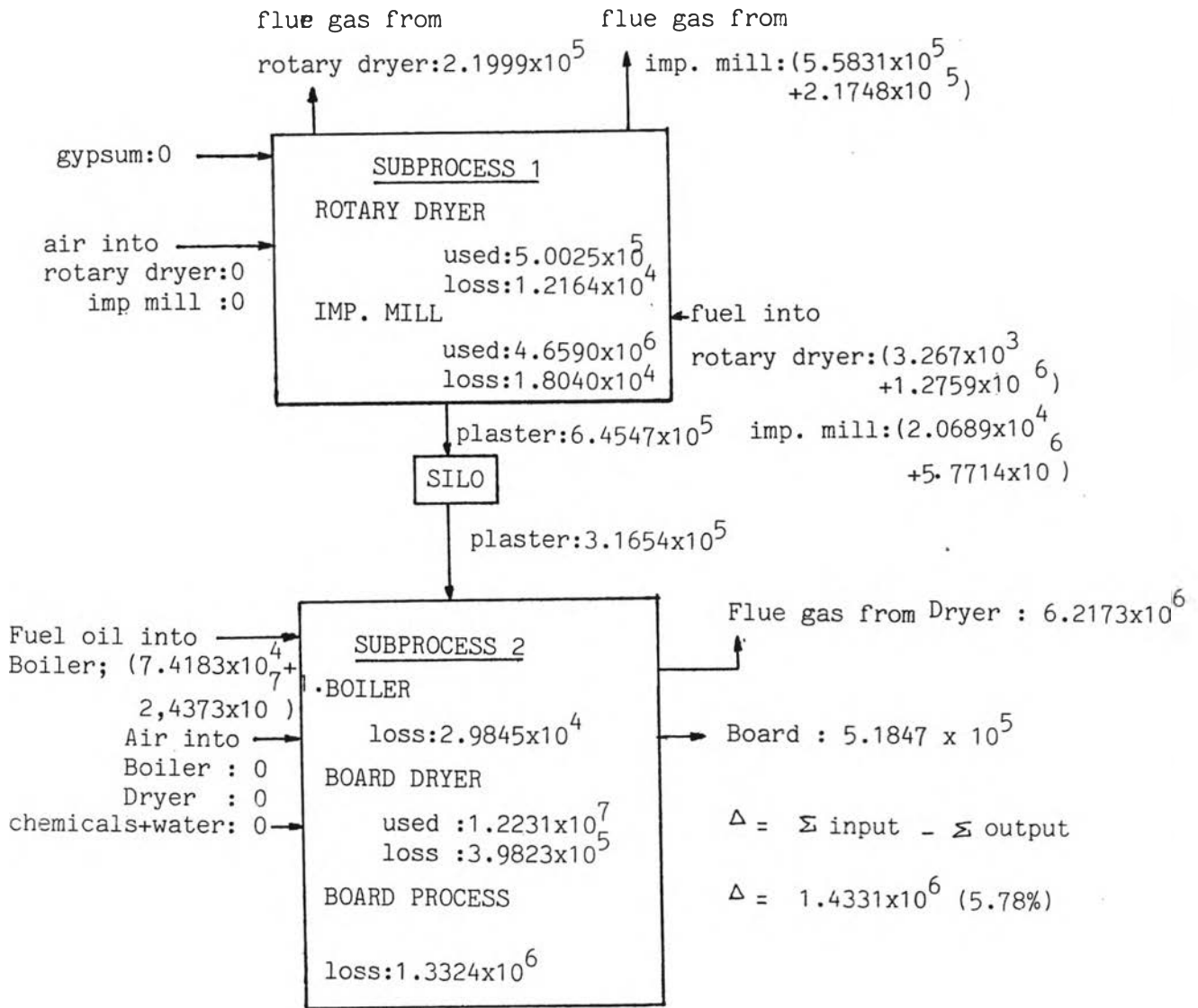


Fig 4.8 Mass Balance around Whole Plant (kg /month)



subprocess 1 : $\Sigma \text{ input} = 7.0713 \times 10^6$
 $\Sigma \text{ output} = 6.8307 \times 10^6 +$
 $\Delta = 2.4059 \times 10^5$

subprocess 2 : $\Sigma \text{ input} = 2.4764 \times 10^7$
 $\Sigma \text{ output} = 2.3331 \times 10^7 +$
 $\Delta = 1.4331 \times 10^6$

