



Open your mind. LUT.

Lappeenranta **University of Technology**



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Välitulistuksen teoriaa

Esa Vakkilainen
esa.vakkilainen@lut.fi

Miksi välitulistus ei kannattanut?



- Soodakattilayhdistyksen välitulistusprojektissa tutkittiin erilaisia tulevaisuuden soodakattilavaihtoehtoja
- Välitulistusvaihtoehto Case E ei tuottanut sähköä kirjoitakaan enempää kuin Paras perinteinen Case C

Tutkitut tapaukset



A. luonnonkierto 82 %, 490 °C, 9.0 MPa (Joutseno)

B. luonnonkierto 85 %, 505 °C, 10.2 MPa (Kymi)

C. luonnonkierto 85 %, 515 °C, 12.0 MPa (Yonago)

Tulevaisuuden kattila tapaus

D. avustettu kierto 85 %, 540 °C, 16.0 MPa (SoTu)

Välitulistus kattilat

E. luonnonkierto 85 %, 515/515 °C, 12.0/3.0 MPa (SkyRec)

F. läpivirtaus 85 %, 540/540 °C, 26.0/5.4 MPa (Skyrec+)



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology

Case		A	B	C	D		
Capacity	tds/d	5500	5500	5500	5500	5500	5500
capacity (virgin)	tds/d	5005	5005	5005	5005	5005	5005
Dry solids	%	82.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
ds (virgin)	%	80.6	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8
recycle ash	%	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
HHV	MJ/kgds	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00
LHV	MJ/kgds	12.28	12.28	12.28	12.28	12.28	12.28
O2 in dry flue gas	%	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Primary air percentage	%	23.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
Primary air temperature	°C	150.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Secondary air percentage	%	50.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0
Secondary air temperature	°C	120.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Tertiary air percentage	%	27.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Tertiary air temperature	°C	30.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Quartenary air percentage	%	0.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Quartenary air temperature	°C	30.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Total air temperature	°C	102.6	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Reduction	%	95.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00
Main steam pressure RB	bar(a)	91.0	102.0	120.0	160.0	105.0	260.0
Main steam temperature RB	°C	490.0	505.0	515.0	540.0	505.0	540.0
Main steam pressure PB	bar(a)	91.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0
Main steam temperature PB	°C	490.0	505.0	505.0	505.0	505.0	505.0
Feedwater pressure	bar(a)	110.0	121.0	146.0	182.0	290.0	290.0
Feedwater temperature	°C	120.0	148.0	148.0	148.0	148.0	148.0
		511.3	630.9	632.5	634.8	641.8	641.8
Reheater inlet pressure	bar(a)					36	56
Reheater inlet temperature	°C					348	337
Reheater outlet pressure	bar(a)					34	54
Reheater outlet temperature	°C					400	460
HP FWpreheater inlet temperature	°C	200	200	200	200	200	200
HP FWpreheater outlet temperatu	°C	200	200	220	220	220	220
Flue gas temperature (eco out)	°C	155	197	197	197	197	197
Flue gas temperature (to stack)	°C		155	155	155	155	155
Sootblowing	kg/s	6.0	6.0	6.0	6.0	8.0	8.0

14.6.2010

Esa K. Vakkilainen

5

Sähkön tuotanto (voimakattila mukana)



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Tapaus		A	B	C	D	E	F
Kapasitetti	tds/d	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Kuiva-aine	%	82.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
HP höyry	bar(a)	94.0	104.0	124.0	164.0	124.0	264.0
HP höyry	°C	490.0	505.0	515.0	540.0	515.0	540.0
Höyryvirtaus (SK)	kg/s	215.0	226.4	232.5	232.0	224.0	218.5
	%	0.0	5.3	8.1	7.9	4.1	1.6
Sellutehdas käyttö	MW	87.6	88.1	88.9	90.2	88.2	93.2
Tehtaan käyttö	MW	95.5	96.1	96.9	98.2	96.2	101.2
Sähkön tuotanto	MW	234.4	239.5	249.8	262.9	250.1	263.4
Sähkö myyntiin	MW	138.9	143.3	153.0	164.7	153.8	162.2
Hyötysuhde	%	23.2	23.1	24.1	25.4	24.1	25.4
Lisäsähkö	MW	0.0	4.4	14.0	25.8	14.9	23.2
	%	0.0	3.2	10.1	18.5	10.7	16.7

