

การคำนวณเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเตาหลอมแก้ว

ดร. กนิษฐ์ ตะปะสา

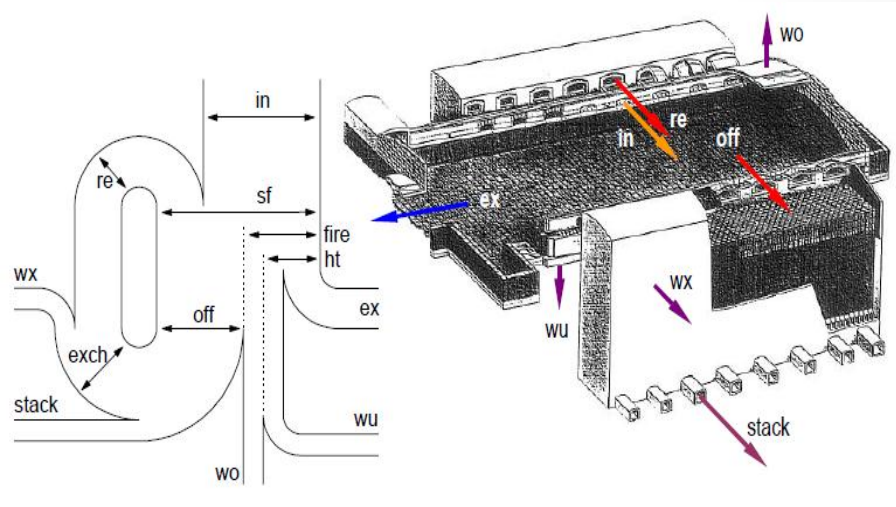
ศูนย์เชี่ยวชาญทางด้านแก้ว

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สัมมนางาน BOI FAIR 2011 ระหว่าง วันที่ 7 มกราคม 2555

วัตถุประสงค์

เพื่อคำนวณพลังงานและประสิทธิภาพของเตาหลอมแก้วในแต่ละกำลังการผลิตของโรงงานผลิตภาชนะแก้ว (furnace performance) โดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์และการสมดุลพลังงาน (heat balance)



Glass industry

Type of Product	Number of factories			Total
	Large	Medium **	Small *	
1. Float Glass	4	4		8
2. Container Glass	6	12		18
3. Domestic	3	35		38
4. Fiber Glass	1	4	4	9
5. Other	6	30		36
Total	20	85	4	109

Remarks :

Small Enterprise Numbers of employees < 50, Investment < 50 million THB

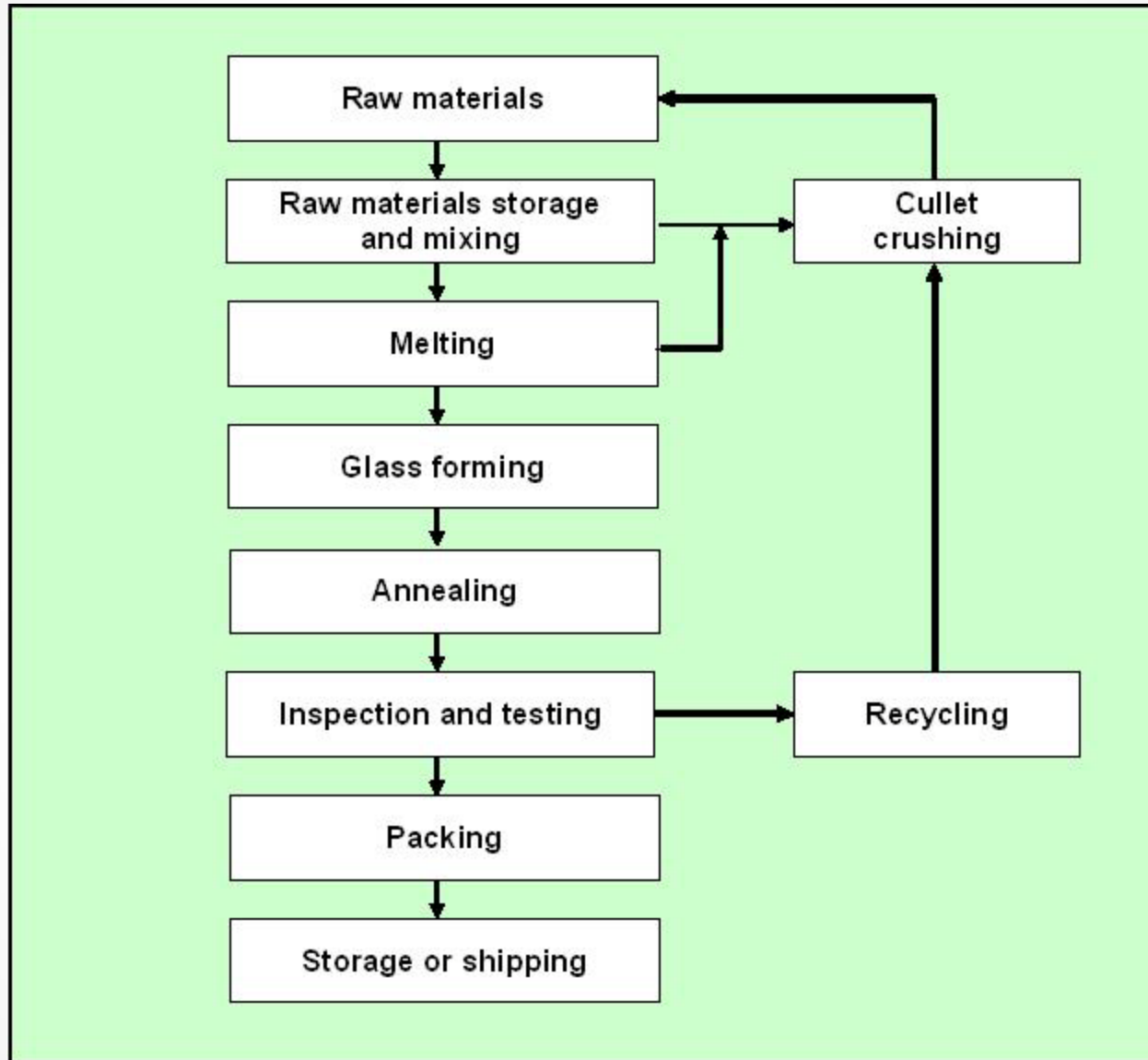
Medium Enterprise 50< Numbers of employees < 500, 50< Investment < 200 million THB

Large Enterprise Numbers of employees > 500, Investment > 200 million THB

Source: Energy Efficiency in SMEs กรมโรงงานอุตสาหกรรม

Bright Management Consulting Co., Ltd. Desk Study on Glass Industry, final version 12/2009

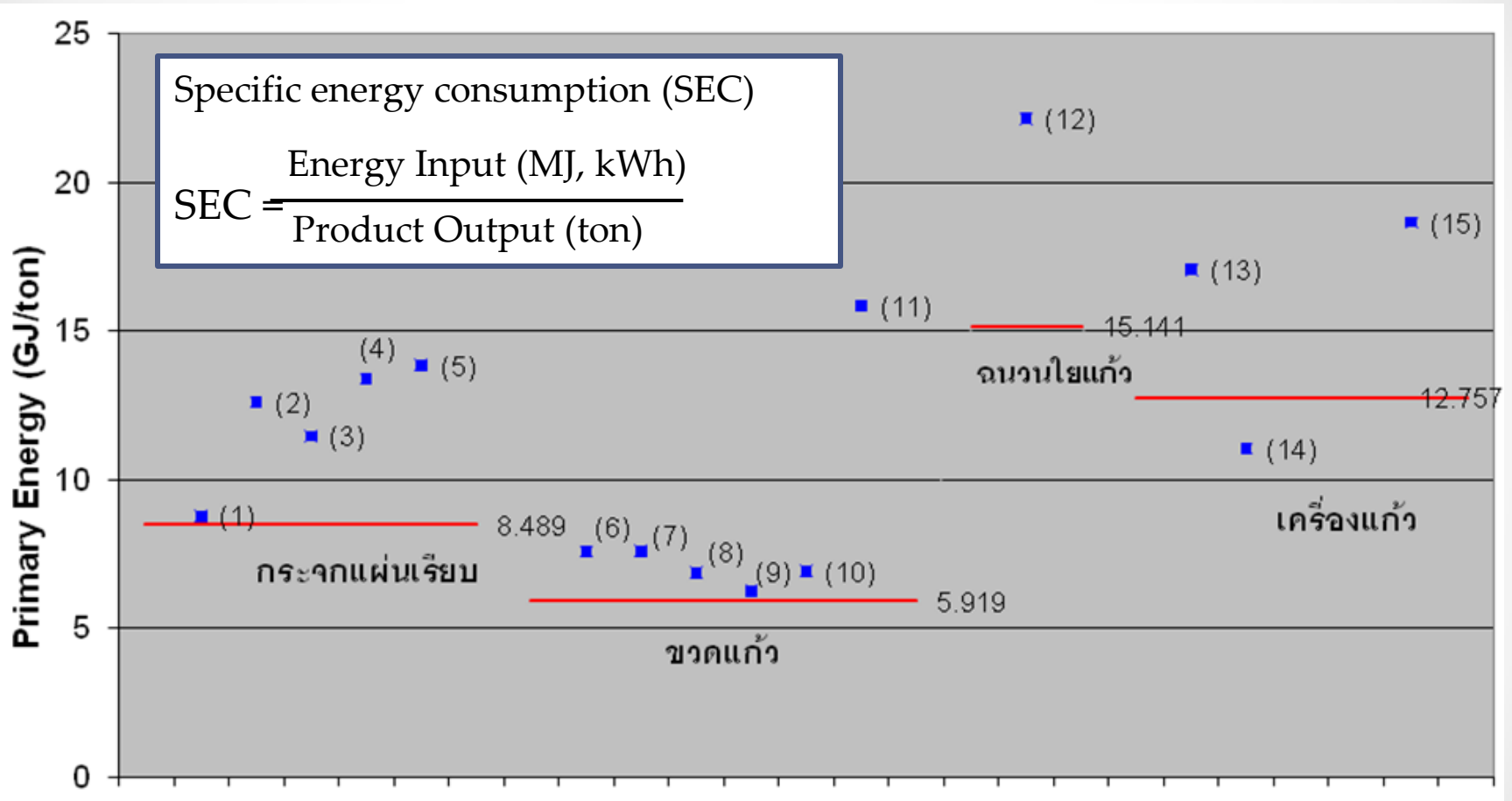
Glass manufacturing



Source: Draft Guideline: Glass Manufacturing Industry - Best Available Techniques จัดทำโดย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553

โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงาน

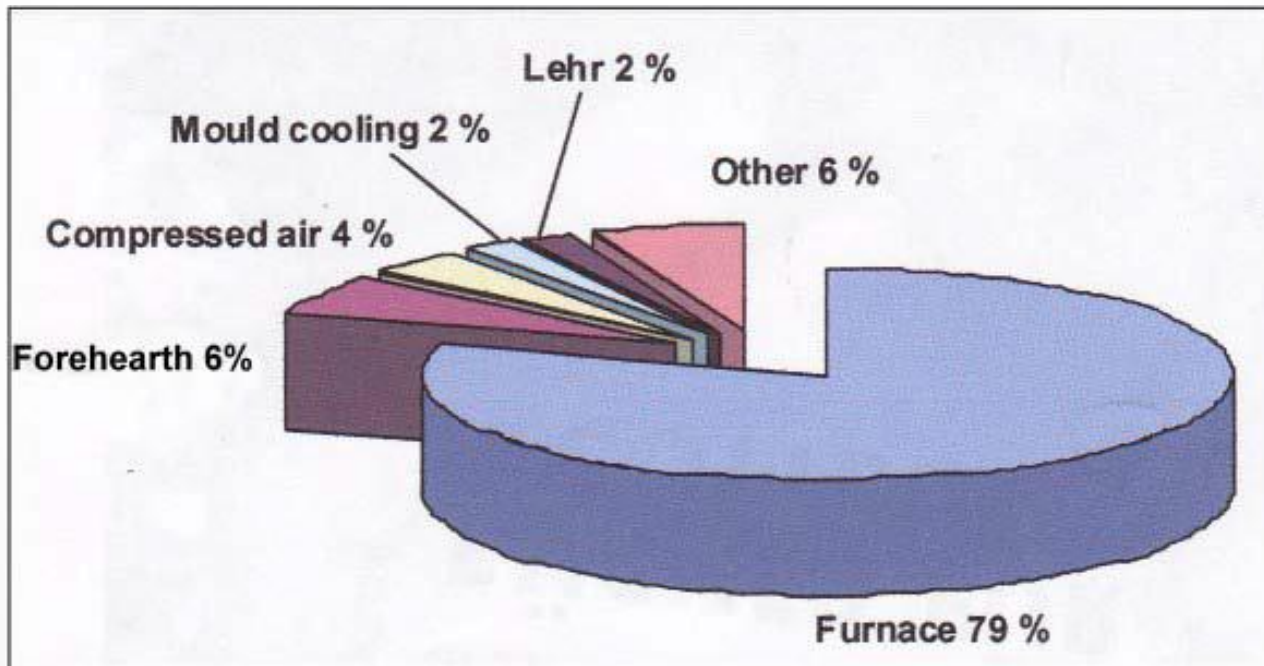
ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)



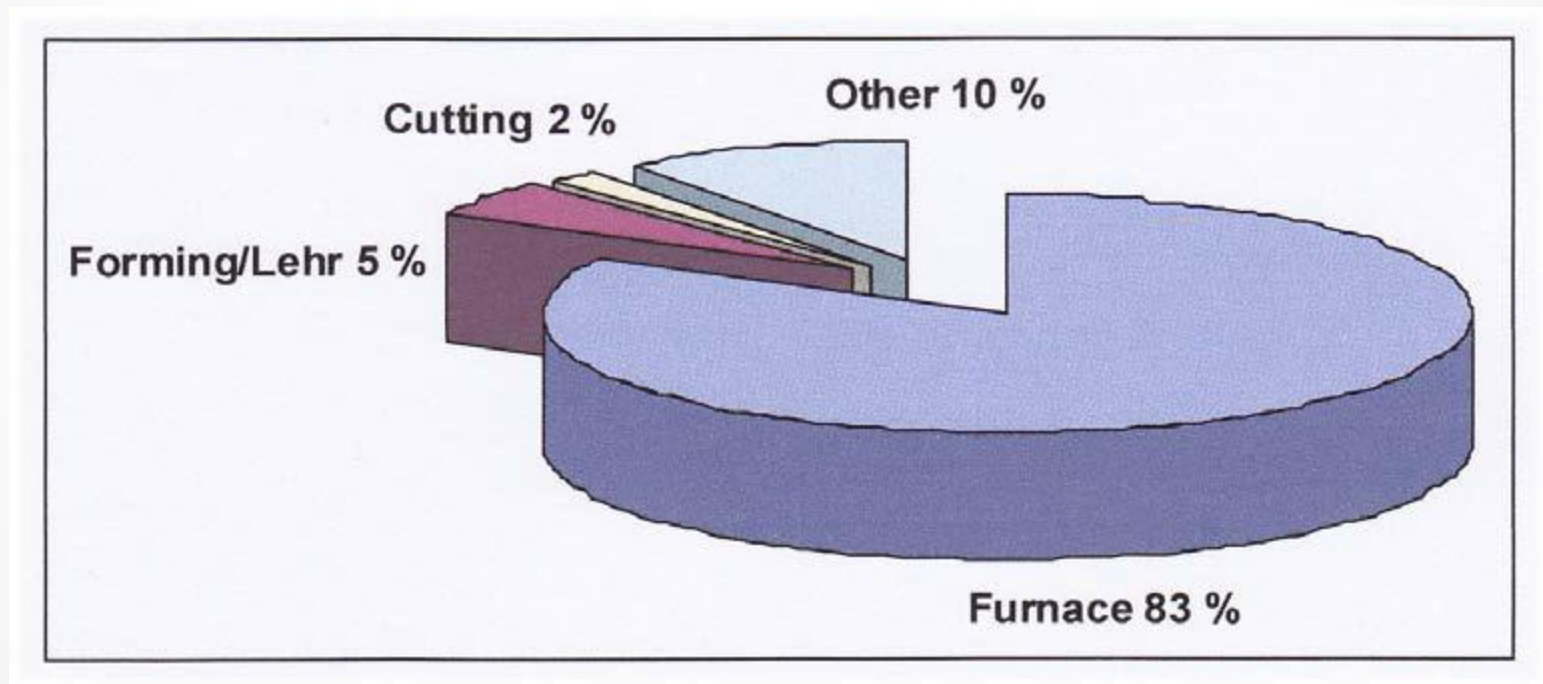
ศึกษาโดย ญัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด และคณะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Energy consumption