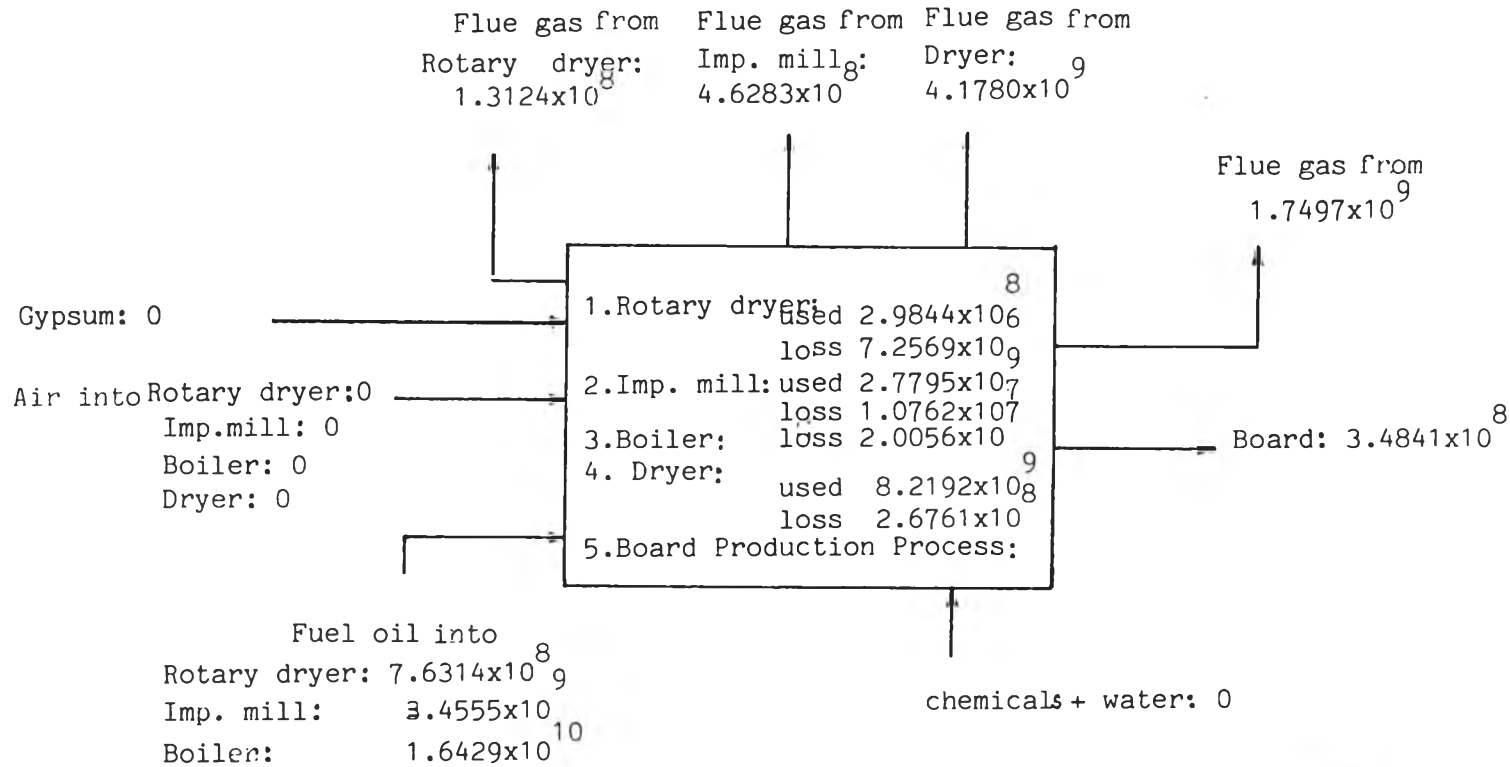
Overall Efficiency of subprocess 1

$= \frac{\text{energy used}}{\text{energy input}}$
 $= \frac{5.1593 \times 10^6}{7.0713 \times 10^6} \times 100$
 $= 72.96\%$

Overall Efficiency of subprocess 2

$= \frac{\text{energy used}}{\text{energy input}}$
 $= \frac{1.2231 \times 10^7}{2.4764 \times 10^7} \times 100$
 $= 49.39\%$

Fig 4.9 Energy Balance around Subprocesses 1 & 2 (kJ/h)



$$\begin{aligned} \text{Overall Efficiency of plant } (\eta) &= \text{energy used} / \Sigma \text{ input} = \frac{1.1297 \times 10^{10}}{2.0648 \times 10^{10}} \times 100 \\ &= 54.71\% \\ \text{individual loss} &= 3.1089 \times 10^8 \text{ (1.51\%)} \end{aligned}$$

Fig 4.10 Energy Balance around Whole plant (kJ/month)

4.3.2 การวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็กเซอร์ยีรอบเตาอบแบบหมุน (Rotary dryer)
ข้อมูลในการวิเคราะห์ มีดังนี้

1. ปริมาณแร่ยิบซั่มเปียกที่เข้าตัวอุปกรณ์ = 9.8164×10^3 kg/h
ความชื้นของแร่ยิบซั่มประมาณ 2% โดยน้ำหนักเปียก

2. น้ำมันเตาเกรด C มีความหนาแน่นที่ $15^\circ\text{C} = 0.9408$ kg/l
จำนวน 32.720 l/h (30.7829 kg/h)
อุณหภูมิของน้ำมันเตาที่เข้าอุปกรณ์ 80°C
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (LHV) เป็น 41,450 kJ/kg
ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ของเชื้อเพลิงใช้ในรูปสูตรดังนี้

$$C_p = (1.685 + 0.0039 T^\circ\text{C})/s$$

โดยที่ s หมายถึง ค่าความหนาแน่นที่ 15°C

ดังนั้นที่ 80°C , C_p ของเชื้อเพลิง = 2.1227 kJ/kg.K

3. เตาอบแบบหมุนมีความยาวเป็น 15.0 m
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.5 m (O.D. = 1.63 m)
พื้นที่ผนังของอุปกรณ์เป็น 76.81 m²
ผนังอุปกรณ์ประกอบด้วยเหล็กหนา 0.0127 m ($k=288.0$ kJ/m.h.K) และใยหิน (rockwool) หนา 0.051 m ($k=0.122$ kJ/m.h.K)

4. อุณหภูมิที่น้ำออกจากเตาอบเป็น 80°C
ความร้อนจำเพาะของแร่ยิบซั่มเป็น 1.137 kJ/kg.K
อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกอุปกรณ์ 80°C
ความร้อนจำเพาะของลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็น 1.046 kJ/kg.K

5. อุณหภูมิที่ผนังของเตาอบเป็น 40°C

6. พลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์สำหรับหมุนอุปกรณ์

$$W_1 = 11.0 \text{ kW}$$

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับมอเตอร์สำหรับดูดลมร้อนออก

$$W_2 = 15 \text{ kW}$$

พลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์สำหรับบ่อนอากาศในการสันดาป

$$W_3 = 11 \text{ kW}$$

7. สภาวะมาตรฐานในการคำนวณ $T_o = 30^\circ\text{C}$, $P_o = 1 \text{ atm}$

8. อากาศในโรงงานมีความชื้น $0.0218 \text{ kg water/kg dry air}$

4.3.2.1 สมดุลมวลรอบเตาอบแบบหมุน (Rotary Dryer)

ในการคำนวณหาปริมาณอากาศในการสันดาป จะใช้สมการของ Boie ดังต่อไปนี้

$$A_o = \frac{(12.38)(H_1 - 1,100)}{10,000} \quad \text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel}$$

$$G_o = \frac{(15.75)(H_1 - 1,100)}{10,000} - 2.18 \quad \text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel}$$

$$G = G_o + (m-1)A_o \quad \text{และ} \quad A = mA_o$$

โดย

$$A = \text{ปริมาณอากาศที่ใช้จริง (m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel)}$$

$$G_o = \text{ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี (m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel)}$$

$$A_o = \text{ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel)}$$

$$H_1 = \text{ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kcal/kg fuel)}$$

$$m = \text{อัตราส่วนอากาศ (-)}$$

$$G = \text{ปริมาณก๊าซเสียที่ได้จริง (m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel)}$$

ณ ที่นี้คำนวณหาค่า $A_o = \frac{(12.38)(9,907-1,100)}{10,000} = 10.903 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel}$

$$G_o = \frac{(15.75)(9,907-1,100)}{10,000} - 2.18 = 11.691 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg fuel}$$

ปริมาณอากาศที่ใช้จริง เนื่องจาก ($m = 1.3$)

$$\begin{aligned} A &= 1.3 \times 10.903 \\ &= 14.1739 \quad \text{m}^3/\text{kg fuel} \end{aligned}$$