Sähkön tuotanto (ei voimakattilaa)



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Tapaus		A	B	C	D	E	F
Kapasitetti	tds/d	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Kuiva-aine	%	82.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
HP höyry	bar(a)	94.0	104.0	124.0	164.0	124.0	264.0
HP höyry	°C	490.0	505.0	515.0	540.0	515.0	540.0
Höyryvirtaus (SK)	kg/s	215.0	226.4	232.5	232.0	224.0	218.5
	%	0.0	5.3	8.1	7.9	4.1	1.6
Sellutehdas käyttö	MW	87.6	88.1	88.9	90.2	88.2	93.2
Tehtaan käyttö	MW	91.1	91.7	92.4	93.8	91.8	96.8
Sähkön tuotanto	MW	149.3	153.9	161.8	175.6	162.3	177.9
Sähkö myyntiin	MW	58.2	62.2	69.4	81.7	70.5	81.1
Hyötysuhde	%	20.4	20.4	21.4	23.2	21.5	23.5
Lisäsähkö	MW	0.0	4.0	11.2	23.6	12.3	22.9
	%	0.0	6.8	19.3	40.5	21.1	39.4

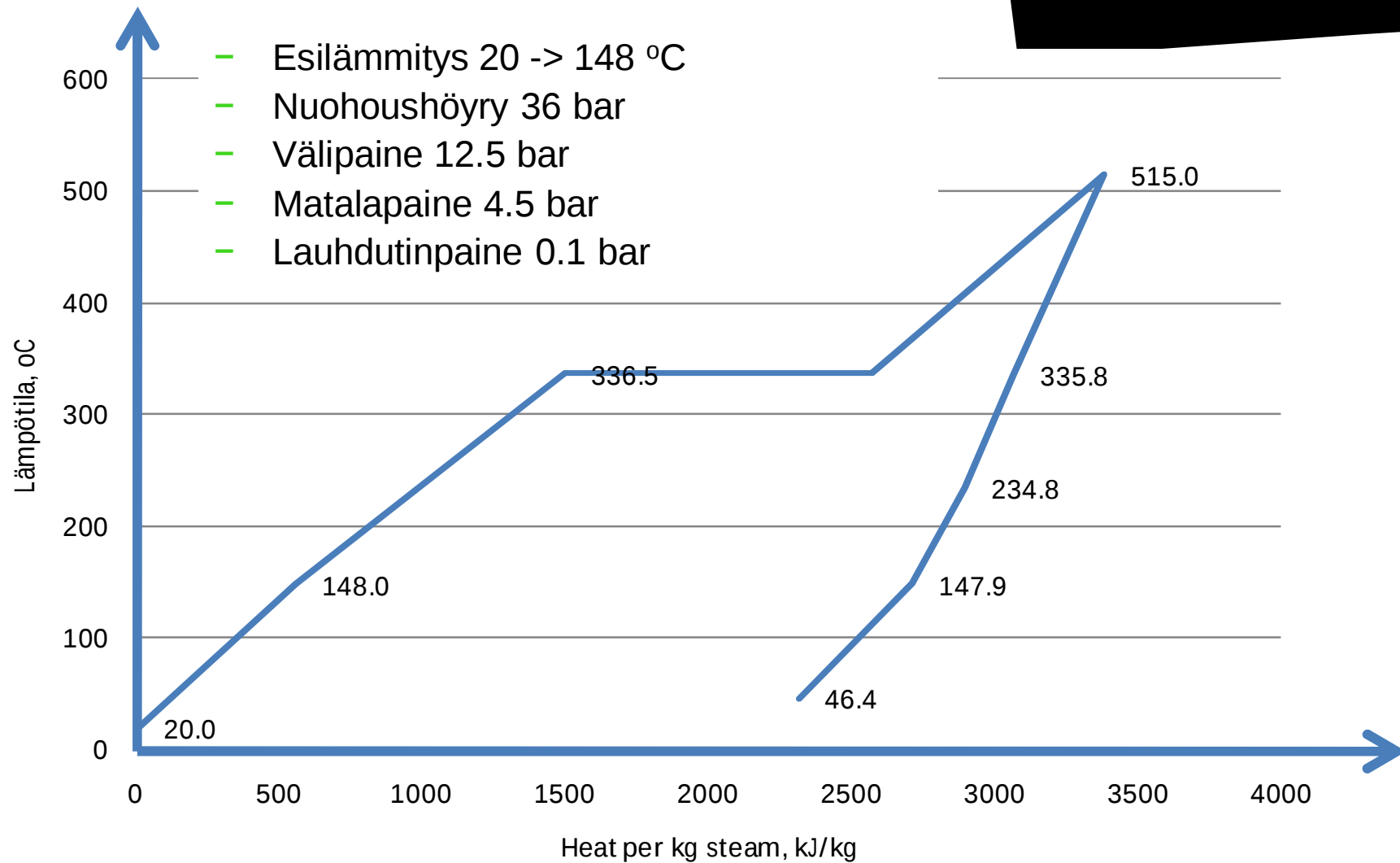
Soodakattila sähkönkäyttö



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Tapaus		A	B	C	D	E	F
Ilmapuhallin	kW	2275	2296	2296	2296	2296	2296
Savukaasupuh.	kW	2570	2534	2534	2534	2534	2534
SV-pumppu	kW	3055	3556	4347	5719	4187	8606
Muu käyttö	kW	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Yhteensä	kW	9401	9886	10677	12049	10518	14937