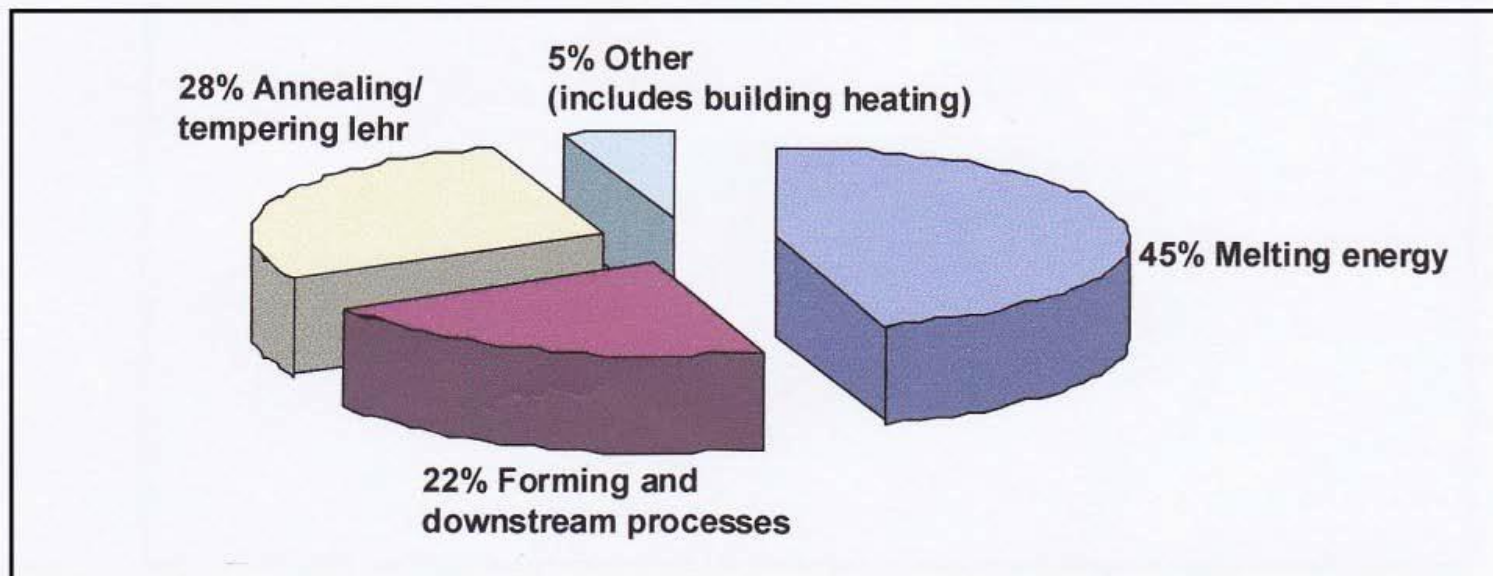
- Container glass

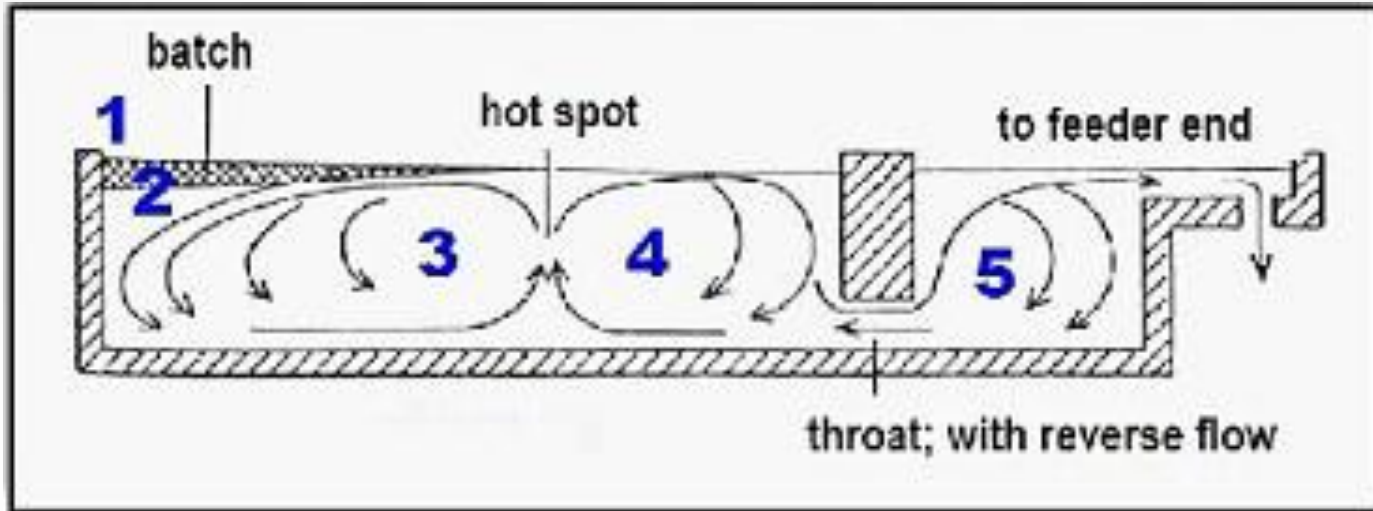


- Float glass



- Domestic glass





1. batch charging
2. batch melting
3. quartz dissolution
4. fining
5. refining

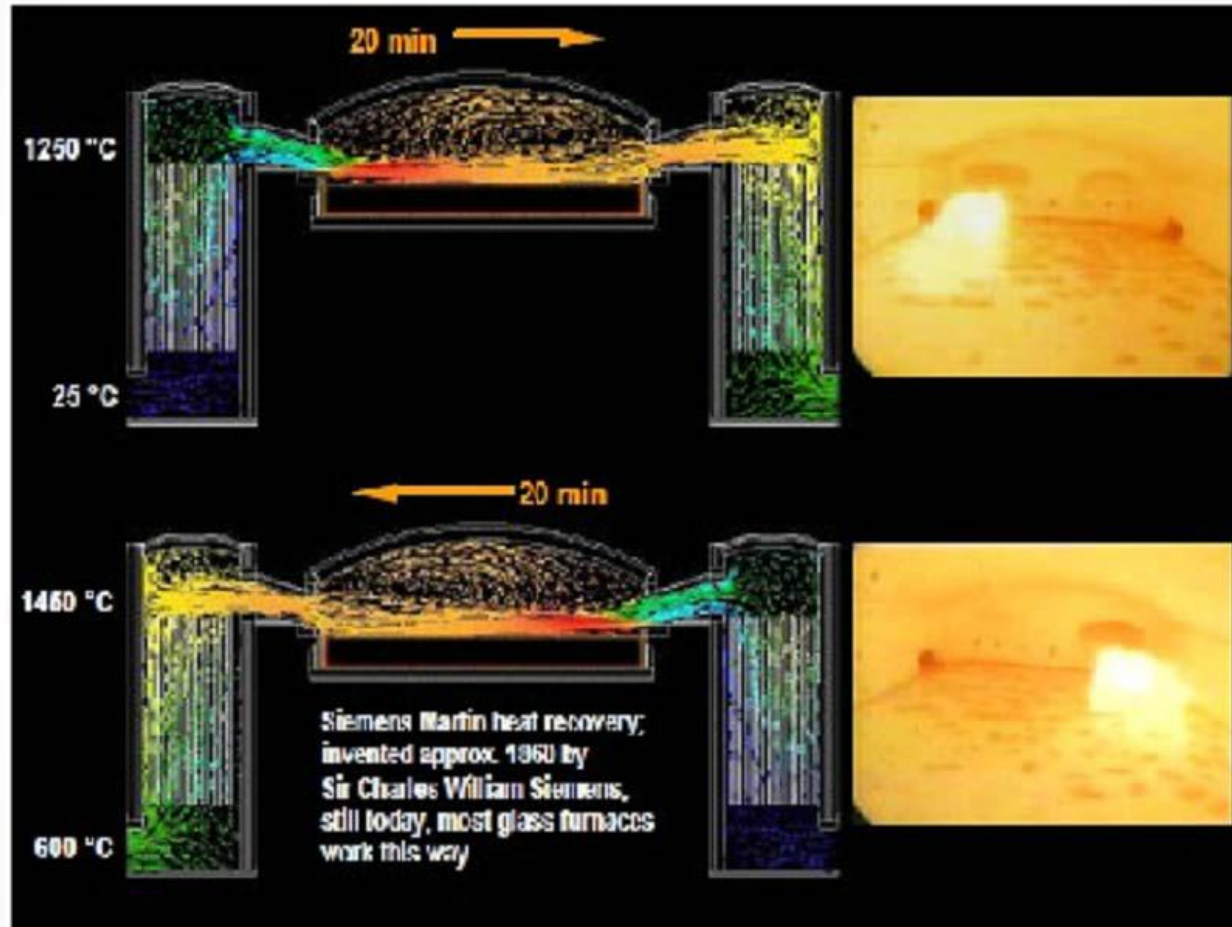
Source: Reinhard Conradt, RWTH Aachen, 2008

Glass Furnaces

- Regenerative furnaces
- Recuperative furnaces
- oxygen-fuel
- Electric melting
- Pot furnace
- Day tank
- Special furnace

Regenerative furnaces

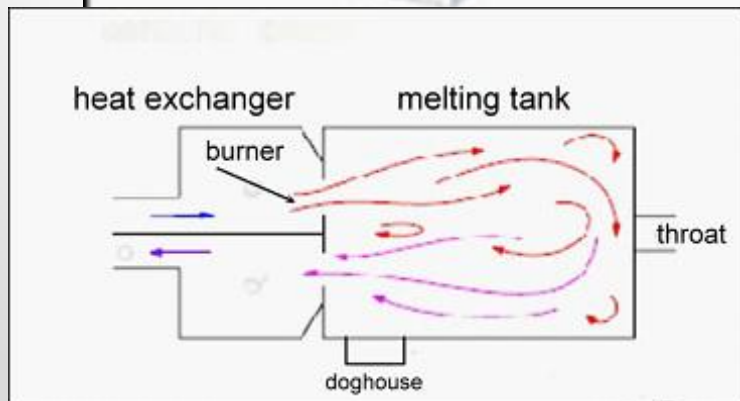
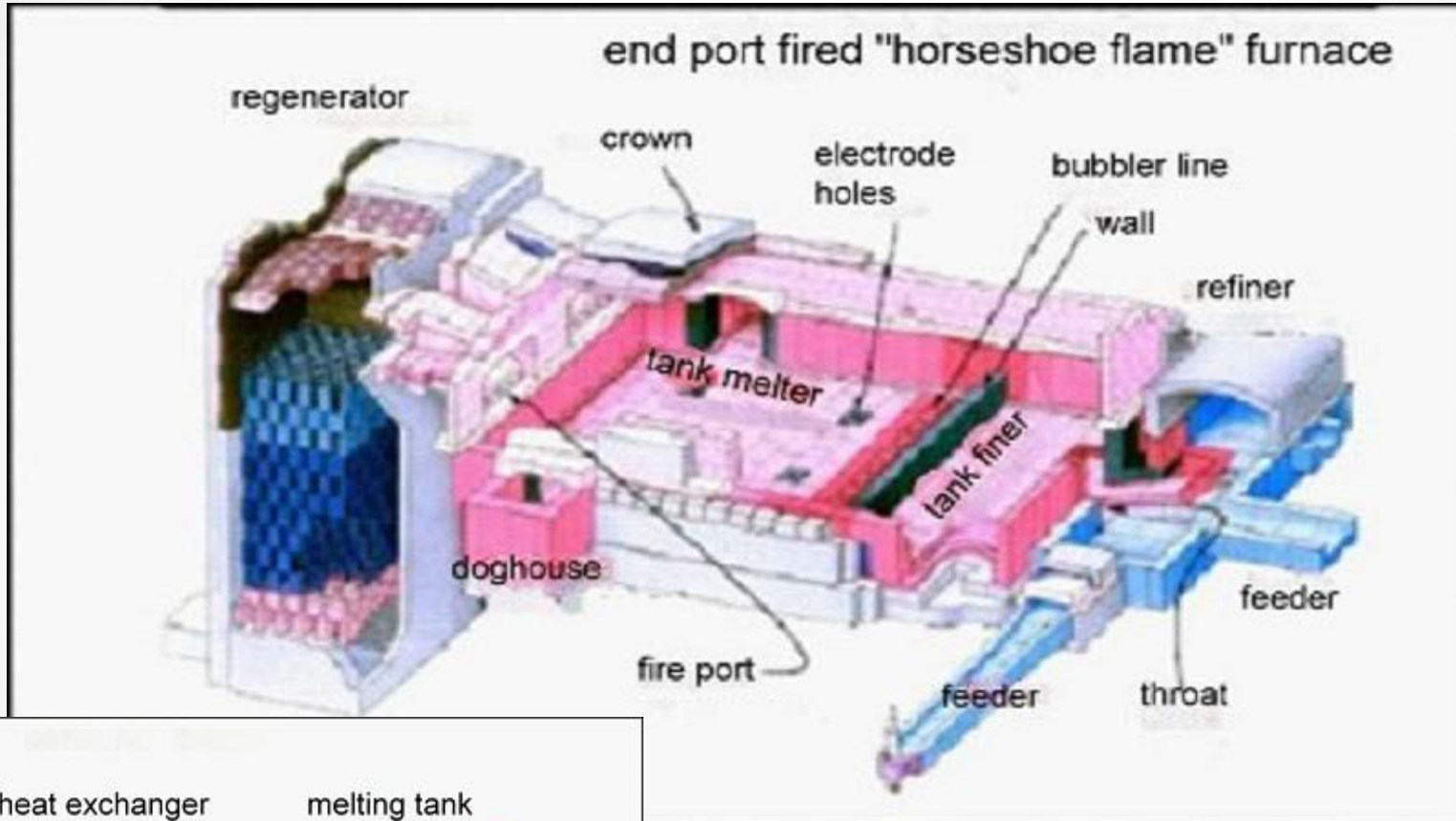
Regenerative heat recovery



Source: Reinhard Conradt, RWTH Aachen, 2008

Regenerative furnaces

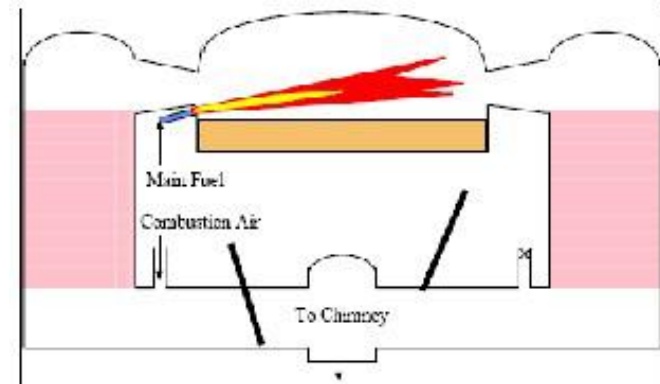
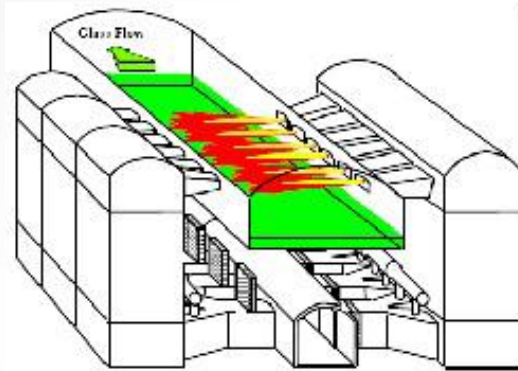
A end port fired regenerative furnace