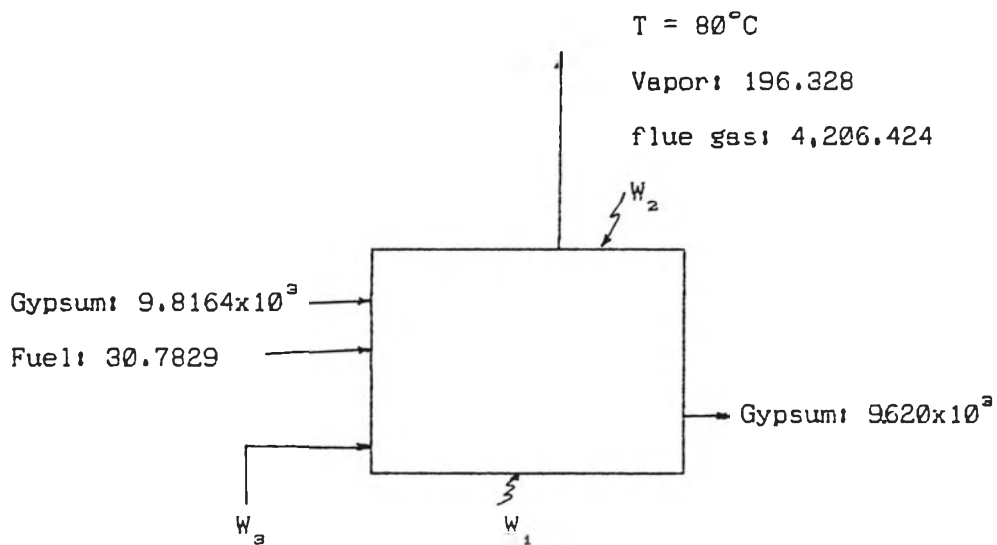
ใช้ความหนาแน่นของอากาศ = 1.2928 kg/m^3 ที่ 0°C

$$A = 18.3240 \quad \text{kg/kg fuel}$$

และ

$$\begin{aligned} G &= G_o + (m-1)A_o \\ &= 11.691 + (0.3)(10.903) \\ &= 14.9619 \quad \text{m}^3/\text{kg fuel} \end{aligned}$$

ดังนั้น ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ = $19.3427 \quad \text{kg/kg fuel}$



Air for combustion: 564.066

Air for drying: 3,611.575

Fig 4.11 สมดุลมวลรอบขอบเขตเตาอบแบบหมุน (kg/h)

4.3.2.2 สมดุลพลังงานรอบเตาอบแบบหมุน (Rotary dryer)

อุณหภูมิของก๊าซร้อนทิ้งเป็น 80°C ใช้ค่าความร้อนจำเพาะประมาณ $1.046 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

พลังงานขาเข้า (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนน้ำเข้าโดยเรย์บ์ซิม ($T=30^{\circ}\text{C}$) = 0
 2. พลังงานความร้อนน้ำเข้าโดยอากาศ ($T=30^{\circ}\text{C}$) = 0
 3. พลังงานความร้อนสัมผัสน้ำเข้าโดยเชื้อเพลิง = $30.7829 \times 2.1227 \times (80-30)$
= 3.267×10^3
 4. พลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง = $30.7829 \times 41,450$
= 1.2759×10^6
- พลังงานความร้อนขาเข้ารวม = $1.2792 \times 10^6 \text{ kJ/h}$
5. พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ = $1.3320 \times 10^5 \text{ kJ/h}$

พลังงานขาออก (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนสัมผัสน้ำออกโดยเรย์บ์ซิม ($T=80^{\circ}\text{C}$)
= $9.620 \times 10^3 \times 1.137 \times (80-30)$
= 5.4689×10^5
 2. พลังงานความร้อนที่ใช้เผาไอน้ำจากแร่ = $196.328 [2,255.176 + 4.184 (100-30)]$
= 5.0025×10^5
 3. พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากอุปกรณ์ = 1.2164×10^4 (ดูภาคผนวก ข)
 4. พลังงานความร้อนที่นำออกโดยก๊าซร้อนทิ้ง = $4206.424 \times 1.046 \times (80-30)$
= 2.1999×10^5
- พลังงานความร้อนขาออกรวม = $1.2792 \times 10^6 \text{ kJ/h}$

4.3.2.3 สมดุลเอ็กเซอร์ยีรอบอุปกรณ์เตาอบแบบหมุน (Rotary dryer)

$$Ex_F = (LHV)[(1.0038+0.1365(h/c)+0.0308(o/c)+0.0104(s/c))]$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ จะได้

$$Ex_F = 41,450[1.0038+0.1365(0.1175/0.8648)+0.0308(o/0.8648)+0.0104(0.0157/0.8648)]$$

$$Ex_F = 42,384 \text{ kJ/kg}$$

เอ็กเซอร์ยีขาเข้า (kJ/h)

1. เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง = $30.7829 \times 42,384$
= 1.3047×10^6
 2. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของเชื้อเพลิง = $30.7829 \times 2.1227 \times [(80-30) - 3031 \ln(353/303)]$
= 243.1551
 3. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของอากาศที่ใช้เผาไหม้และอบไล่ความชื้น = 0
 4. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของแรยับซึม = 0
- เอ็กเซอร์ยีรวมจากพลังงานความร้อน = 1.3049×10^6 kJ/h
5. เอ็กเซอร์ยีของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ = 1.3320×10^6 kJ/h

เอ็กเซอร์ยีขาออก (kJ/h)

1. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของแรยับซึม = $9.620 \times 10^3 \times 1.137 \times [(80-30) - 3031 \ln(353/303)]$
= 4.0702×10^4
2. เอ็กเซอร์ยีที่ต้องใช้ในการเผาไล่ความชื้นจากแร่
= $196.328 \times \{2,255.176[1-(303/373)] + 4.184[70 - 3031 \ln(373/303)]\}$
= 8.8859×10^4

3. เอ็นโทรปีที่สูงหนี้ออกจากอุปกรณ์ $= 1.2164 \times 10^4 [1 - (303/313)]$
 $= 388.626$
4. เอ็นโทรปีในก๊าซร้อนทั้ง $= 4,206.424 \times 1.046 [(50) - 303 \ln(353/303)]$
 $= 1.6373 \times 10^4$
5. เอ็นโทรปีที่ถูกทำลายเนื่องจาก Irreversibility $= 1.1586 \times 10^5$
- เอ็นโทรปีรวม $= 1.3049 \times 10^5$ kJ/h

4.3.3 การวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็นโทรปีรอบ Imp. mill