Kattilaprosessi – Case C



Turbiini – Case C

Savukaasu antaa lämpöä

$$3384.5 - 562.5 = 2822.0 \text{ kJ/kg}$$

Nuohoushöyry 36 bar

$$3384.5 - 3069.2 = 315.3 \text{ kJ/kg}$$

Välipainehöyry 12.5 bar

$$3384.5 - 2897.8 = 486.7$$

Matalapainehöyry 4.5 bar

$$3384.5 - 2714.9 = 669.6$$

Lauhdutin 0.1 bar

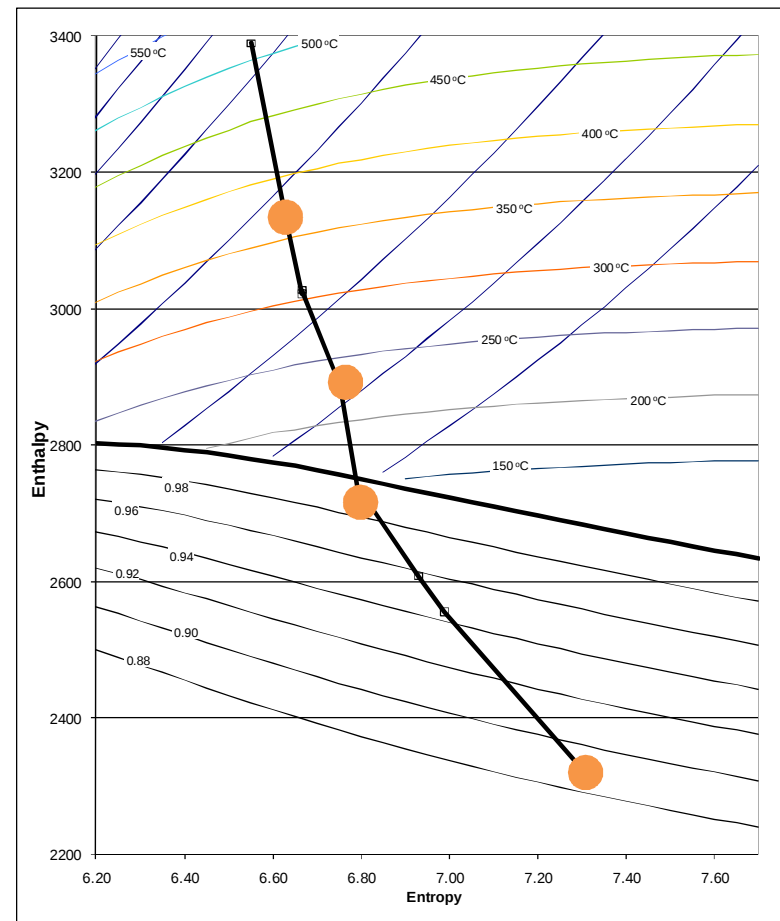
$$3384.5 - 2319.4 = 1065.1$$

11.2 %

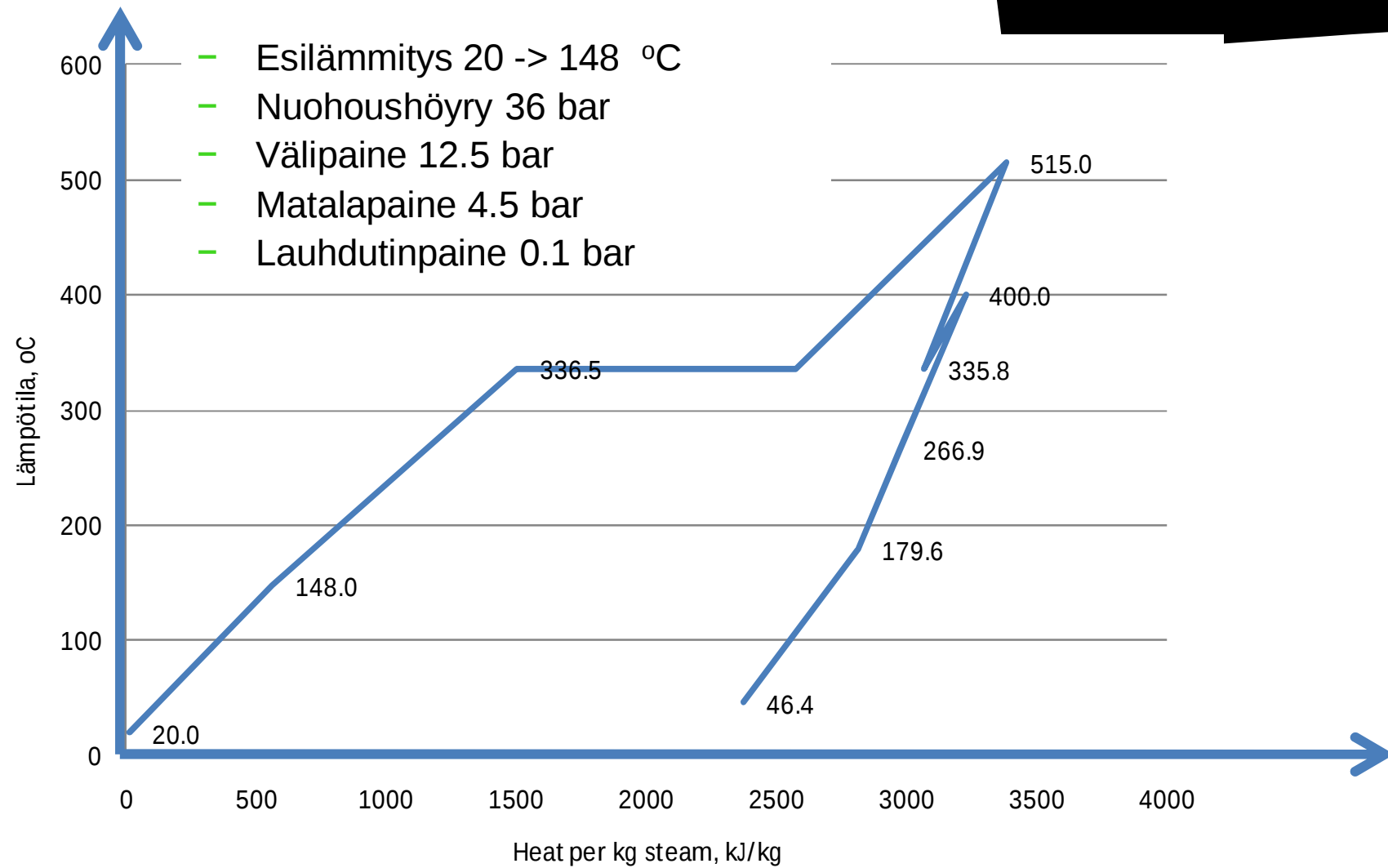
17.2 %

23.7 %

37.7 %



Kattilaprosessi – Case E



Turbiini – Case E



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Savukaasu antaa lämpöä