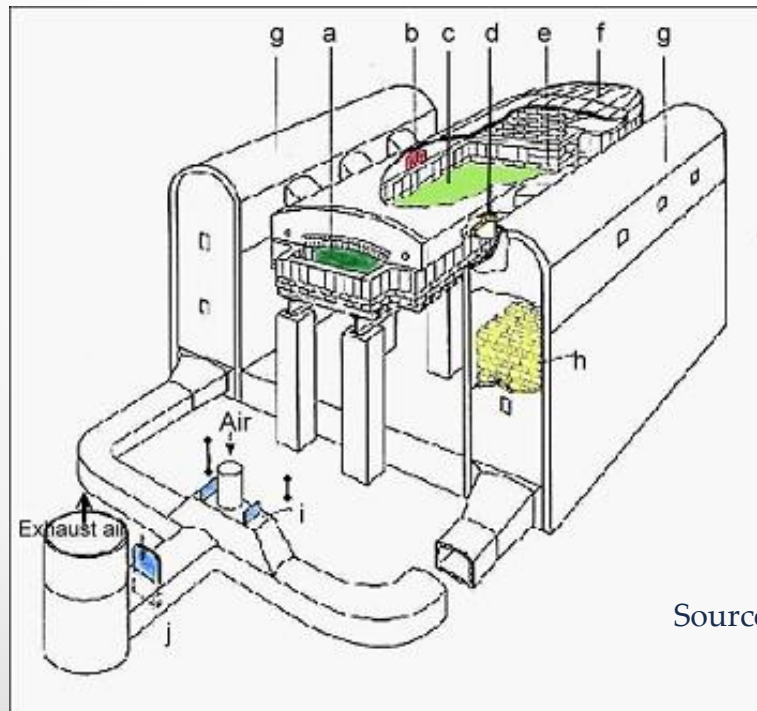
Source: Reinhard Conradt, RWTH Aachen, 2008

Regenerative furnaces

A cross-fired regenerative furnace



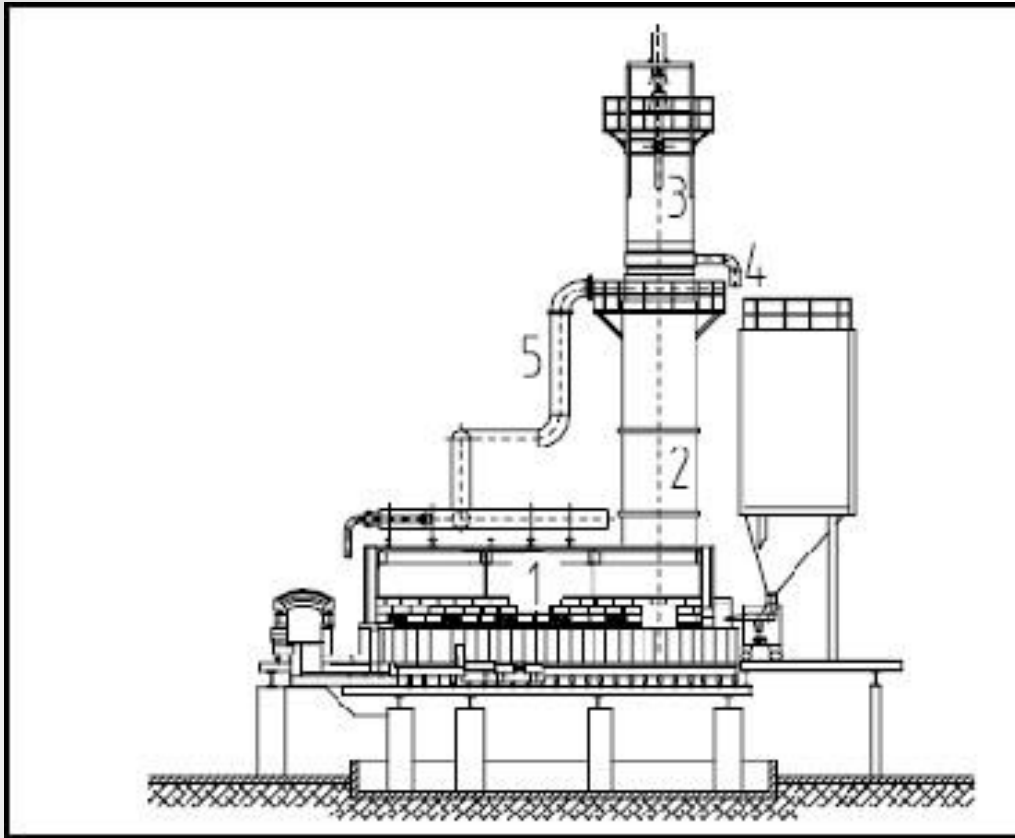
Source: BREF Glass Manufacturing Industry, 2001



- a Batch changer dog house
- b Burner
- c Melting end
- d Burner block
- e Throat
- f Working end
- g Regenerator
- h Checkers
- i Reversal equipment
- j Stack slide valve

Source: Guideline VDI 2578 Emission control Glassworks, 1999

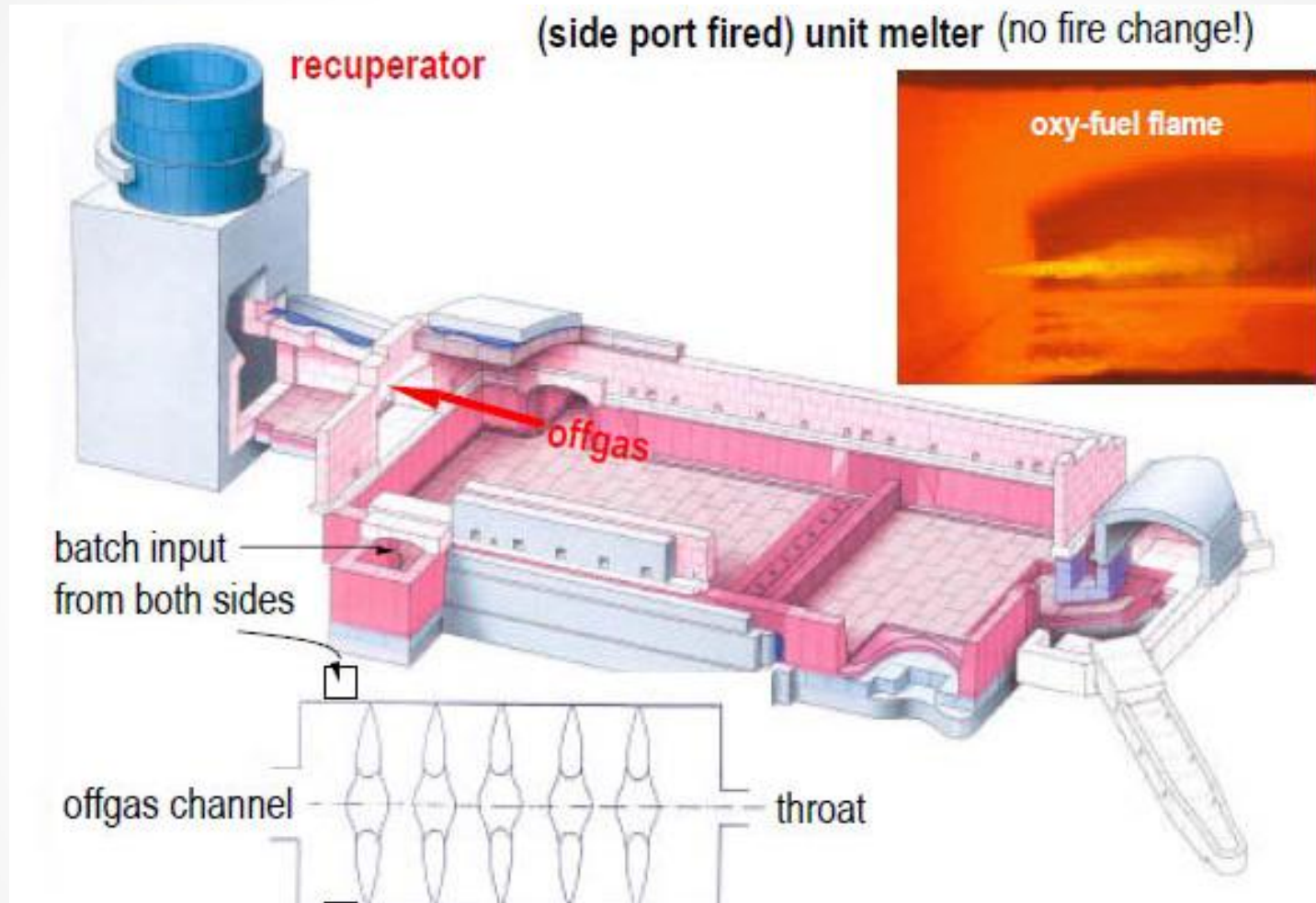
- **Recuperative furnaces**



- 1 Melting furnaces
- 2 Tube cage recuperator
- 3 Double-shell recuperator
- 4 Combustion air, cold
- 5 Combustion air, hot

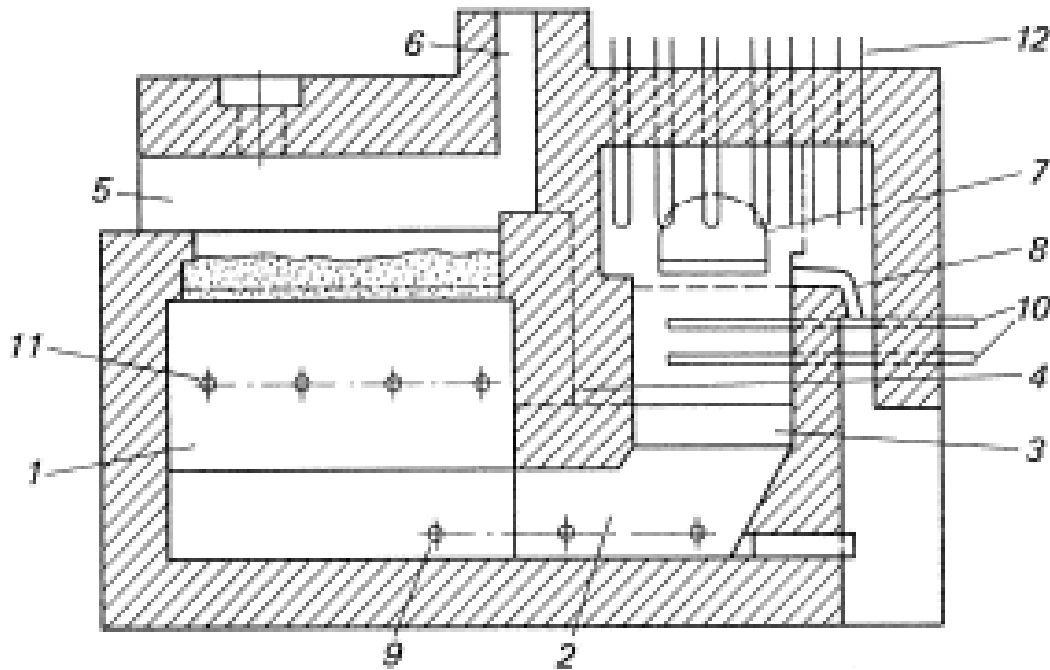
Source: Guideline VDI 2578 Emission control Glassworks, 1999

Oxy-fuel-fired furnace



Source: Reinhard Conradt, RWTH Aachen, 2008

Electric melting

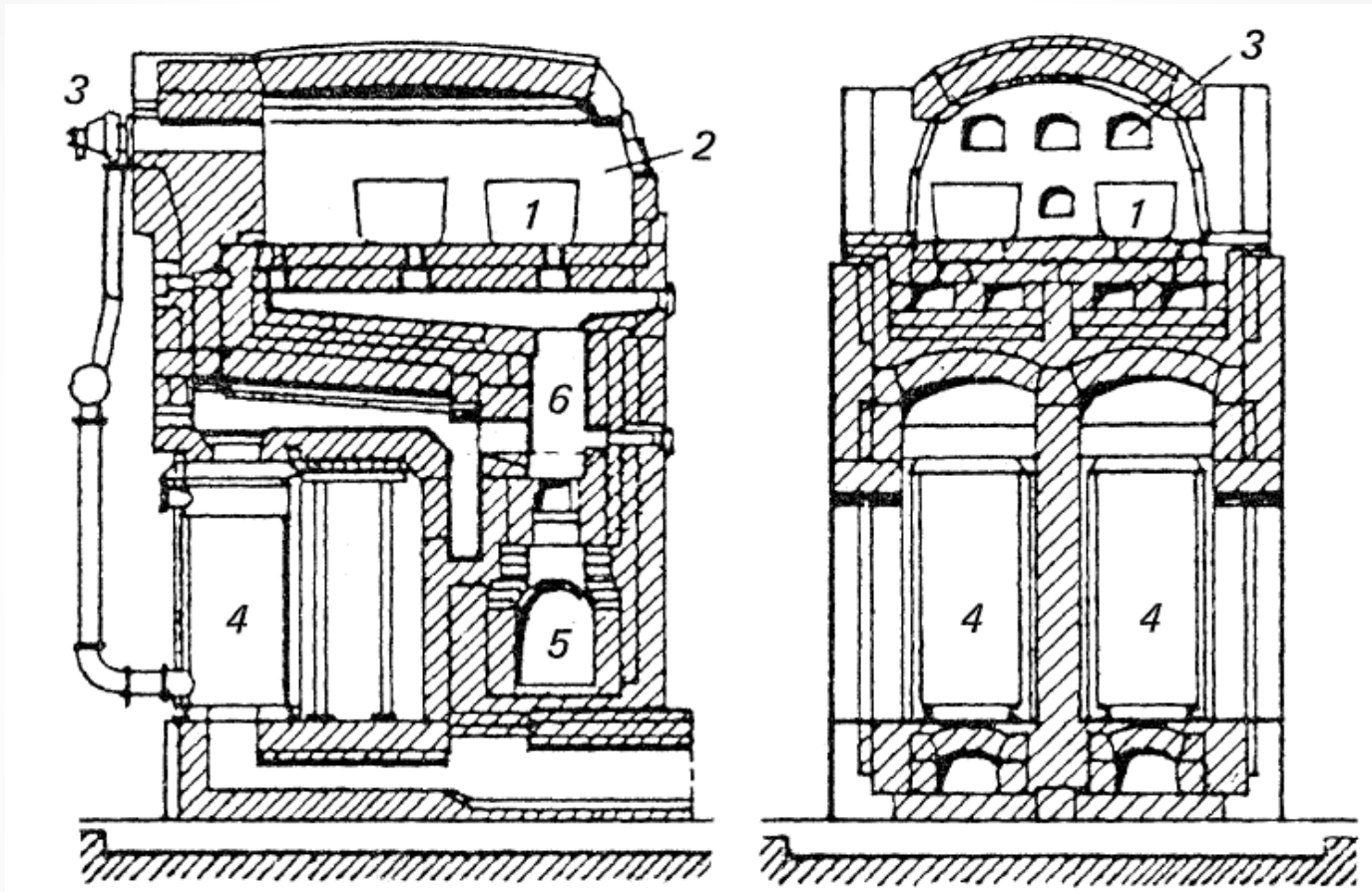


1. Melting section
- 2 Pass-through
- 3 Operational part
- 4 Partitionen wallen
- 5 Feed-in opening
- 6 Outlets
- 7 Operational opening
- 8 Outflow chute
- 9 Auxiliary heating electrodes on the ground
- 10 Auxiliary heating electrodes in the operational part
- 11 electrodes in the melting part
- 12 Coil from Kanthal-Super

Source: Guideline VDI 2578 Emission control Glassworks, 1999

Pot furnaces

Pot furnace with recuperative heat recovery



- | | |
|----------------|-------------------------|
| 1 Pot | 4 Steel recuperator |
| 2 Working hole | 5 Glass pocket for slag |
| 3 Burner, | 6 Outlet |

Source: Guideline VDI 2578 Emission control Glassworks, 1999

- A modern regenerative container furnace will have an overall thermal efficiency of around 50% with waste gas losses around 20%.
- Larger furnaces are inherently more energy efficient due to the lower surface area to volume ratio.
- The use of cullet can significantly reduce energy consumption.
- As a general rule each 10% increase in cullet usage results in an energy saving of 2 - 3% in the melting process.