ข้อมูลในการวิเคราะห์

1. อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ $= 100^\circ\text{C}$
 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (น้ำมันเตาเกรด C) $= 148$ t/h
 หรือ $139,2387$ kg/h
 ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันเตา $= 41,450$ kJ/kg
2. อุณหภูมิของแร่ที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ $= 58^\circ\text{C}$
 อุณหภูมิของแร่ที่ออกจาก Imp. mill $= 100^\circ\text{C}$
3. อุปกรณ์มีเส้นรอบวงภายนอก $= 660$ cm
 และความยาว $= 380$ cm
 ผนังอุปกรณ์ประกอบด้วย
 อิฐทนไฟหนา 0.25 m ($k = 5,296$ kJ/m.h.K)
 เหล็กหนา 0.013 m ($k = 288.0$ kJ/m.h.K)
 ใยหิน (Rockwool) หนา 0.051 m ($k = 0.122$ kJ/m.h.K)
 อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยของอุปกรณ์ 51°C และพื้นที่ผิวภายนอก 78.79 m²
4. สภาวะมาตรฐานในการคำนวณ $T_o = 30^\circ\text{C}$, $P_o = 1$ atm

5. พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์สำหรับตีแร่ $W_4 = 160 \text{ kW}$
พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน $W_5 = 11 \text{ kW}$
6. เงื่อนไขของการเผาไหม้เชื้อเพลิงใช้เช่นเดียวกับกรณีของเตาอบแบบหมุน
7. อุณหภูมิของลมร้อนทั้งคือ 100°C และใช้ $C_p = 1.0093 \text{ kJ/kg.K}$

4.3.3.1 สมดุลมวลรอบขอบเขต Imp. mill

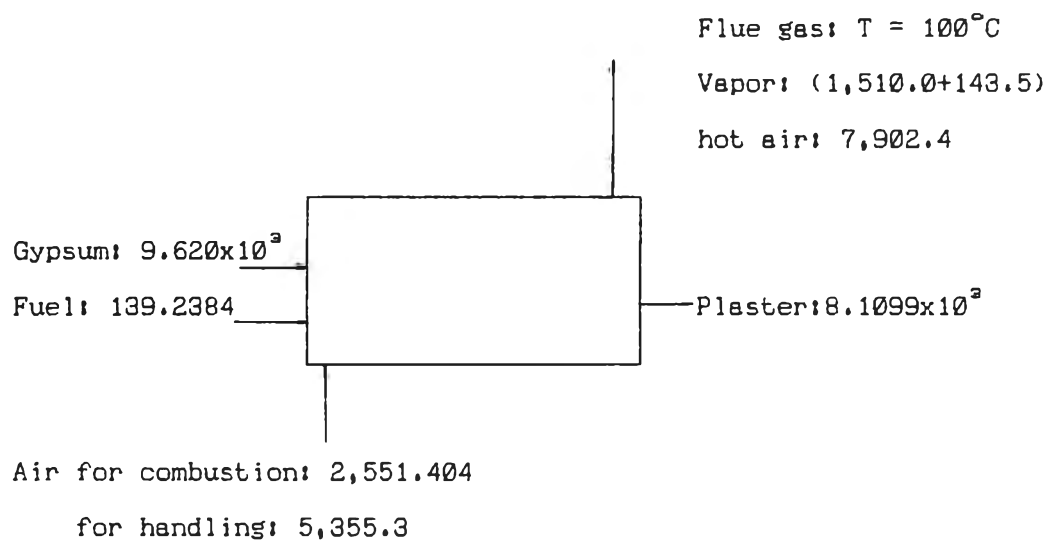


Fig 4.12 สมดุลมวลรอบขอบเขต Imp. mill (kg/h)

4.3.3.2 สมดุลพลังงานรอบขอบเขต Imp. mill

พลังงานขาเข้า (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนที่เกิดจากการสันดาปเชื้อเพลิง = $139.2384 \times 41,450$
= 5.7714×10^6
2. พลังงานความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง = $139.2384 \times 2.1227 \times 70$
= 2.0689×10^4

$$3. \text{ พลังงานความร้อนสัมผัสของแรยิบซิม} = 9.620 \times 10^3 \times 1.137 \times (58-30) \\ = 3.0626 \times 10^5$$

$$4. \text{ พลังงานความร้อนของอากาศที่ใช้สันดาปและลำเลียงแร่} = 0$$

$$\text{พลังงานความร้อนขาเข้ารวม} = 6.0983 \times 10^5 \quad \text{kJ/h}$$

$$5. \text{ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุปกรณ์} = 6.1560 \times 10^5 \quad \text{kJ/h}$$

พลังงานขาออก (kJ/h)

$$1. \text{ พลังงานความร้อนสัมผัสของพลาสติกเตอร์} = 8.1099 \times 10^3 \times 1.137 \times 70 \\ = 6.4547 \times 10^5$$

$$2. \text{ พลังงานความร้อนในก๊าซทิ้งร้อน} = 7,902.4 \times 1.0093 \times 70 \\ = 5.5831 \times 10^5$$

$$3. \text{ พลังงานความร้อนของไอน้ำในก๊าซร้อน} = 1,653.5 \times 1.8790 \times 70 \\ = 2.1748 \times 10^5$$

$$4. \text{ พลังงานความร้อนที่ใช้แคลไซน์แร่ที่ } 25^\circ\text{C} \text{ (ดูภาคผนวก ง)} \\ = 8.330 \times 10^4 \times 9.620 \times 10^3 / 172 \\ = 4.6590 \times 10^5$$

$$5. \text{ พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากตัวอุปกรณ์} = 1.8040 \times 10^4$$

$$\text{พลังงานความร้อนขาออกรวม} = 6.0983 \times 10^5 \quad \text{kJ/h}$$

4.3.3.3 สมดุลเอ็กเซอร์ยีรอบ Imp. mill

เอ็กเซอร์ยีซาเข้า (kJ/h)

1. เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีจากเชื้อเพลิง = $42,384 \times 139.2384$
= 5.9015×10^6
2. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพจากเชื้อเพลิง = $139.2384 \times 2.1227 \times [(70) - 3031 \ln(373/303)]$
= 2.0757×10^6
3. เอ็กเซอร์ยีจากอากาศที่ใช้สันดาปและขนส่งแร่ = 0
4. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพจากแรียบซึม = $9.620 \times 10^3 \times 1.137 \times [(58 - 30) - 3031 \ln(331/303)]$
= 1.3335×10^4

$$\text{เอ็กเซอร์ยีซาออกรวมจากพลังงานความร้อน} = 5.9169 \times 10^6 \quad \text{kJ/h}$$

5. เอ็กเซอร์ยีจากไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ = 6.1560×10^6 kJ/h

เอ็กเซอร์ยีซาออก (kJ/h)

1. เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของพลาสติกเตอร์ = $8.1099 \times 10^3 \times 1.137 \times [70 - 3031 \ln(373/303)]$
= 6.4756×10^4
2. เอ็กเซอร์ยีในก๊าซทิ้งร้อน = $7,902.4 \times 1.0093 \times [70 - 3031 \ln(373/303)]$
= 5.6013×10^4
3. เอ็กเซอร์ยีที่ใช้ในการแคลไซน์แร่ที่ 25° (ดูภาคผนวก ง)
= $1.710 \times 10^4 \times 9.620 \times 10^3 / 172$
= 9.5641×10^5
4. เอ็กเซอร์ยีในไอน้ำร้อนทิ้ง = $1,653.5 \times 1.8790 \times [70 - 3031 \ln(373/303)]$
= 2.1819×10^4

$$5. \text{ เอ็กเซอร์ยีที่สูญหายไปจากอุปกรณ์} = 1.8040 \times 10^4 [1 - (303/324)]$$

$$= 1.1693 \times 10^4$$

$$6. \text{ เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจาก Irreversibility} = 4.8167 \times 10^6$$

$$\text{เอ็กเซอร์ยีขาออกรวม} = 5.9169 \times 10^6 \quad \text{kJ/h}$$

4.3.4 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ (Boiler)

ข้อมูลในการวิเคราะห์

1. อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ 97°C
 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ขณะปฏิบัติงาน $588.0 \quad \text{kg/h}$
 ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง $41,450 \quad \text{kJ/kg}$
2. อุณหภูมิของก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำ 230°C
 ปริมาณอากาศในการสันดาปคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Boie และให้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 40% (A/F)
 $15.2642 \quad \text{m}^3_{\text{air}}/\text{kg fuel}$
3. ปริมาณน้ำจากถังคอนเดินเสท (13 bar) ที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ
 $10,054 \quad \text{kg/h}$
4. ปริมาณน้ำที่ปล่อยทิ้ง (bolw down) $54.0 \quad \text{kg/h}$
5. อุณหภูมิมาตรฐานในการคำนวณ $T_o = 30^{\circ}\text{C}$
 $P_o = 1 \text{ atm}$
6. พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์สูบน้ำจากถังคอนเดินเสท
 $(W_e) = 18.5 \text{ kW}$
 พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์เป่าอากาศเข้าสันดาป
 $(W_f) = 11.0 \text{ kW}$

7. ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซร้อน

$$= 0.33 \times 4.184 \quad \text{kJ/m}^3_{\text{N}} \text{K}$$

$$= 1.3807 \quad \text{kJ/m}^3_{\text{N}} \text{K}$$

4.3.4.1 สมดุลมวลรอบขอบเขตหม้อไอน้ำ (Boiler)

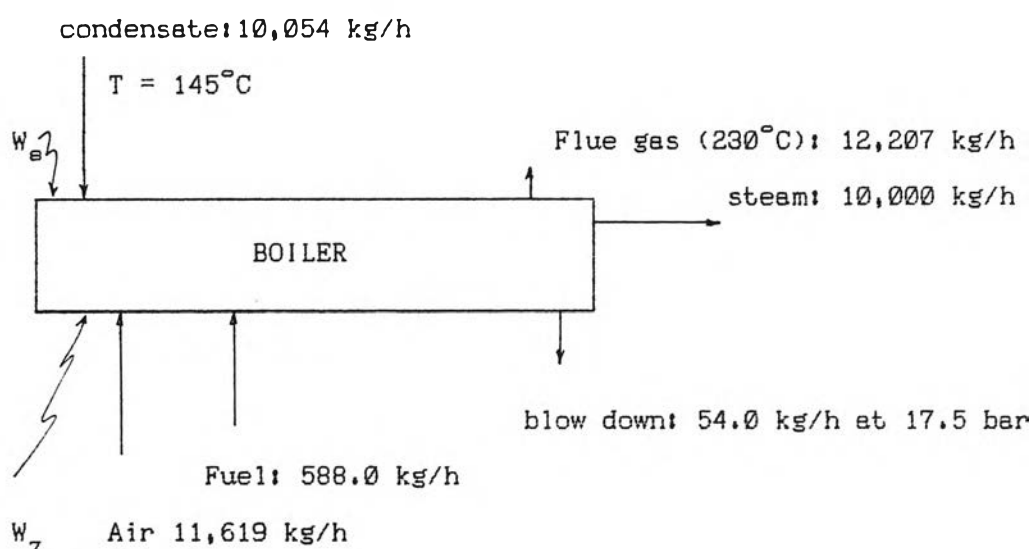


Fig 4.13 สมดุลมวลรอบขอบเขตหม้อไอน้ำ (Boiler)

มวลขาเข้า (kg/h)		มวลขาออก (kg/h)	
1. น้ำคอนเดนเสท	10,000	1. ไอน้ำอิ่มตัว (17.5bar)	= 10,000
2. น้ำเติม	54	2. น้ำปล่อยทิ้ง	= 54.0
3. เชื้อเพลิงในการสันดาป	588.0	3. ก๊าซทิ้งร้อน (230°C)	= 12,207
4. อากาศสำหรับเผาไหม้	11,619		
รวม	22,261 kg/h	รวม	22,261 kg/h

4.3.4.2 สมดุลเอนทัลปีรอบหม้อไอน้ำ

พลังงานขาเข้า (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนจากคอนเต็นเลอร์ = $10,054 \times 4.284 \times (145-30)$
= 4.953×10^6
 2. อากาศที่ใช้สันดาป ($T = 30^\circ\text{C}$) = 0
 3. พลังงานความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง = $588 \times 1.883 \times (97-30)$
= 7.4183×10^4
 4. พลังงานความร้อนที่เกิดจากการสันดาปเชื้อเพลิง = $41,450 \times 588$
= 2.4373×10^7
 5. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับอุปกรณ์ = $(11+18.5) \times 3,600$
= 1.0620×10^5
- พลังงานความร้อนขาเข้ารวม = 2.9400×10^7 kJ/h

พลังงานขาออก (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนในไอน้ำอิ่มตัว = $10,000 \times (2,798.00-125.52)$
= 2.6725×10^7
 2. พลังงานความร้อนในน้ำปล่อยทิ้ง = $54.0 \times (893.216-125.52)$
= 4.1455×10^4
 3. พลังงานความร้อนในก๊าซทิ้งร้อน = $9,428.8552 \times 0.33 \times 4.184 \times (230-30)$
= 2.6037×10^6
 4. ความร้อนสูญเสียจากตัวหม้อไอน้ำ = 2.9845×10^4
- พลังงานความร้อนขาออกรวม = 2.9400×10^7 kJ/h

4.3.4.3 สมดุลเอนทัลปีรอบขอบเขตหม้อไอน้ำ (Boiler)

เอนทัลปีขาเข้า (kJ/h)