$$3384.5 - 562.5 + 3225.9 - 3099.1 = 2948.7 \text{ kJ/kg}$$

Nuohoushöyry 36 bar

$$3384.5 - 3069.2 = 315.3 \quad 11.2 \%$$

Välipainehöyry 12.5 bar

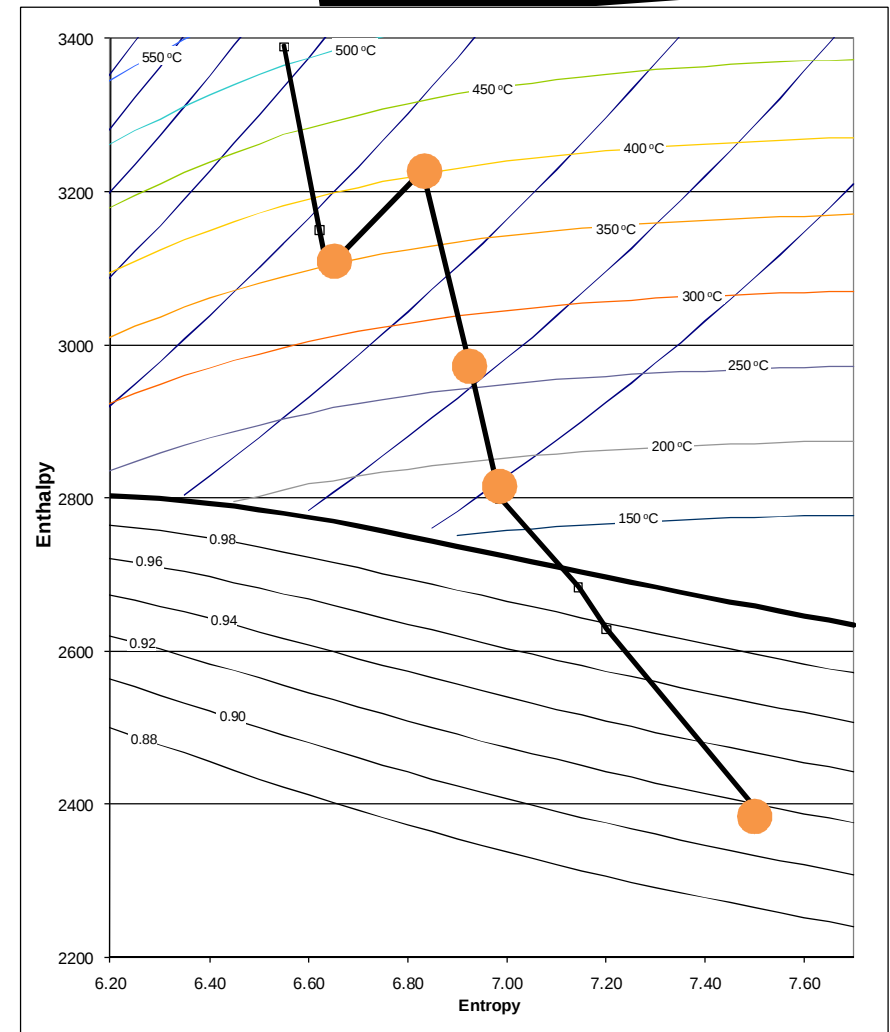
$$315.3 + 3225.9 - 2972.1 = 569.0 \quad 19.1 \%$$