- Electric boost is generally used to improve the melting capability of the furnace rather than to improve energy efficiency.
- Electric boosting can contribute 2 - 20% of total energy input.
- Generally in container and float glass furnaces, the amount of electric boosting is very limited (<5%) due to the cost of electricity.

- Oxy-fuel firing can also reduce energy consumption, particularly in smaller furnaces.
- The elimination of the majority of the nitrogen from the combustion atmosphere reduces the volume of the waste gases leaving the furnace by 60 - 80%.

Thermodynamics approach



Calculations

- Exploited heat
- Heat balance (Furnace Performance)
- Furnace Efficiency

ประโยชน์

- ▶ ทราบปริมาณการใช้พลังงานของการเตาหลอมที่กำลังการผลิตต่าง ๆ
- ▶ ทราบปริมาณพลังงานสูญเสียที่ผนังเตา
- ▶ ทราบประสิทธิภาพของเตาหลอมที่กำลังการผลิตต่าง ๆ
- ▶ ทราบแนวทางการลดพลังงานในเตาหลอม

Calculations

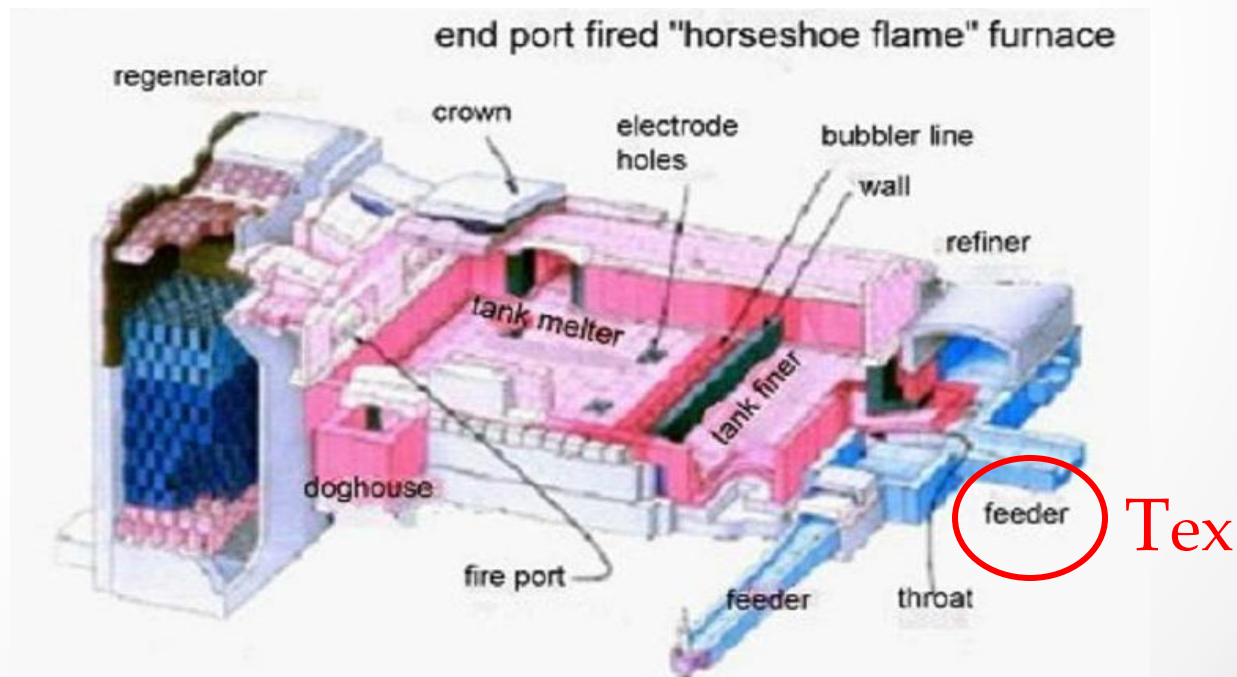
- Exploited heat
- Heat balance (Furnace Performance)
- Furnace Efficiency

Exploited heat (Hex)

Hex คือพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอม batch จากอุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) ถึงอุณหภูมิ Tex

$$H_{\text{Hex}} = \Delta H^{\circ}_{\text{chem}} + \Delta H_{\text{melt}}(T_{\text{ex}})$$

$$P_{\text{ex}} = H_{\text{Hex}} \times \text{pull rate}$$



$\Delta H^\circ_{\text{chem}}$ คือ ค่าความร้อน (enthalpy) ที่ใช้ในปฏิกิริยาทางเคมีในการแปรสภาพจาก batch ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) ไปเป็น glass กับ gas ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K)

Batch (298 K) \rightarrow glass (298 K) + batch gases (298 K)

$$\Delta H^\circ_{\text{chem}} = H^\circ_{\text{glass}} + H^\circ_{\text{gas}} - H^\circ_{\text{batch}}$$

$\Delta H_{\text{melt}}(T_{\text{ex}})$ ค่าความร้อนใน melt (heat content) ที่อุณหภูมิ T_{ex} เทียบกับค่าความร้อนของแก้วที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K)

$$\Delta H_{\text{melt}}(T_{\text{ex}}) = H_{T,\text{melt}} - H^\circ_{\text{glass}}$$

$$H^\circ_{\text{glass}} = \sum_k n_k \cdot (H^\circ_k + H_k^{\text{vit}})$$

$$H_{T,\text{melt}} = H^\circ_{1400,\text{melt}} + c_{p,\text{melt}} \cdot (T - 1400)$$

FURNACE DATA

- ปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ
- % Cullet ที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- อุณหภูมิที่ feeder



Exploited
heat

- ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (m^3/day)
- Heat value ของเชื้อเพลิง
- ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kW)
- ปริมาณ Off gas หรือ Air, O_2 ที่ใช้ (m^3/day)
- อุณหภูมิของ Off gas ที่ Regenerator
- อุณหภูมิ Oncoming air
- อุณหภูมิที่ Stack

Exploited heat (H_{ex})

$$H_{ex} = (1 - y_c) \Delta H^{\circ}_{chem} + \Delta H_{melt}(T_{ex})$$

$$\Delta H^{\circ}_{chem} = H^{\circ}_{glass} + H^{\circ}_{gas} - H^{\circ}_{batch}$$

H°batch

BATCH TO MELT

CONVERSION.xls

	A	B	C	D	E	F	G
1	heat balance, batch-to-melt conversion						blue: input required
2							red: results
3							
4	mass and heat balance, batch-to-melt conversion						
5						H°batch	
6	batch material	M	m(i)	h°(i)	h°(i)	H°(i)	
7		g/mol	kg	kJ/mol	kWh/kg	kWh	
8							
9	Silica sand (SiO₂)	60.08	732.83	910.91	4.2112	3086.13	
10	Dolomite (CaMg(CO₃)₂)	184.40	229.95	2315.02	3.4873	801.91	
11	Sodium Carbonate (Na₂CO₃)	105.99	229.95	1129.72	2.9608	680.84	
12	Alumina (Al₂O₃)	101.96	15.00	1675.71	4.5652	68.48	
13							
14							
15							
16							
17	sum		1207.73			4637.35	

Produce 1 ton of
glass

Exploited heat (Hex)

$$H_{\text{ex}} = (1 - y_c) \Delta H^{\circ}_{\text{chem}} + \Delta H_{\text{melt}}(T_{\text{ex}})$$

$$\Delta H^{\circ}_{\text{chem}} = H^{\circ}_{\text{glass}} + H^{\circ}_{\text{gas}} - H^{\circ}_{\text{batch}}$$

H° gas

BATCH TO MELT
CONVERSION.xls

	A	B	C	D	E	F
19						
20	heat balance, batch gases, per t of glass					
21					H° gas	
22	gas	M(g)	m(g)	h°(g)	H°(g)	
23		g/mol	kg	kWh/kg	kWh	
24						
25	CO2	44.010	207.72	2.484	515.9	
26	CO	28.010	0.00	1.096	0.0	
27	SO3	80.061	0.00	1.373	0.0	
28	SO2	64.062	0.00	1.287	0.0	
29	O2	31.999	0.00	0.000	0.0	
30	N2	28.014	0.00	0.000	0.0	
31	F2	37.996	0.00	0.000	0.0	
32	H2O	18.015	0.00	3.728	0.0	
33						
34	sum		207.72		515.9	
35						
36						

Exploited heat (H_{ex})

$$H_{ex} = (1 - y_c) \Delta H^{\circ}_{chem} + \Delta H_{melt}(T_{ex})$$

$$\Delta H^{\circ}_{chem} = H^{\circ}_{glass} + H^{\circ}_{gas} - H^{\circ}_{batch}$$

$$H^{\circ}_{glass} = \sum_k n_k \cdot (H^{\circ}_k + H_k^{vit})$$

GLASS.xls

H° glass

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	NORMATIVE GLASS ANALYSIS										
2	T =	1400 °C			heat content	463.39	kWh/t		heat of formation	3961.57	kWh/t
3	component	g/100g	mol/100g		compound k	g/100g	mol/kg		compound k	g/100g	mol/kg
4	SiO2	73.20	1.2182		P2O5-3CaO				CaO-MgO-2SiO2		
5	TiO2				Cr2O3				2CaO-MgO-2SiO2		
6	ZrO2				Fe2O3				CaO-Al2O3-2SiO2		
7	Al2O3	1.57	0.0154		FeO-Fe2O3	0.02	0.0007		2CaO-Al2O3-SiO2		
8	B2O3				FeO-SiO2	0.00	0.0002		Al2O3-2SiO2		
9	Fe2O3	0.02	0.0002		MnO-SiO2				Al2O3		
10	Cr2O3				2ZnO-SiO2				MgO-Al2O3		
11	P2O5				ZrO2-SiO2				CaO-Al2O3		
12	MgO	4.57	0.1134		CaO-TiO2				CaO-SiO2		
13	CaO	7.20	0.1283		CaF2				2CaO-SiO2		
14	BaO				BaO-Al2O3-2SiO2				Na2O-2SiO2	28.92	1.5876
15	MnO				BaO-2SiO2				Na2O-SiO2		
16	ZnO				Li2O-Al2O3-4SiO2				Na2O-3CaO-6SiO2	25.26	0.4277
17	PbO				Li2O-SiO2				3Na2O-8SiO2		
18	Li2O				K2O-Al2O3-6SiO2				Na2O-CaO-5SiO2		
19	Na2O	13.45	0.2170		K2O-Al2O3-2SiO2				Na2O-2CaO-3SiO2		
20	K2O				K2O-2SiO2				2Na2O-CaO-3SiO2		
21	F2				Na2O-Al2O3-6SiO2	8.09	0.1543		SiO2	26.32	4.3811
22	MoO3				Na2O-Al2O3-2SiO2				PbO-SiO2		
23	Nd2O3				Na2O-2B2O3				K2O-PbO-4SiO2		
24	SrO				B2O3				K2O-4SiO2		
25	Cs2O				2MgO-2Al2O3-5SiO2				MoO3		
26	total g	100.00	1.6925		MgO-SiO2	11.38	1.1340		Nd2O3		
27	redox no.		[+26;-39]		2MgO-SiO2				SrO-SiO2		
28	Fe2O3	0.01							Cs2O-2SiO2		
29	FeO	0.01			components	7					
30	g/mol		59.0828		compounds	7			sum	100.00	7.6856
31											
32											

Exploited heat (H_{ex})

$$H_{ex} = (1 - y_c) \Delta H^\circ_{chem} + \Delta H_{melt} (T_{ex})$$

$$\Delta H^\circ_{chem} = H^\circ_{glass} + H^\circ_{gas} - H^\circ_{batch}$$

$$= -3961.57 - 515.9 + 4637.35$$

$$= 159.88 \text{ KWh/t}$$

Exploited heat (H_{ex})

$$H_{ex} = (1 - y_c) \Delta H^{\circ}_{chem} + \Delta H_{melt}(T_{ex})$$

$$\Delta H_{melt}(T_{ex}) = H_{T,melt} - H^{\circ}_{glass}$$

$$H_{T,melt} = H^{\circ}_{1400,melt} + c_{p,melt} \cdot (T_{ex} - 1400)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	NORMATIVE GLASS ANALYSIS										
2	T =		1400	°C	heat content	463.39	kWh/t	heat of formation	3961.57	kWh/t	
3	component	g/100g	mol/100g	compound k	g/100g	mol/kg	compound k	g/100g	mol/kg		
4	SiO2	73.20	1.2182	P2O5·3CaO			CaO·MgO·2SiO2				
5	TiO2			Cr2O3			2CaO·MgO·2SiO2				
6	ZrO2			Fe2O3			CaO·Al2O3·2SiO2				
7	Al2O3	1.57	0.0154	FeO·Fe2O3	0.02	0.0007	2CaO·Al2O3·SiO2				
8	B2O3			FeO·SiO2	0.00	0.0002	Al2O3·2SiO2				
9	Fe2O3	0.02	0.0002	MnO·SiO2			Al2O3				
10	Cr2O3			2ZnO·SiO2			MgO·Al2O3				
11	P2O5			ZrO2·SiO2			CaO·Al2O3				
12	MgO	4.57	0.1134	CaO·TiO2			CaO·SiO2				
13	CaO	7.20	0.1283	CaF2			2CaO·SiO2				
14	BaO			BaO·Al2O3·2SiO2			Na2O·2SiO2	28.92		1.5876	
15	MnO			BaO·2SiO2			Na2O·SiO2				
16	ZnO			Li2O·Al2O3·4SiO2			Na2O·3CaO·6SiO2	25.26		0.4277	
17	PbO			Li2O·SiO2			3Na2O·8SiO2				
18	Li2O			K2O·Al2O3·6SiO2			Na2O·CaO·5SiO2				
19	Na2O	13.45	0.2170	K2O·Al2O3·2SiO2			Na2O·2CaO·3SiO2				
20	K2O			K2O·2SiO2			2Na2O·CaO·3SiO2				
21	F2			Na2O·Al2O3·6SiO2	8.09	0.1543	SiO2	26.32		4.3811	
22	MoO3			Na2O·Al2O3·2SiO2			PbO·SiO2				
23	Nd2O3			Na2O·2B2O3			K2O·PbO·4SiO2				
24	SrO			B2O3			K2O·4SiO2				
25	Cs2O			2MgO·2Al2O3·5SiO2			MoO3				
26	total g	100.00	1.6925	MgO·SiO2	11.38	1.1340	Nd2O3				
27	redox no.		[+26; -39]	2MgO·SiO2			SrO·SiO2				
28	Fe2O3	0.01					Cs2O·2SiO2				
29	FeO	0.01									
30	g/mol		59.0828	components		7	sum	100.00		7.6856	
31				compounds		7					
32											

Exploited heat (H_{ex})

$$H_{ex} = (1 - y_c) \Delta H^\circ_{\text{chem}} + \Delta H_{\text{melt}}(T_{ex})$$