1. เอนทัลปีของน้ำป้อน (คอนเด็นเสท) $10,054 \times 4.284 [115 - 303 \ln(418/303)]$
 $= 7.5419 \times 10^5$
 2. เอนทัลปีของอากาศสดาป $= 0$
 3. เอนทัลปีเชิงกายภาพของเชื้อเพลิง $588 \times 1.883 \times [67 - 303 \ln(370/303)]$
 $= 7163.1995$
 4. เอนทัลปีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง $588 \times 42,384 = 2.4922 \times 10^7$
 5. เอนทัลปีจากไฟฟ้า 1.0620×10^5
- เอนทัลปีขาเข้ารวม 2.5683×10^7 kJ/h

เอนทัลปีขาออก (kJ/h)

1. เอนทัลปีในไอน้ำอิ่มตัว (17.5 bar) $10^4 \times [(2,798.00 - 125.52) - 303$
 $(6.3658 - 0.4360)]$
 $= 8.7575 \times 10^5$
2. เอนทัลปีในน้ำฝนทิ้ง $54 \times [(893.216 - 125.52) - 303$
 $(2.4154 - 0.436)]$
 $= 9,068.6412$
3. เอนทัลปีในก๊าซร้อนทิ้ง $9,428.8552 \times 0.33 \times 4.184 [200 - 303$
 $\ln(503/303)]$
 $= 6.0435 \times 10^5$
4. เอนทัลปีสูญหายไปจากอุปกรณ์ $2.9845 \times 10^4 [1 - (303/318)]$
 $= 1,407.7830$

5. เอ็นโทรปีที่ถูกทำลายเนื่องจาก Irreversibility 1.6311×10^7

เอ็นโทรปีขาออกรวม 2.5683×10^7 kJ/h

4.3.5 การวิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็นโทรปีของเตาอบบอร์ด (Board Dryer)

ข้อมูลในการวิเคราะห์

1. ไอน้ำอิ่มตัวที่ 17.5 bar gage, $T = 209^\circ\text{C}$

มี $h_g = 2,798.00$ kJ/kg, $S_g = 6.3658$ kJ/kg.K

$h_f = 893.216$ kJ/kg, $S_f = 2.4154$ kJ/kg.K

ไอน้ำอิ่มตัวที่ 13.0 bar gage, $T = 195^\circ\text{C}$

มี $h_g = 2,790.3528$ kJ/kg, $S_g = 6.4657$ kJ/kg.K

$h_f = 832.4575$ kJ/kg, $S_f = 2.2887$ kJ/kg.

โดยน้ำที่สภาวะ dead state

มี $h_o = 125.52$ kJ/kg, $S_o = 0.436$ kJ/kg.K

ที่ $T_o = 303$ K และ $p_o = 1$ atm

2. ขนาดของอุปกรณ์

พื้นที่ด้านบนของอุปกรณ์ = 236.89 m², อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวผนัง = 55°C

พื้นที่ด้านล่างของอุปกรณ์ = 236.89 m², อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวผนัง = 45°C

พื้นที่ด้านข้างของอุปกรณ์ = 390.144 m², อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวผนัง = 45°C

พื้นที่ช่องต่อระหว่างห้องของอุปกรณ์ = 12.3871 m²,

อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิว = 150°C

ผนังอุปกรณ์หุ้มด้วยใยหินหนา 2 นิ้ว รวม 4 ชั้น

3. อุณหภูมิของบอร์ดเปียกก่อนเข้าอุปกรณ์ 50°C

สมมุติฐาน:

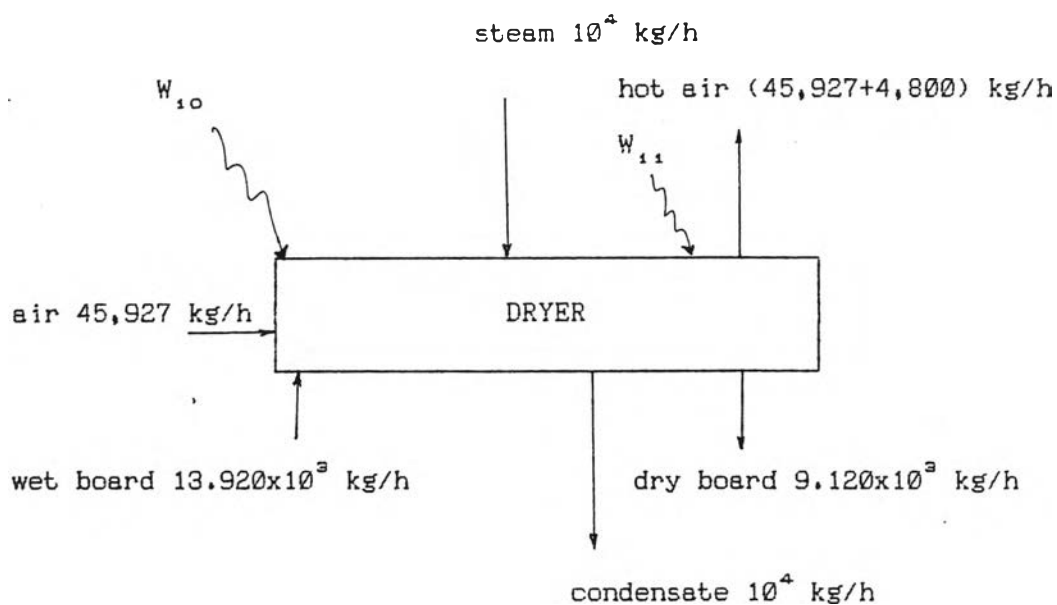
1. โลหะที่ใช้ทำผนังมีความต้านทานการนำความร้อนน้อยมาก

เมื่อเทียบกับของฉนวนหุ้ม

2. ไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในชั้นโลหะของผนัง

3. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของก๊าซฟิล์ม ที่ผนังในของอุปกรณ์มีค่าน้อยมาก
4. อุณหภูมิที่ผนังชั้นใน = 150°C

4.3.5.1 สมดุลมวลรอบเตาอบแผ่นบอร์ด (Board Dryer)



รูป 4.14 สมดุลมวลรอบขอบเขตเตาอบ (Dryer)

มวลขาเข้า (kg/h)		มวลขาออก (kg/h)	
1. บอร์ดเปียก	13.920×10^3	1. บอร์ดแห้ง	9.120×10^3
2. อากาศเข้าอุปกรณ์	45,927	2. คอนเดนเสท	10,000
3. ไอน้ำอิ่มตัว	10,000	3. อากาศร้อนขึ้น	50,727
รวมมวลขาเข้า	6.9847×10^4	รวมมวลขาออก	6.9847×10^4