Matalapainehöyry 4.5 bar

$$315.3 + 3225.9 - 2714.9 = 727.4 \quad 27.7 \%$$

Lauhdutin 0.1 bar

$$315.3 + 3225.9 - 2319.4 = 1168.2 \quad 41.0 \%$$



Vertailu jos voimalaitos



Voimalaitosprosessissa niin Case E että Case C kaikki höyry paisuu

Suora:

- Savukaasu antaa lämpöä $3384.5 - 562.5 = 2822.0 \text{ kJ/kg}$
- Sähköä lauhdutin 0.1 bar $3384.5 - 2319.4 = 1065.1 \text{ kJ/kg}$
- Jos höyryä 233.5 kg/s niin $233.5 * 1065.1 = 248.7 \text{ MW}$

Välitulistus:

- Savukaasu antaa lämpöä $3384.5 - 562.5 + 3225.9 - 3099.1 = 2948.7 \text{ kJ/kg}$
- Sähköä lauhdutin 0.1 bar $= 1168.2 \text{ kJ/kg}$
- Jos höyryä 221.8 kg/s* niin $221.8 * 1168.2 = 259.1 \text{ MW (+4.2 \%)}$

*Höyryä vähemmän koska välitulistus

Vertailu - lauhdeperä



Savukaasu antaa lämpöä saman verran sekä Case E että Case C.
Suurin osa höyrystä paisuu vain osan prosessista.
Tuotantoero paisuu kuitenkin lauhdutinpaineeseen.

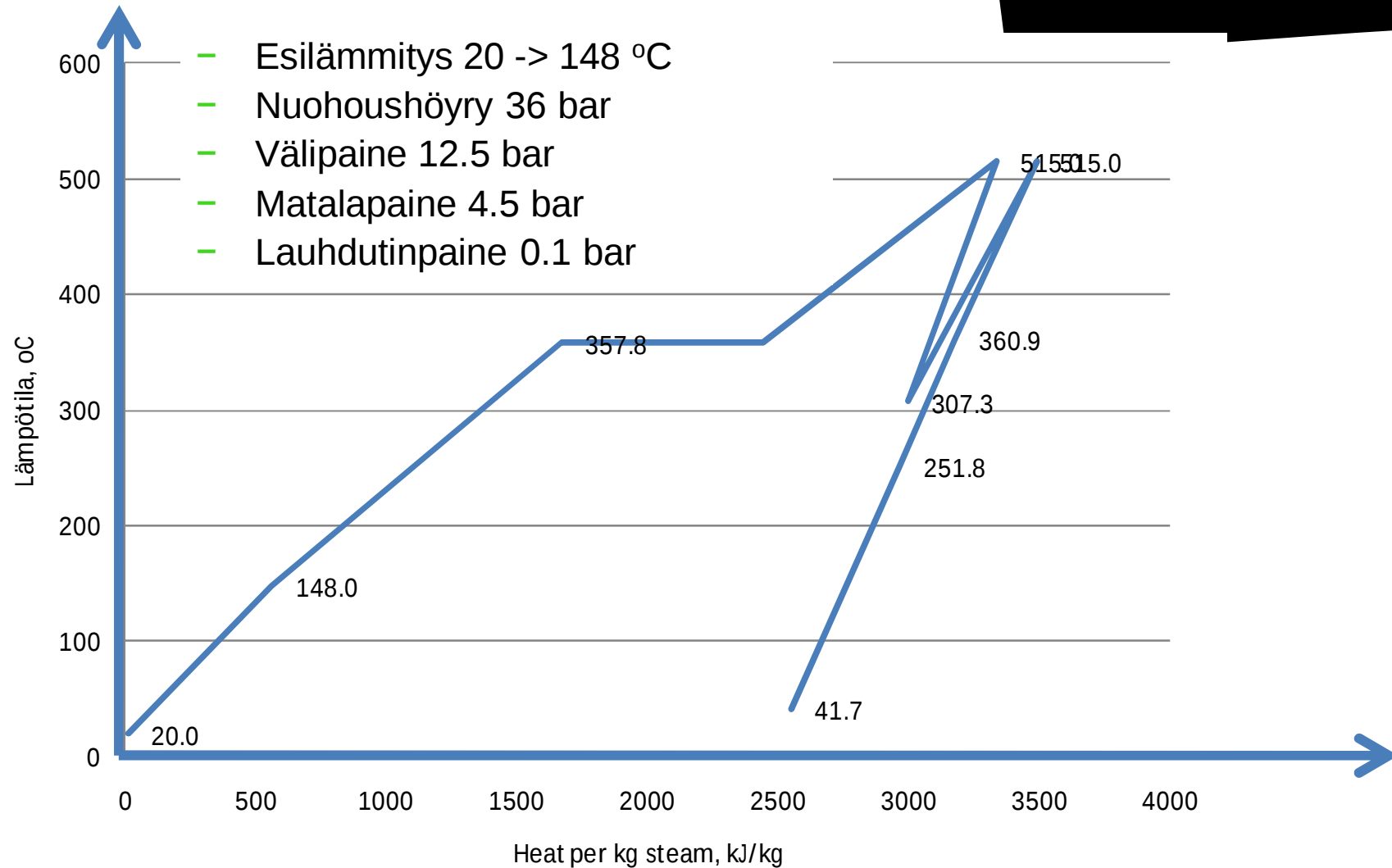
Paisunta	Höyryä		Energia		Sähköä	
	välitul.	suora	välitul.	suora	välitul.	suora
	kg/s	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	MW	MW
124-36	221.8	233.5	315.3	315.3	69.9	73.6
36-12.5	207.9	219.6	253.7	171.4	52.8	37.6
12.5-4.5	173.9	185.6	158.4	182.9	27.5	34.0
4.5-0.1	25.6	37.3	440.8	395.5	11.3	14.8
					161.5	160.0