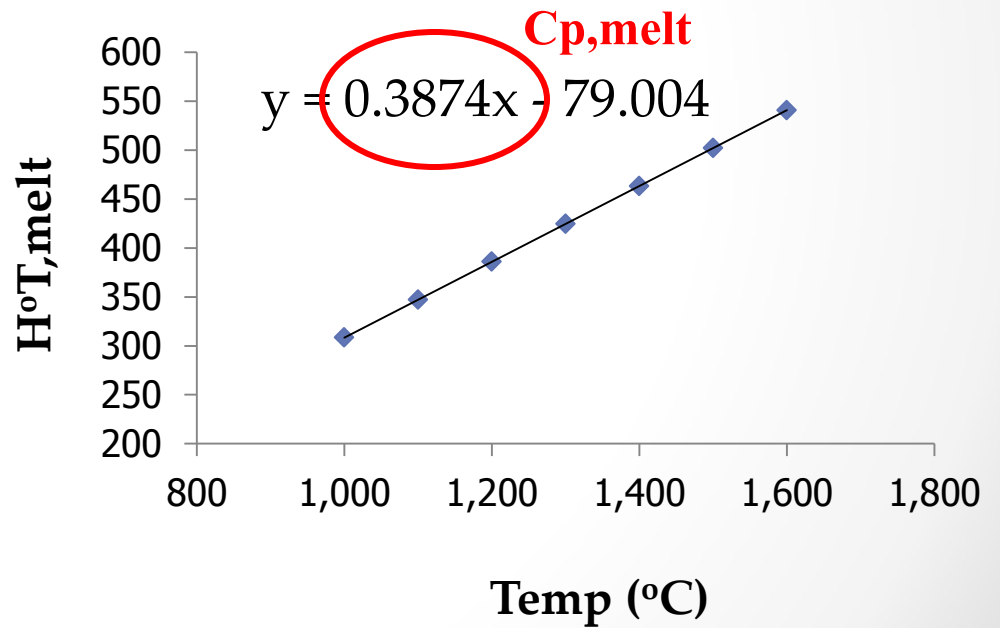
$$\Delta H_{\text{melt}}(T_{ex}) = H_{T,\text{melt}} - H^\circ_{\text{glass}}$$

$$H_{T,\text{melt}} = H^\circ_{1400,\text{melt}} + c_{p,\text{melt}} \cdot (T - 1400)$$

Cp,melt

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	NORMATIVE GLASS ANALYSIS										
2	T =	1400 °C			heat content	463.39	kWh/t		heat of formation	3961.57	kWh/t
3	component	g/100g	mol/100g		compound k	g/100g	mol/kg		compound k	g/100g	mol/kg
4	SiO2	73.20	1.2182		P2O5-3CaO				CaO-MgO-2SiO2		
5	TiO2				Cr2O3				2CaO-MgO-2SiO2		
6	ZrO2				Fe2O3				CaO-Al2O3-2SiO2		
7	Al2O3	1.57	0.0154		FeO-Fe2O3	0.02	0.0007		2CaO-Al2O3-SiO2		
8	B2O3				FeO-SiO2	0.00	0.0002		Al2O3-2SiO2		
9	Fe2O3	0.02	0.0002		MnO-SiO2				Al2O3		

Temp °C	heat content (kWh/t)
1000	308.98
1100	347.67
1200	386.36
1300	425.04
1400	463.73
1500	502.41
1600	541.10



Exploited heat (H_{ex})

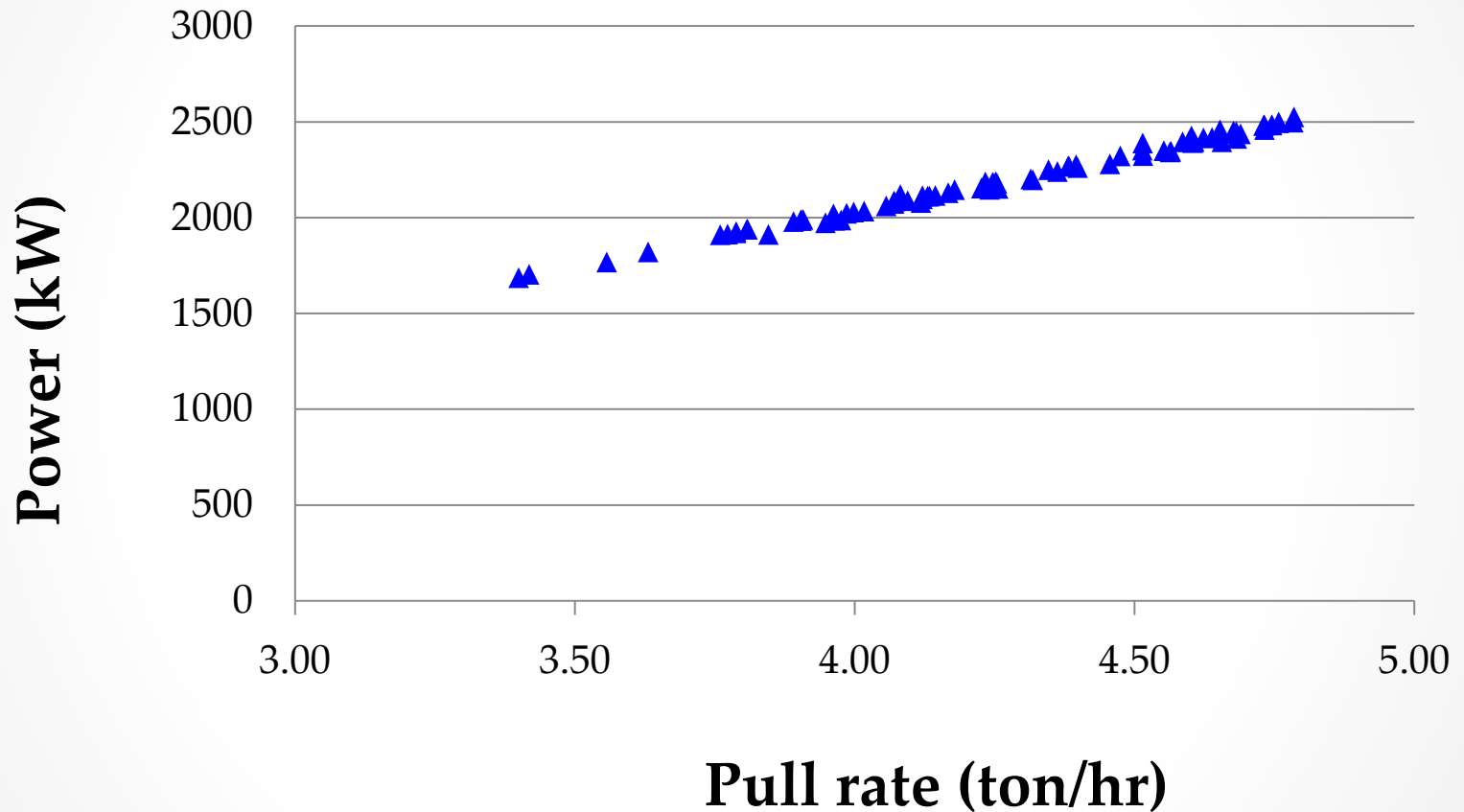
$$\begin{aligned} H_{ex} &= (1-y_c) \Delta H^\circ_{\text{chem}} + \Delta H_{\text{melt}}(T_{\text{ex}}) \\ &= (1-y_c) \Delta H^\circ_{\text{chem}} + H^\circ_{1400, \text{melt}} + C_{p, \text{melt}} (T_{\text{ex}} - 1400) \\ &= (1-y_c) 159.88 + 463.39 + 0.3874(T_{\text{ex}} - 1400) \end{aligned}$$

Exploited heat (Hex)

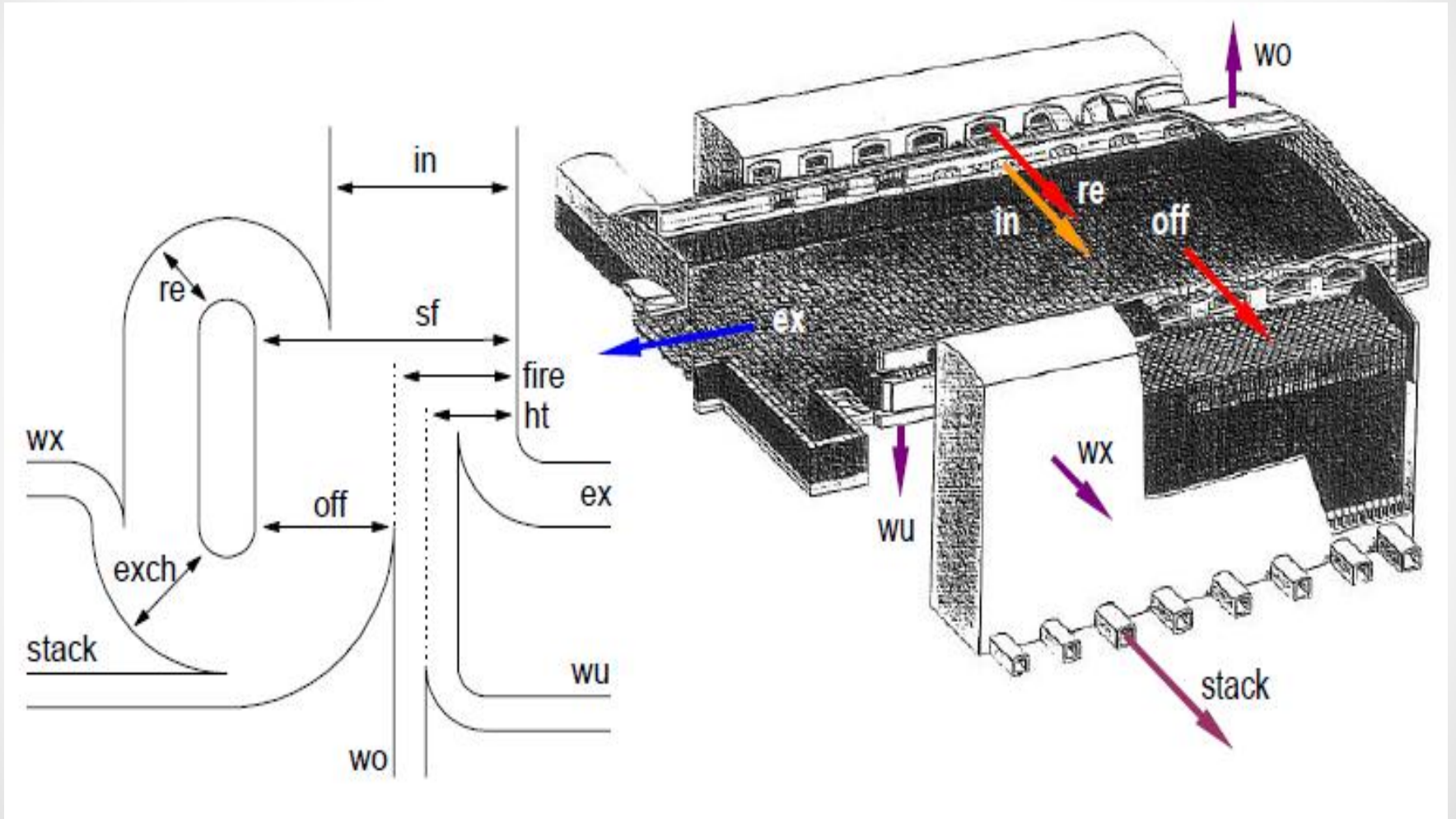
Furnace data

Date	Pull rate (t/h)	Tex (at feeder)	% cullet	Hex	Pex
01/06/54	4.25	1414	40	570.64	2188.74
02/06/54	4.25	1407	40	567.92	2179.83
03/06/54	4.25	1410	40	569.09	2180.50
04/06/54	4.38	1417	40	571.80	2268.23
05/06/54	4.48	1418	40	572.19	2322.29
06/06/54	4.45	1418	40	572.19	2039.46
07/06/54	4.35	1419	40	572.57	2250.28
08/06/54	4.40	1417	40	571.80	2275.33
09/06/54	4.38	1419	40	572.57	2270.37
10/06/54	4.52	1446	40	583.03	2389.68
11/06/54	4.60	1438	40	579.93	2427.26
12/06/54	4.65	1439	40	580.32	2458.62
13/06/54	4.76	1427	40	575.67	2499.23
14/06/54	4.75	1422	40	573.73	2483.87
15/06/54	4.75	1422	40	573.73	2483.94
16/06/54	4.78	1418	40	572.19	2499.02
17/06/54	4.79	1433	40	578.00	2525.17
18/06/54	4.73	1425	40	574.90	2480.46
19/06/54	4.73	1427	40	575.67	2484.31

Exploited power (P_{ex})



Furnace Performance



FURNACE DATA

- ปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ
- % Cullet ที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- อุณหภูมิที่ feeder

- ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (m^3/day)
- Heat value ของเชื้อเพลิง
- ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

 Input energy,
 P_{in}

- ปริมาณ Off gas หรือ Air, O_2 ที่ใช้ (m^3/day)
- อุณหภูมิของ Off gas ที่ Regenerator
- อุณหภูมิ Oncoming air
- อุณหภูมิที่ Stack

* Combustion

1. คำนวณ Net Heating value, HV (kWh/ m³) ของ Fuel ที่ใช้

GAS COMPOSITION FROM ONLINE GC AT MTP (AT DPCU) - PAST 7 DAYS

TIME	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆ +	N ₂	HHV(dry)	SG.	WI	C ₂ +
											(BTU/ SCF)		(BTU/ SCF)	
02/08/2553 16:00	9.72	79.33	4.96	2.5	0.58	0.49	0.16	0.1	0.11	2.04	1008	0.73	1180	8.9
02/08/2553 15:00	9.72	79.24	5.07	2.48	0.58	0.48	0.16	0.1	0.11	2.06	1008	0.73	1180	8.99
02/08/2553 14:00	9.81	78.89	5.35	2.47	0.58	0.48	0.16	0.1	0.11	2.06	1009	0.73	1179	9.24
02/08/2553 13:00	9.71	78.74	5.54	2.51	0.59	0.49	0.16	0.1	0.11	2.05	1012	0.73	1183	9.49
02/08/2553 12:00	9.65	79.3	5.01	2.52	0.59	0.49	0.16	0.1	0.11	2.07	1009	0.73	1181	8.98
02/08/2553 11:00	9.5	79.39	5.16	2.47	0.57	0.48	0.16	0.1	0.1	2.08	1010	0.73	1184	9.03
02/08/2553 10:00	9.47	79.47	5.28	2.36	0.55	0.45	0.16	0.09	0.09	2.08	1008	0.73	1183	8.99
02/08/2553 09:00	9.6	80.1	5	2.06	0.46	0.38	0.14	0.08	0.08	2.1	994	0.72	1172	8.2
02/08/2553 08:00	8.97	81.54	4.38	1.9	0.43	0.35	0.13	0.07	0.07	2.17	990	0.71	1177	7.32
02/08/2553 07:00	9	81.49	4.38	1.92	0.43	0.36	0.12	0.07	0.07	2.15	991	0.71	1177	7.35
02/08/2553 06:00	9.29	80.36	5	2.13	0.46	0.38	0.13	0.08	0.07	2.11	998	0.72	1178	8.24
02/08/2553 05:00	9.04	80.88	4.81	2.05	0.46	0.38	0.13	0.08	0.08	2.11	997	0.71	1182	7.97
02/08/2553 04:00	9.3	80.58	4.81	2.09	0.46	0.38	0.13	0.08	0.08	2.09	996	0.72	1177	8.03
02/08/2553 03:00	9.13	80.56	4.97	2.13	0.47	0.39	0.13	0.08	0.08	2.07	1000	0.72	1182	8.24
02/08/2553 02:00	9.52	79.9	5.07	2.25	0.5	0.41	0.14	0.08	0.09	2.05	1001	0.72	1178	8.53
02/08/2553 01:00	9.48	79.68	5.19	2.31	0.51	0.43	0.15	0.09	0.09	2.07	1004	0.72	1180	8.76