4.3.5.2 สมดุลพลังงานเอ็นรัลปีรอบเตาอบบอร์ด

พลังงานขาเข้า (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนน้ำเข้าโดย ไอน้ำอิ่มตัว (17.5 bar)	$10^4 \times (2,798.00 - 125.52)$ $= 2.6725 \times 10^7$	
2. พลังงานความร้อนสัมผัสของ บอร์ดเปียก ($C_p = 1.137 \text{ kJ/kg.K}$)	$13,920 \times 1.137 \times (50 - 30)$ $= 3.1654 \times 10^5$	
3. พลังงานความร้อนสัมผัสของอากาศ	0	
4. พลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์	4.3200×10^5	
รวมพลังงานความร้อนขาเข้า	2.7042×10^7	kJ/h

พลังงานขาออก (kJ/h)

1. พลังงานความร้อนสัมผัสของบอร์ด	$9,120 \times 1.137 \times (80 - 30)$ $= 5.1847 \times 10^5$	
2. พลังงานความร้อนในคอนเต็นเสก	$10,000 \times (893.216 - 125.52)$ $= 7.6770 \times 10^5$	
3. พลังงานความร้อนสัมผัสน้ำออกโดย อากาศร้อนขึ้น ($T = 139^\circ\text{C}$)	$45,927 \times 4.184 [(0.45 \times 0.1263) + 0.24]$ $(139 - 30) = 6.2173 \times 10^5$	
4. * พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากอุปกรณ์	$= 3.9823 \times 10^5$	
5. พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ จากบอร์ด	$4,800 [2,255.176 + 4.184(70)]$ $= 1.2231 \times 10^7$	
รวมพลังงานความร้อนขาออก	$= 2.7042 \times 10^7$	kJ/h

* * ดูจากภาคผนวก ก

4.3.5.3 สมดุลเอนทัลปีรอบเตาอบเบอร์ด

เอนทัลปีขาเข้า (kJ/h)

1. เอนทัลปีของไอน้ำ
(17.5 bar gage) $= 10^4 [(2,798.00-125.52)-303$
 $(6.3658-0.4360)]$
 $= 8.7575 \times 10^5$
2. เอนทัลปีของแผ่นเบอร์ดเปียก $= 13,920 \times 1.137 [(50-30)-303 \ln(323/303)]$
 $= 1.0008 \times 10^4$
3. เอนทัลปีของอากาศ $= 0$
- 4.* เอนทัลปีในพลังงานไฟฟ้า $= 4.3200 \times 10^5$

รวมเอนทัลปีขาเข้าจากพลังงานความร้อน $= 8.7675 \times 10^5$ kJ/h

เอนทัลปีขาออก (kJ/h)

1. เอนทัลปีของบอร์ดแห้ง $9,120 \times 1.137 [(80-30)-303 \ln(353/303)]$
 $= 3.8587 \times 10^4$
2. เอนทัลปีที่ใช้ระเหยน้ำ
จากบอร์ด $4,800 \{ 2,255.170 [1-(303/373)] + 4.184$
 $[70-303 \ln(373/303)] \}$
 $= 2.1725 \times 10^5$
3. เอนทัลปีในคอนเด็นเสท $10,000 [(893.216-125.52) - 303$
 $(2.4154-0.4360)]$
 $= 1.6794 \times 10^5$
4. เอนทัลปีในอากาศขึ้น $45,927 \times 4.184 [(0.45 \times 0.1263) + 0.24]$
 $[(139-30)-303 \ln(412/303)]$
 $= 9.0641 \times 10^5$

* ไม่คิดรวมในผลรวมของเอนทัลปี

$$5. \text{ เอ็นโทรปีที่ถูกสูญเสียจากอุปกรณ์} \quad 3.9823 \times 10^5 [1 - (303/318)] \\ = 1.8784 \times 10^4$$

$$6. \text{ เอ็นโทรปีที่ถูกทำลายเนื่องจาก Irreversibility} \\ = 3.9518 \times 10^5$$

$$\text{เอ็นโทรปีขาออกรวม} \quad = 8.7675 \times 10^5 \quad \text{kJ/h}$$

4.4 การประเมินหาพลังงานที่สูญเสียในเส้นทางเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ของกระบวนการผลิต

4.4.1 พลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ระบบย่อย 1 (Subprocess 1)

ในการคำนวณครั้งนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้:

1. ไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในชั้นโลหะของผนัง
2. โลหะที่ใช้ทำผนังมีความต้านทานการนำความร้อนน้อยมาก สำหรับรายละเอียดและตำแหน่งของอุปกรณ์ในช่วงของการคำนวณนี้ ดูได้จากรูป 4.15
3. สำหรับค่า h ในการคำนวณใช้ค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอุปกรณ์

อุปกรณ์ลำเลียงแร่ 1 (Bucket elevator 1)

มีพื้นที่ผิวรวมเป็น 25.2018 m^2

โดยมีความสูงประมาณ 10.77 m , กว้าง 0.89 m , หนา 0.28 m

อุณหภูมิที่ผนังด้านในของอุปกรณ์ถือว่าเท่ากับ $80^\circ\text{C} = 353 \text{ K}$

อุณหภูมิอากาศภายนอกเป็น $T_o = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$

อุณหภูมิด้านนอกของอุปกรณ์ไม่ได้ห้มีฉนวนเป็น 80°C

ผนังประกอบด้วยโลหะเหล็กหนา 0.0127 m ($k=288.00 \text{ kJ/m}\cdot\text{h}\cdot\text{K}$)

ให้ค่า $h = 1.35 (\Delta T/1)^{1/4}$ (ดูภาพผนวก ค)

ดังนั้น จะได้ค่า $h = 1.6054 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ หรือ $5.7795 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K}$

ในการคำนวณหาความร้อนที่สูญเสียจากอุปกรณ์สู่บรรยากาศภายนอก (T_o, P_o)
จากสูตรคำนวณ, $Q = UA \Delta T$

$$\text{โดย } U = \frac{1}{(x/k) + (1/h)}$$

$$\text{แทนค่า, } A = 25.2018 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = (353 - 303) = 50 \text{ K}$$

$$x = 0.0127 \text{ m}$$

$$k = 288.00 \text{ kJ/m.h.K}$$

$$h = 5.7795 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h.K}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_1 &= \frac{25.2018 \times (50)}{(0.0127/288.00) + (1/5.7795)} \\ &= 7.2808 \times 10^3 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } = 4.3436 \times 10^5 \text{ kJ/month}$$

ในทำนองเดียวกัน,

ความร้อนที่สูญเสียที่ถังเก็บแร่ที่ 1 (Gypsum Bin 1) ซึ่งมีพื้นที่ผิวเป็น
 $56.172 \text{ m}^2, \Delta T = 50 \text{ K}$

$$\text{มี } Q_2 = 1.6225 \times 10^4 \text{ kJ/h หรือ } 9.6797 \times 10^5 \text{ kJ/month}$$

ที่อุปกรณ์ลำเลียงแร่ที่ 2 (Bucket elevator 2)