*Vastapaineen takia lauhdeperään vain pieni virta

Kattilaprosessi – Case 515/515



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



Turbiini – Case 515/515



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Savukaasu antaa lämpöä

$$3384.5 - 562.5 + 3485.4 - 2995.4 = 3260.4 \text{ kJ/kg}$$

Nuohoushöyry 36 bar

$$3384.5 - 2995.4 = 340.0$$

12.3 %

Välipainehöyry 12.5 bar

$$340.0 + 3485.4 - 3177.0 = 648.4$$

30.3 %

Matalapainehöyry 4.5 bar

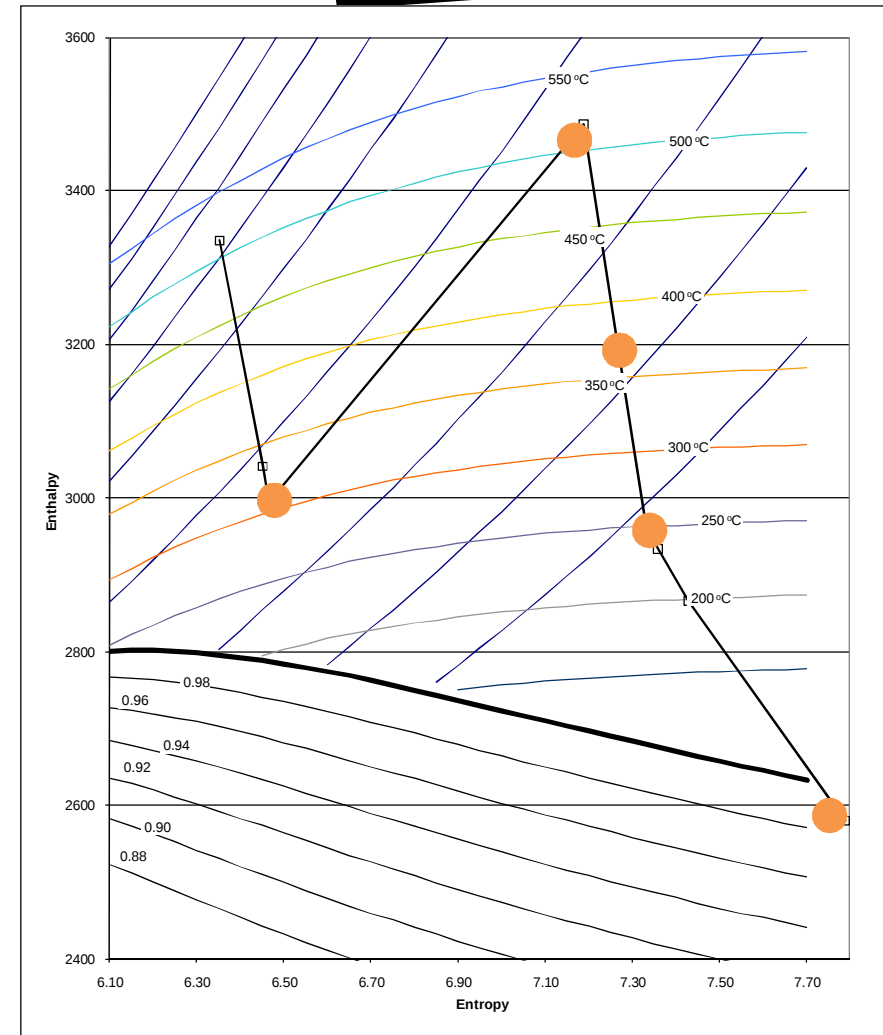
$$340.0 + 3485.4 - 2966.5 = 858.9$$

36.8 %

Lauhdutin 0.1 bar

$$340.0 + 3485.4 - 2552.3 = 1273.1$$

49.5 %



14.6.2010

Esa K. Vakkilainen

16

Vertailu – 515/515 lauhdeperä



Savukaasu antaa lämpöä saman verran; Case 515/515 Case C.

Suurin osa höyrystä paisuu vain osan prosessista.

Tuotantoero paisuu kuitenkin lauhdutinpaineeseen.

Paisunta	Höyryä		Energia		Sähköä	
	515/515	suora	515/515	suora	515/515	suora
	kg/s	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	MW	MW
164(124)-36	202.1	233.5	340.0	315.3	68.7	73.6
36-12.5	188.2	219.6	308.4	171.4	58.1	37.6
12.5-4.5	158.2	185.6	210.5	182.9	33.3	34.0
4.5-0.1	11.2	37.3	414.2	395.5	4.6	14.8
					164.7	160.0