Net Heating Value of Fuel

CxHy	HV (kWh/m ³)	%CxHy	HV (kWh/m ³)
CH ₄	8.9905	79	7.1025
C ₂ H ₆	15.9998	5	0.79999
C ₃ H ₈	22.9045	2.4	0.54971
C ₄ H ₁₀	29.7741	1	0.29774
C ₅ H ₁₂	36.6662	0.31	0.11183
C ₆ H ₁₄	43.5531	0.13	0.05662
Net Heating value (kWh/m ³) of fuel			8.91838

At ref. 0°C 1 atm

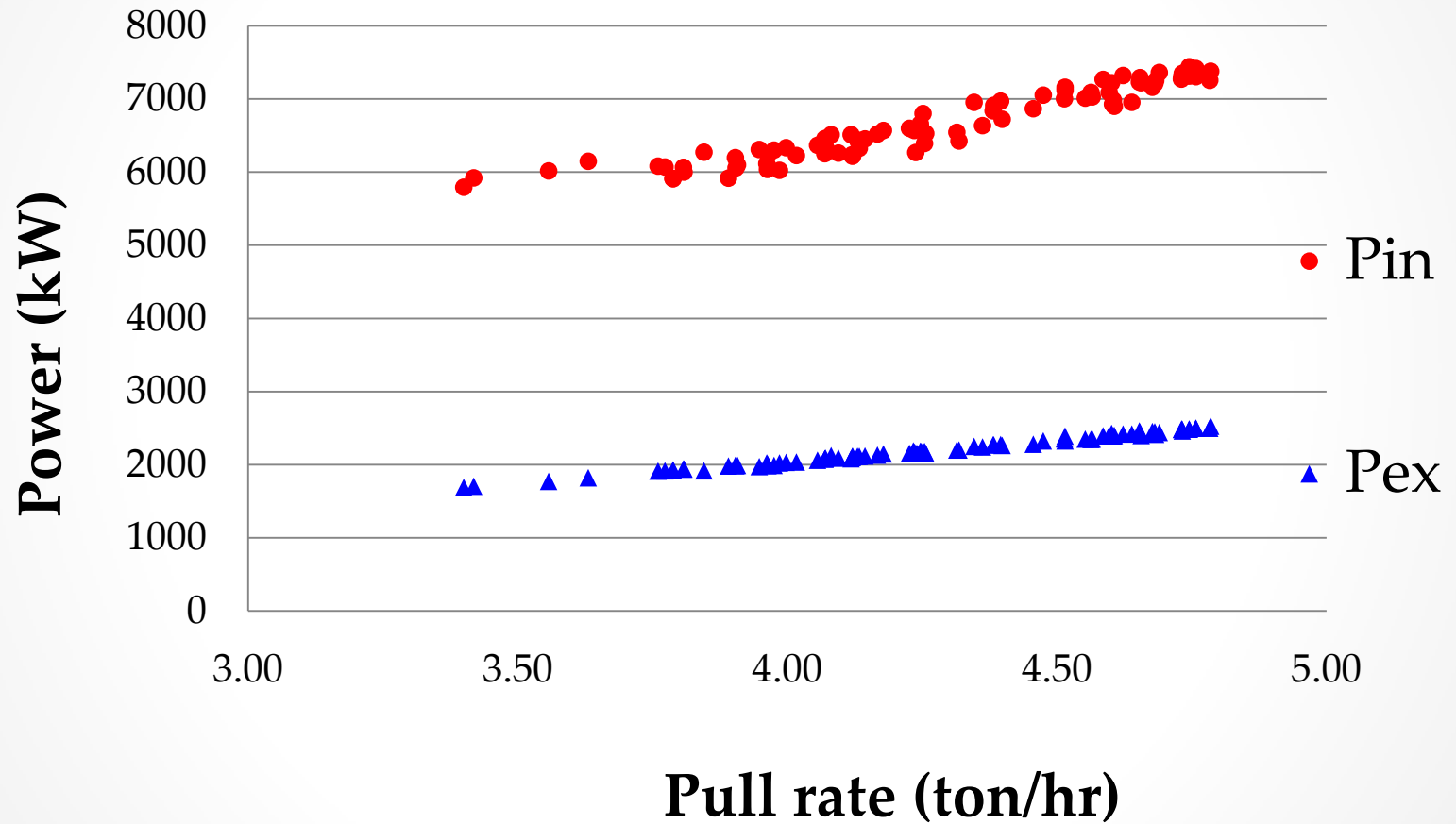
Input power data

Furnace data

Date	Pull rate (t/h)	NG (m ³ /h)	HV (kW/m ³)	Air (m ³ /h)	Booster (kWh/h)	Pin (kW)
01/06/54	4.25	700	8.918	7300	13400	7117
02/06/54	4.25	670	8.918	7020	10000	7219
03/06/54	4.25	680	8.918	7200	13000	7228
04/06/54	4.38	700	8.918	7400	16000	7415
05/06/54	4.48	715	8.918	7500	16200	7438
06/06/54	4.45	712	8.918	7500	15890	7312
07/06/54	4.35	712	8.918	7525	14500	7252
08/06/54	4.40	715	8.918	7540	14200	7379
09/06/54	4.38	700	8.918	7445	14300	7269
10/06/54	4.52	720	8.918	7600	16700	7317
11/06/54	4.60	730	8.918	7660	17000	7305

$$\text{Pin} = (\text{fuel consumption} \times \text{HV}) + \text{electricity power}$$


Input Power (P_{in})



FURNACE DATA

- ปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ
- % Cullet ที่ใช้ผลิตแก้ว 1 ตัน
- อุณหภูมิที่ feeder
- ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (m^3/day)
- Heat value ของเชื้อเพลิง
- ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

- ปริมาณ Off gas หรือ Air, O_2 ที่ใช้ (m^3/day)
- อุณหภูมิของ Off gas ที่ Regenerator
- อุณหภูมิ Oncoming air
- อุณหภูมิที่ Stack

 $P_{\text{off}}, P_{\text{re}}, P_{\text{stack}}$

Temperature data

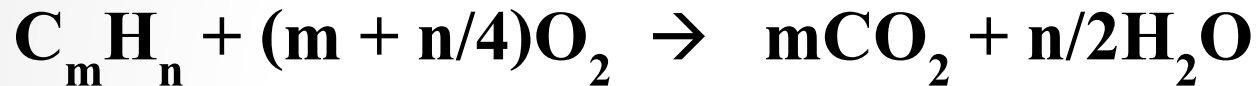
Furnace data

Date	Pull rate (t/h)	Temperature (°C)				Total Offgas (m ³ /h)
		Tex at feeder	Offgas at regen. (Tre)	On-coming air (Ton)	Offgas at stack (Tst)	
01/06/54	4.25	1414	1447	868	551	7968
02/06/54	4.25	1407	1466	880	541	7659
03/06/54	4.25	1410	1455	873	546	7848
04/06/54	4.38	1417	1459	875	517	8068
05/06/54	4.48	1418	1448	869	558	8182
06/06/54	4.45	1418	1460	876	558	8173
07/06/54	4.35	1419	1470	882	568	8204
08/06/54	4.40	1417	1458	875	528	8222
09/06/54	4.38	1419	1441	865	512	8113
10/06/54	4.52	1446	1460	876	562	8287

Heat content of offgas x Total offgas

STOICHIOMETRY OF HYDROCARBONS OXIDATION

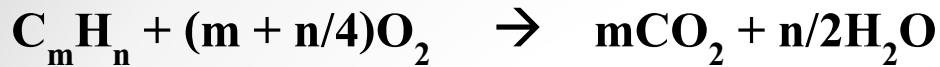
The equation of stoichiometry:



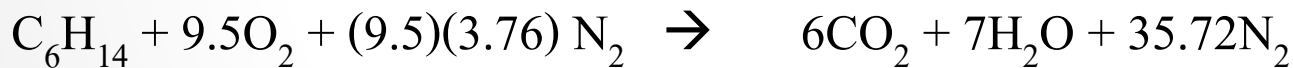
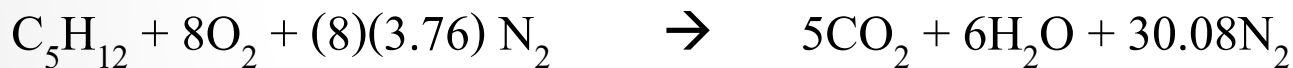
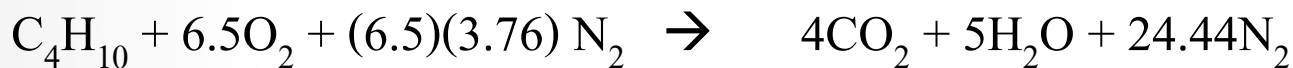
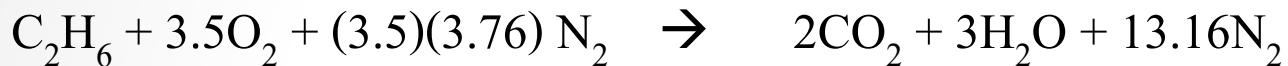
In combustion processes the oxidizer could be:

1. Oxygen (O_2)
2. Air ($21\%\text{O}_2 + 79\%\text{N}_2$)
3. Air enriched with oxygen ($\text{O}_2 > 21\%$)

STOICHIOMETRY OF HYDROCARBONS OXIDATION



Oxidizer -> Air (21%O₂ + 79%N₂)



$$\text{Total offgas (m}^3\text{/h)} = \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

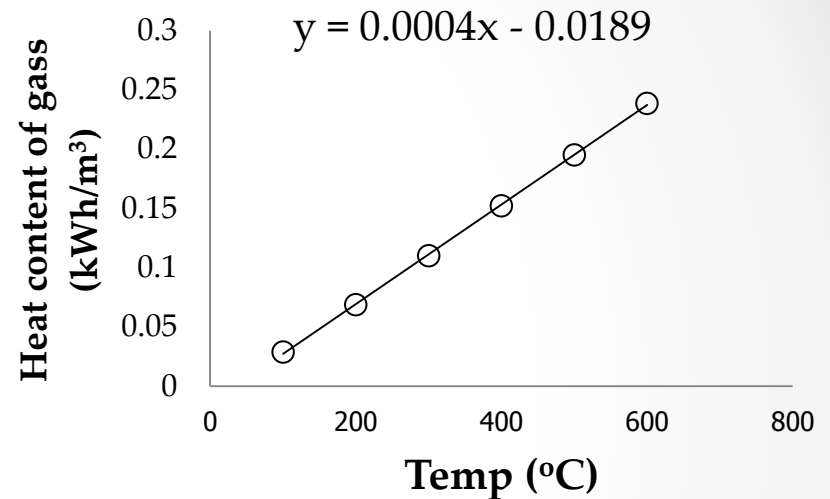
$$\text{O}_2 = (\text{O}_2 \text{ Actual} - \text{O}_2 \text{ Stoichiometric}) + (\text{Air}_{\text{Actual}} - \text{Air}_{\text{Stoichiometric}}) \times 0.21$$

$$\text{N}_2 = \text{Air}_{\text{Actual}} \times 0.79$$

HEAT CONTENT IN OFFGAS

HEAT IN GASES.xls

	A	B	C	D	E	F
1	heat content in air and offgas:					
2						
3	NTP: 25 °C, 1 bar: 1	ntp: 0 °C, 1 atm: 2			2	
4						
5			cP(T)	-H°(T)	S°(T)	-G°(T)
6			J/mol-K	kJ/mol	J/mol-K	kJ/mol
7	environment	25 °C				
8	O2(g)	298	29.328	0.000	205.100	61.151
9	N2(g)	298	28.511	0.000	191.500	57.096
10	CH4(g)	298	35.347	74.800	186.300	130.345
11	CO2(g)	298	37.228	393.500	213.700	457.215
12	CO(g)	298	29.115	110.500	197.500	169.385
13	H2O(g)	298	33.561	241.800	188.700	298.061
14	offgas	100 °C				
15	O2(g)	373	30.320	-2.240	211.796	76.792
16	N2(g)	373	29.666	-2.186	198.034	71.711
17	CH4(g)	373	39.603	71.991	194.687	144.638
18	CO2(g)	373	41.380	390.538	222.545	473.580
19	CO(g)	373	29.610	108.297	204.089	184.453
20	H2O(g)	373	34.230	239.258	196.301	312.508
21	heat content	25 >>>>>>>	100 °C			
22		g/mol	kJ/mol	kJ/m3	kWh/m3	MJ/kg
23	O2(g)	31.999	2.2	99.9	0.0278	0.070
24	N2(g)	28.014	2.2	97.5	0.0271	0.078
25	CH4(g)	16.043	2.8	125.3	0.0348	0.175
26	CO2(g)	44.010	3.0	132.2	0.0367	0.067
27	CO(g)	28.010	2.2	98.3	0.0273	0.079
28	H2O(g)	18.015	2.5	113.4	0.0315	0.141
29	ideal gas:	##### NTP	0.02241	ntp	m3/mol	
30	offgas composition	%	%	kJ/mol	kJ/m3	kWh/m3
31	O2(g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
32	N2(g)	71.6	71.6	1.6	69.8	0.0194
33	CH4(g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
34	CO2(g)	9.9	9.9	0.3	13.1	0.0036
35	CO(g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
36	H2O(g)	18.5	18.5	0.5	21.0	0.0058
37	sum	100.0	100.0	2.3	103.9	0.0289



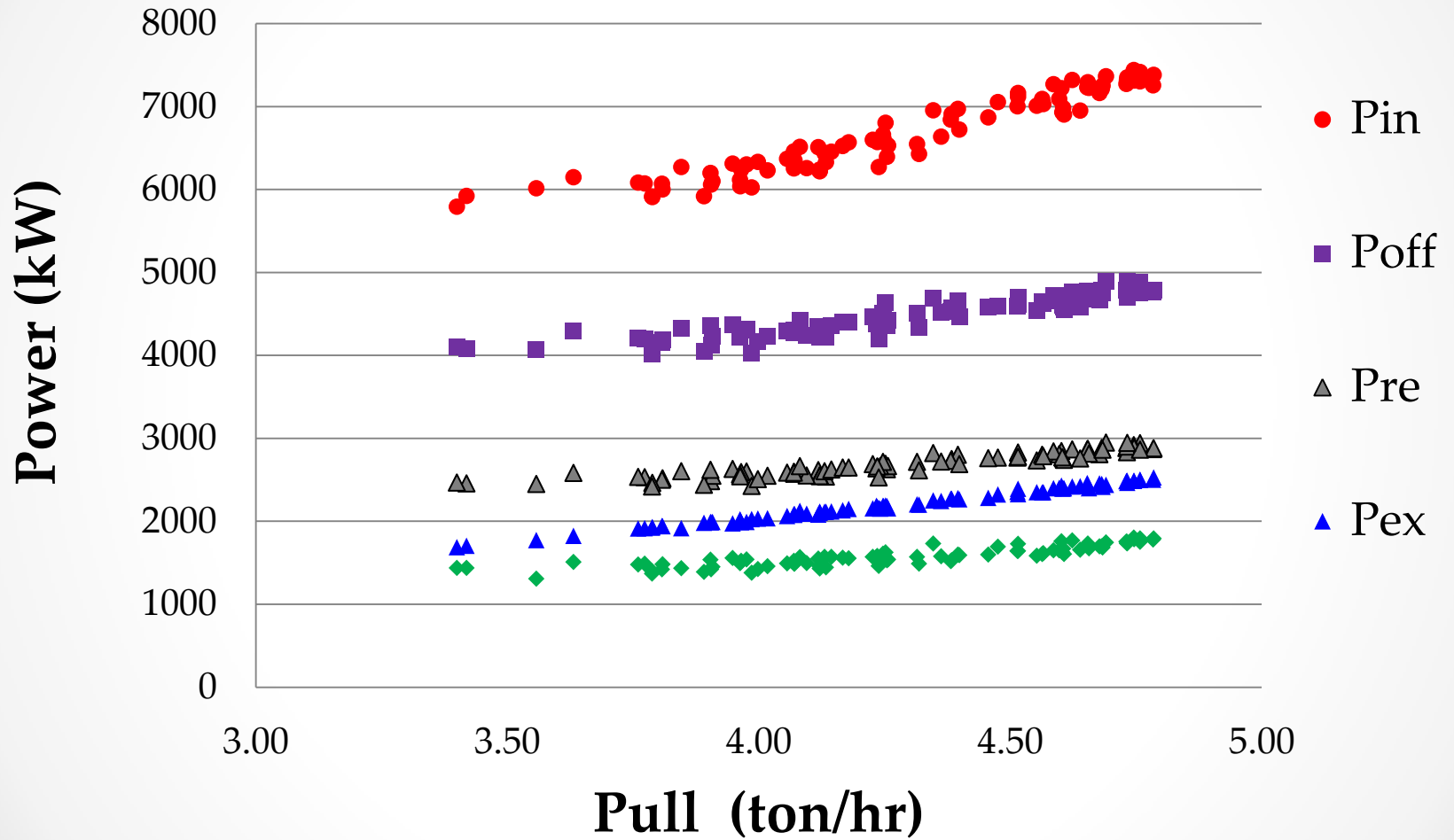
$$H_{\text{offgas}} = 0.0004 (T_{\text{offgas}} - 25) - 0.0189$$

$$P_{\text{off}} = [0.0004 (T_{\text{re}} - 25) - 0.0189] \times \text{Total offgas}$$

$$P_{\text{re}} = [0.0004 (T_{\text{on}} - 25) - 0.0189] \times \text{Total offgas}$$

$$P_{\text{stack}} = [0.0004 (T_{\text{st}} - 25) - 0.0189] \times \text{Total offgas}$$