มีพื้นที่ $35.2638 \text{ m}^2, \Delta T = 45 \text{ K}$

$$Q_3 = 9.1689 \times 10^3 \text{ kJ/h หรือ } 5.4701 \times 10^5 \text{ kJ/month}$$

ที่อุปกรณ์ถังเก็บแร่ที่ 2 (Imp. mill bin 2)

มีพื้นที่ของถังเก็บเป็น $44.73 \text{ m}^2, \Delta T = 40 \text{ K}$

$$Q_4 = 1.0338 \times 10^4 \text{ kJ/h หรือ } 6.1675 \times 10^5 \text{ kJ/month}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากระบวนการดังนี้

$$\text{พลังงานความร้อนสูญหายที่อุปกรณ์ลำเลียงแร่ที่ 1} = 7.2808 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

$$\text{พลังงานความร้อนสูญหายที่อุปกรณ์ถังเก็บแร่ที่ 1} = 1.6225 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\text{พลังงานความร้อนสูญหายที่อุปกรณ์ลำเลียงแร่ที่ 2} = 9.1689 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

$$\text{พลังงานความร้อนสูญหายที่อุปกรณ์ถังเก็บแร่ที่ 2} = 1.0338 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\text{รวมพลังงานความร้อนที่สูญหายในระบบย่อย 1} = 4.3013 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\text{หรือ} = 2.5661 \times 10^7 \text{ kJ/month}$$

4.4.2 พลังงานที่สูญเสียในระบบย่อยที่ 2 (Subprocess 2)

ที่ถังเก็บคอนเต็นเสทมีการปล่อยน้ำทิ้งที่ 13 bar ในปริมาณ 500 kg/h เพื่อรักษาความดันภายในถังเก็บ

คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้ง

$$\text{ได้ดังนี้ } h_g = 2,790.3528 \text{ kJ/kg}$$

$$h_o = 125.52 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_g = W_g (h_g - h_o) \quad (4.5)$$

$$\text{แทนค่า: } W_g = 500 \text{ kg/h}$$

$$h_g = 2,790.3528 \text{ kJ/kg}$$

$$h_o = 125.52 \text{ kJ/kg}$$

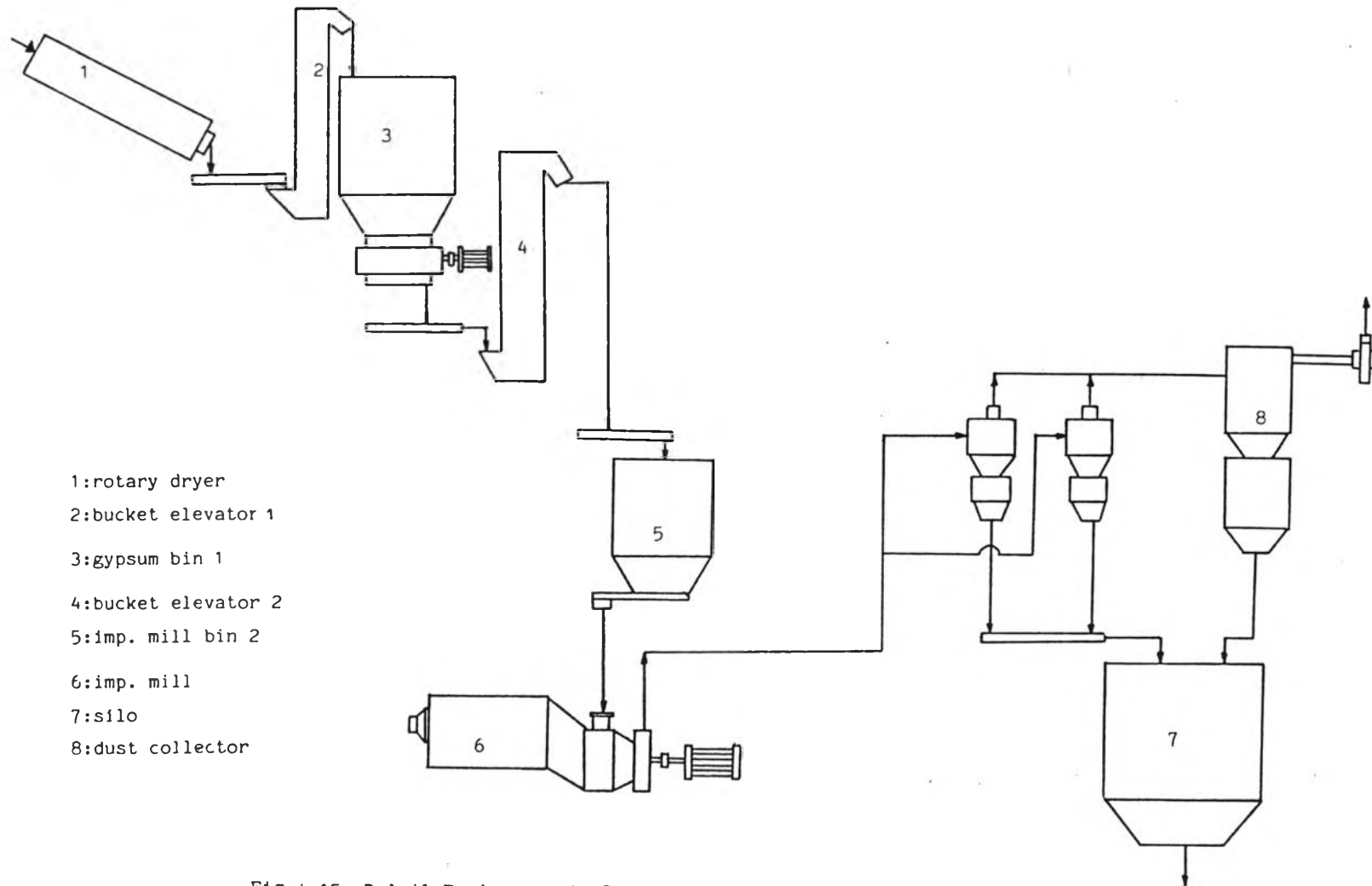
$$\text{ดังนั้น } Q_g = 500(2,790.3528 - 125.52)$$

$$= 1.3324 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$\text{เวลาที่ทำการปล่อยทิ้งเป็น } 672 \text{ h/month}$$

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียโดยน้ำที่ปล่อยทิ้งที่ถังเก็บคอนเต็นเสท

$$= 8.9538 \times 10^8 \text{ kJ/month}$$



- 1:rotary dryer
- 2:bucket elevator 1
- 3:gypsum bin 1
- 4:bucket elevator 2
- 5:imp. mill bin 2
- 6:imp. mill
- 7:silo
- 8:dust collector

Fig.4.15 Detail Equipments in Subprocess 1