*Vastapaineen takia lauhdeperään vain pieni virta

Vertailu – 515/515 vastapaine



Savukaasu antaa lämpöä saman verran; Case 515/515 Case C.

Suurin osa höyrystä paisuu vain osan prosessista.

Tuotantoero suuri jos integroitu tehdas.

Paisunta	Höyryä		Energia		Sähköä	
	515/515	suora	515/515	suora	515/515	suora
	kg/s	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	MW	MW
164(124)-36	202.1	233.5	340.0	315.3	68.7	73.6
36-12.5	188.2	219.6	308.4	171.4	58.1	37.6
12.5-4.5	158.2	185.6	210.5	182.9	33.3	34.0
4.5-0.1	0	0	414.2	395.5	0	14.8
					160.1	145.2

*Vastapaineen takia lauhdeperään vain pieni virta

Yhteenveto



- Välitulistusprosessissa merkittävästi parempi hyötysuhde kuin suorassa prosessissa
- Etua menetetään kun kaikki höyry ei lauhdutinajoa
- Termodynaamisesti olisi edullista ottaa ulosotot lähellä kylläistä käyrää esim. case 515/515 menetetään sähköä kun matalapainehöyry turbiinista lähellä 250 °C.
- Välitulistus olisi edullisempaa jos integroitu tehdas.
- Intergroidussa selvä ero sähköntuotannossa.
- Koska tuotettu sähkö on poissa höyrystä vaatii integroitu tehdas enemmän apukattilatehoa jos välitulistus joten myös sieltä lisää sähköä.