Poff, Pre, Pstack

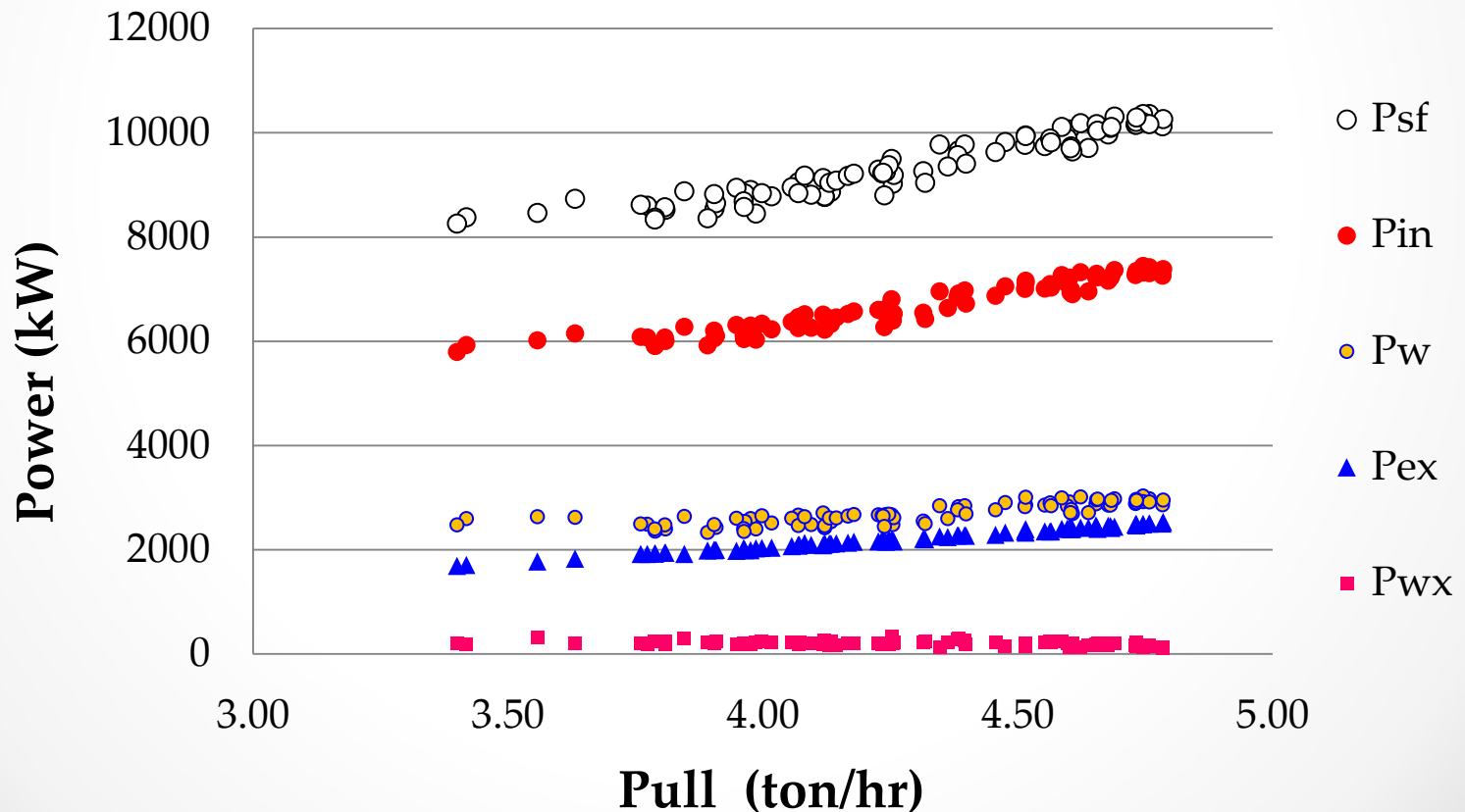


P_{sf}, P_w, P_{wx}

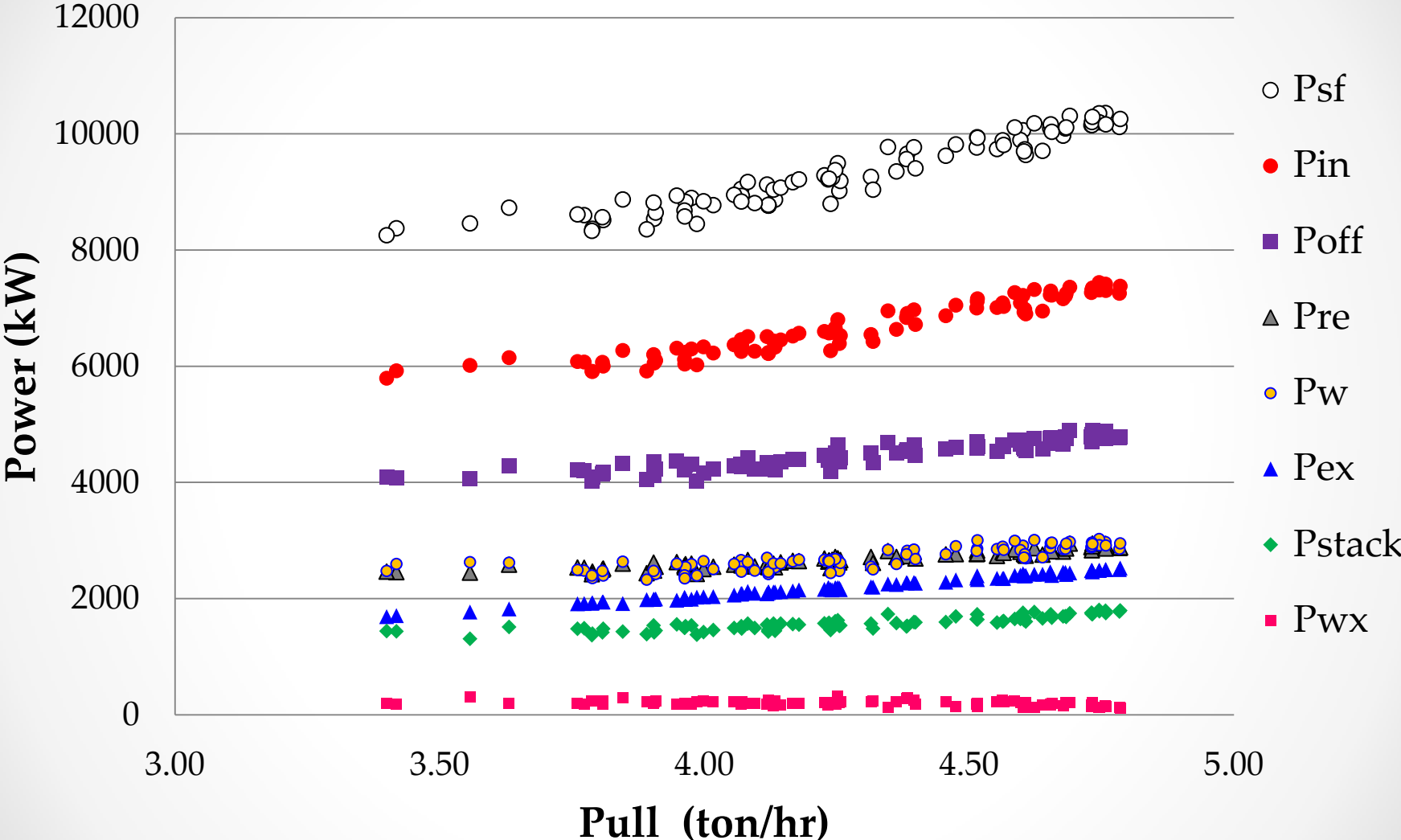
$$P_{sf} = P_{in} + P_{re}$$

$$P_w = P_{sf} - P_{off} - P_{ex} = P_{wo} + P_{wu}$$

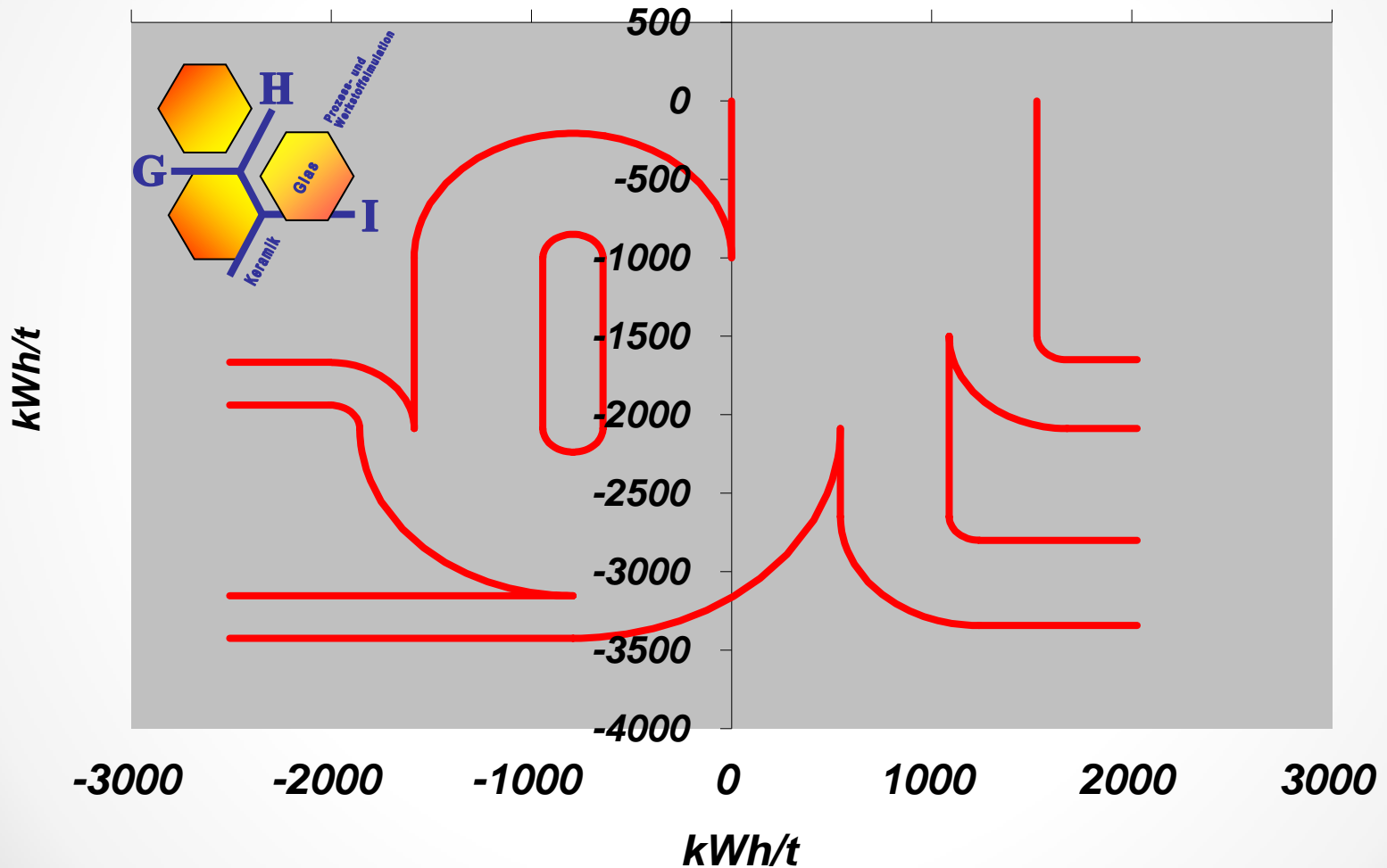
$$P_{wx} = P_{off} - P_{stack} - P_{re}$$



Furnace Performance

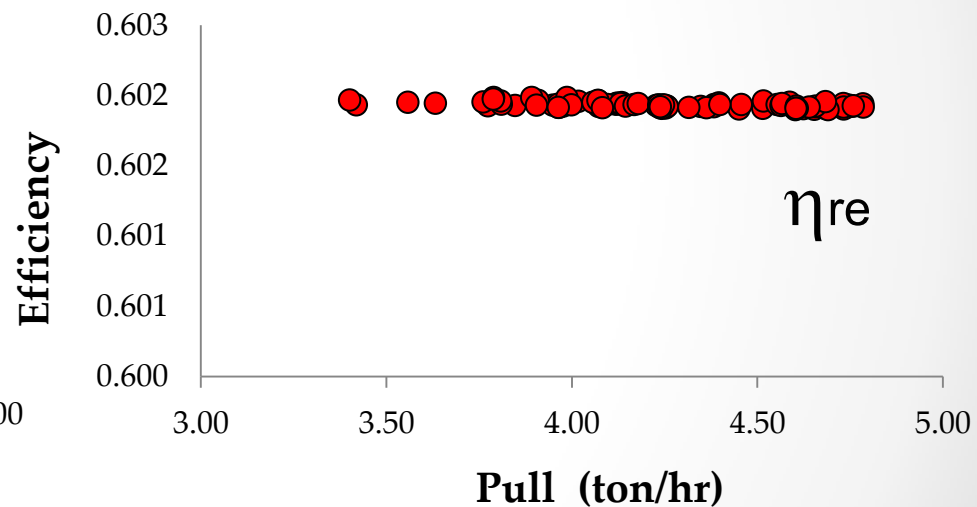
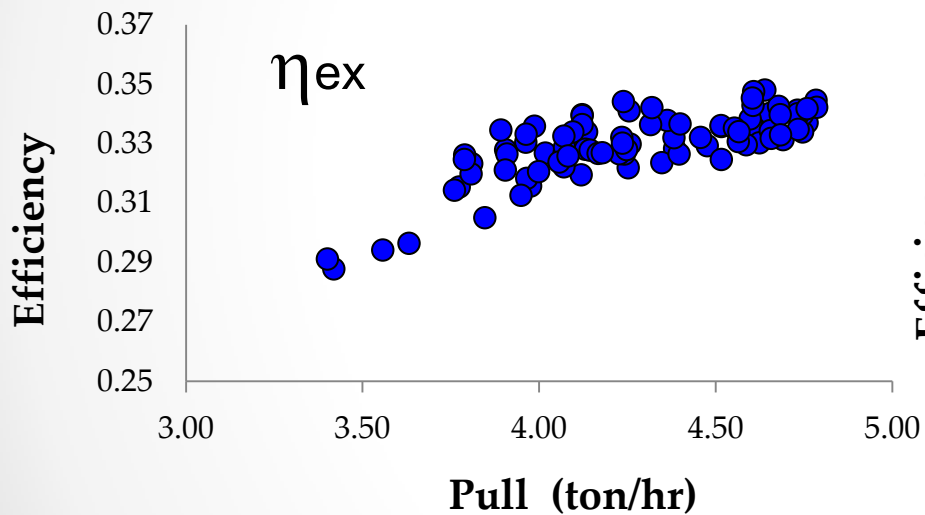


Heat balance at a constant pull rate



Furnace efficiency $\eta_{ex} = P_{ex} / P_{in}$

Regenerator efficiency $\eta_{re} = P_{re} / P_{off}$

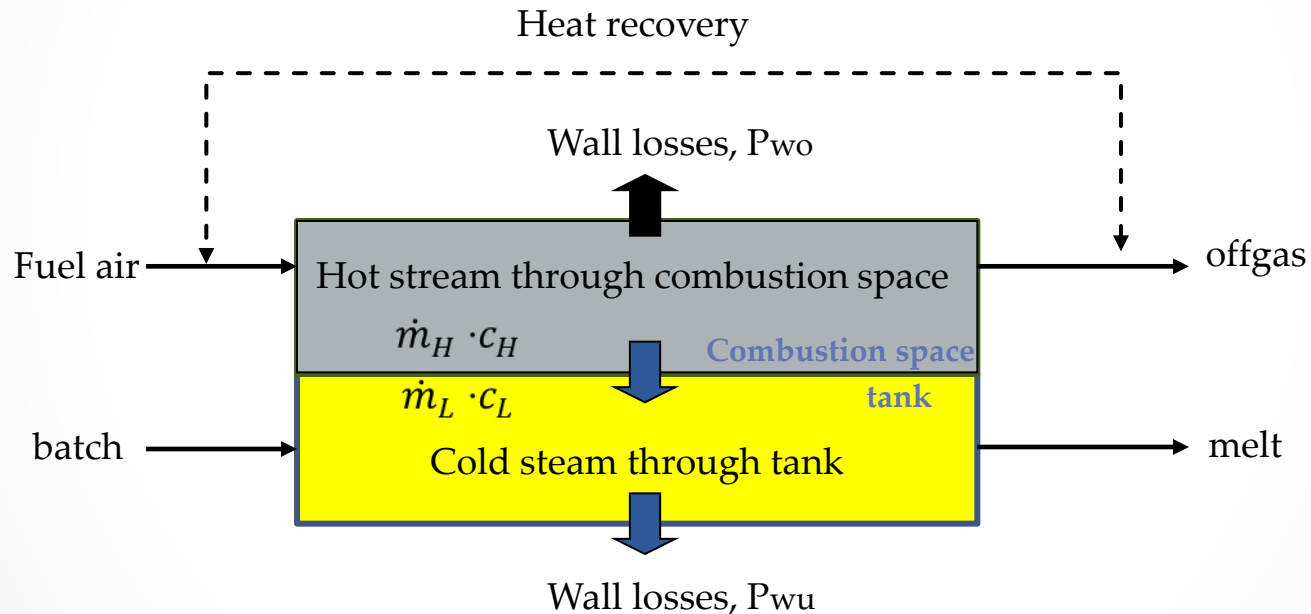


จำเป็นต้องเปลี่ยนสูตรหรือไม่ ?

การวิเคราะห์ข้อจำกัด (constraint) การถ่ายเท ความร้อนของเตาหลอม

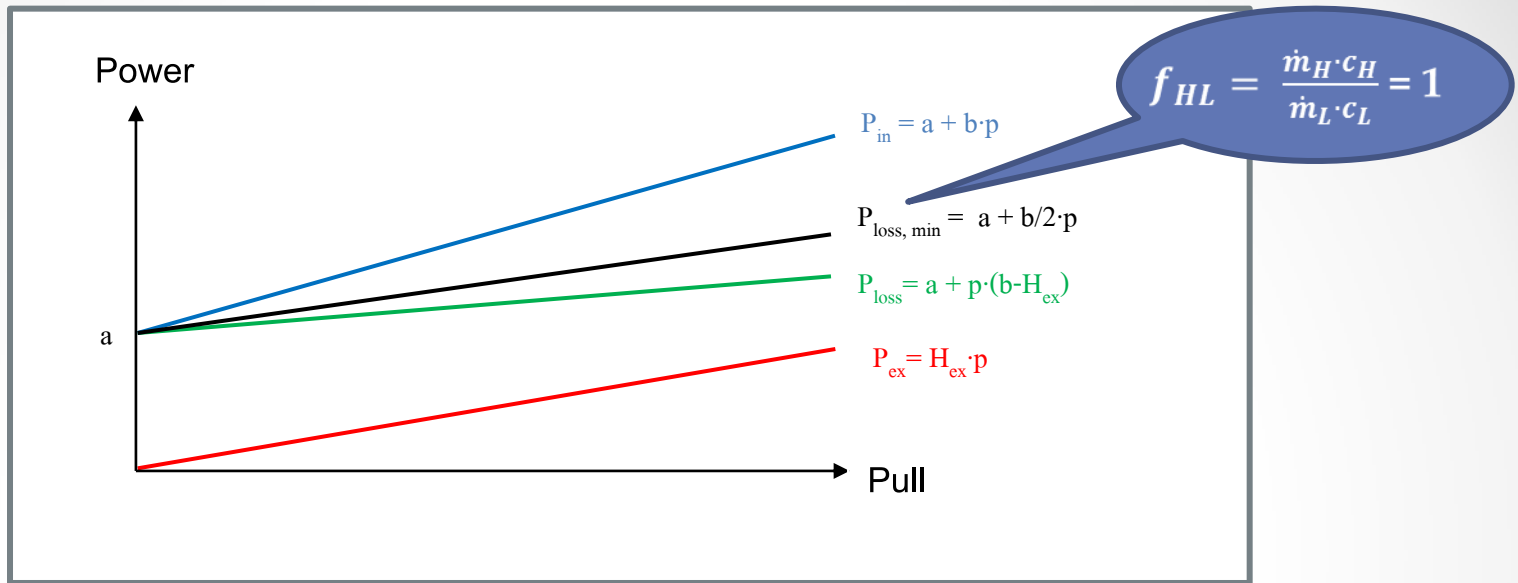
ข้อจำกัดการถ่ายเทความร้อนจาก combustion space ไป tank

- ข้อจำกัดทางเคมี (Chemical constraint)
- ข้อจำกัดทางความร้อน (Thermal constraint)



The imbalance ratio between hot and cold stream

$$f_{HL} = \frac{\dot{m}_H \cdot c_H}{\dot{m}_L \cdot c_L}$$



$$P_{in} = a + b \cdot p$$

$$P_{ex} = H_{ex} \cdot p$$

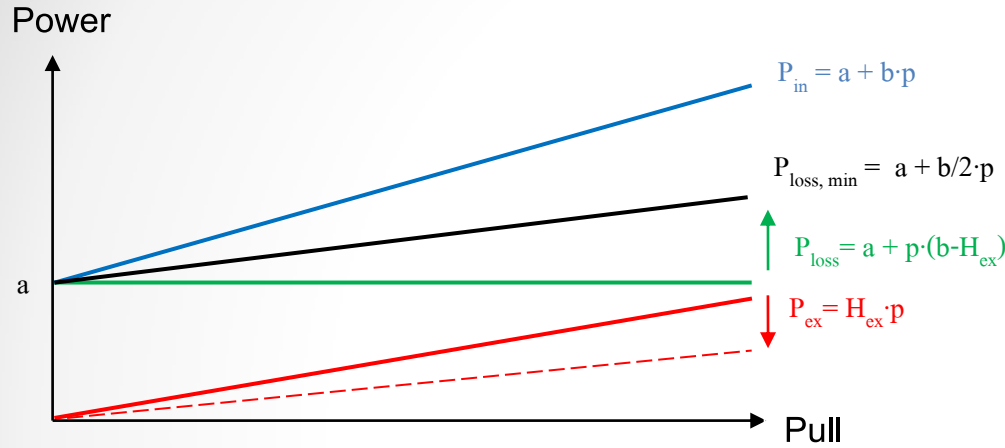
$$P_{loss} = P_{in} - P_{ex} = P_{wo} + P_{wu} + P_{wx} + P_{stack}$$

$$P_{loss} = a + p \cdot (b - H_{ex})$$

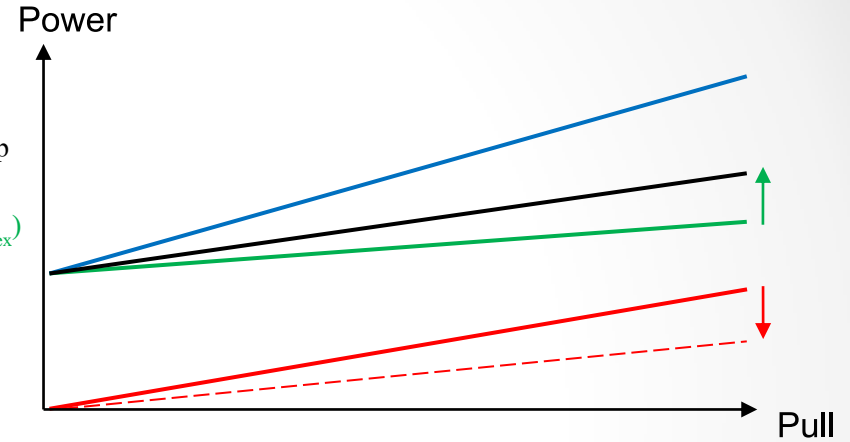
$$P_{loss, min} = a + b/2 \cdot p$$

CASE	Slope ($\partial P_{\text{loss}}/\partial p$)	Constraint
1	$b - H_{\text{ex}} = 0$	<ul style="list-style-type: none"> • P_{stack} ไม่เพิ่มตาม pull และ P_{in} • การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตาม pull • Chemical constraint
2	$0 < b - H_{\text{ex}} \leq b/2$	<ul style="list-style-type: none"> • P_{stack} เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม P_{in} • เมื่อ P_{in} เพิ่มขึ้น พลังงานที่เพิ่มขึ้นไม่ถ่ายเทไปที่ tank เนื่องจาก flow imbalance • Chemical constraint
3	$b - H_{\text{ex}} \geq b/2$	<ul style="list-style-type: none"> • P_{stack} เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม P_{in} • เมื่อ P_{in} เพิ่มขึ้น พลังงานที่เพิ่มขึ้นไม่ถ่ายเทไปที่ tank เนื่องจากข้อจำกัดของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตา • Thermal constraint

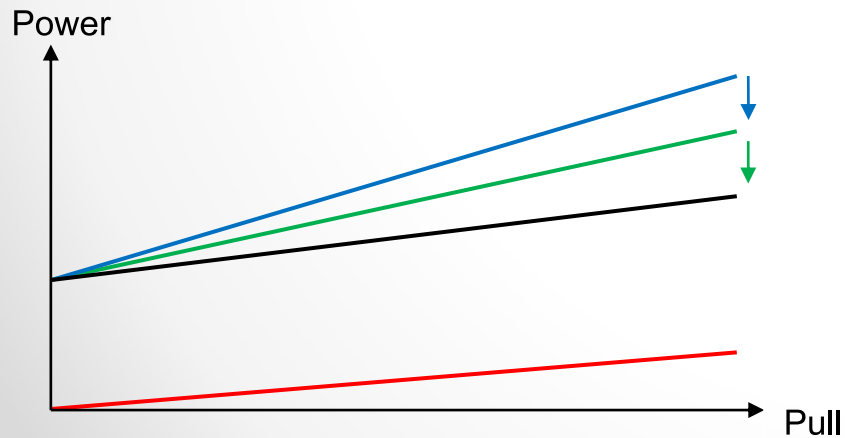
Case 1: $b - H_{ex} = 0$



Case 2: $0 < b - H_{ex} \leq b/2$



Case 3: $b - H_{ex} \geq b/2$



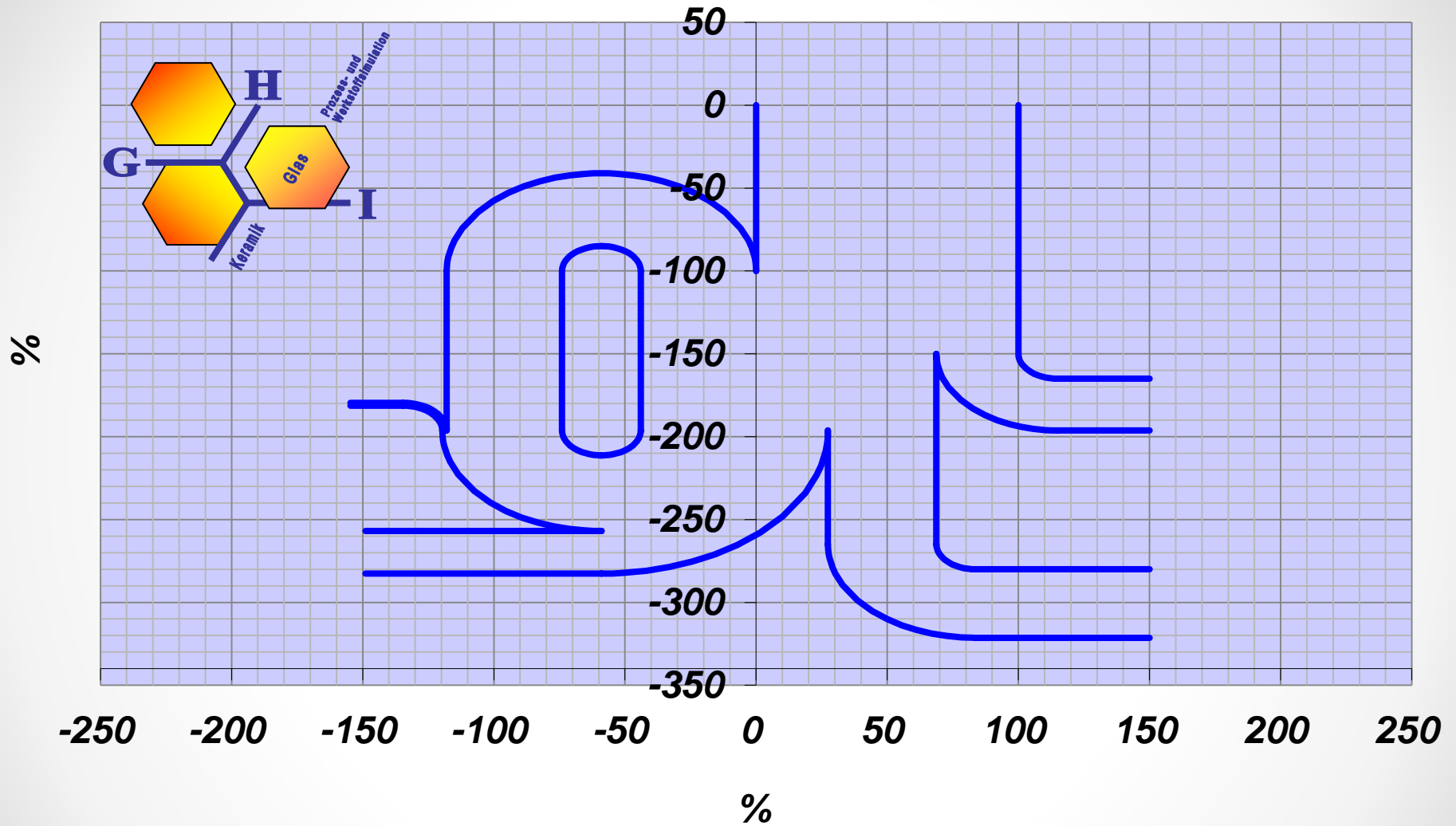
Case 1, 2: Chemical constraint

➤ Batch modification

Case 3: Thermal constraint

➤ Furnace modification

At a constant pull



THE END

Email: kanit@dss.co.th

Office tel. 02-201-7368

Mobile. 085-0700-939