

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH  
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA i ENERGETYKI  
INSTYTUT MASZYN i URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH**

**Kocioł parowy I  
Kocioł parowy II**

**Laboratorium pomiarów maszyn ciepłych**

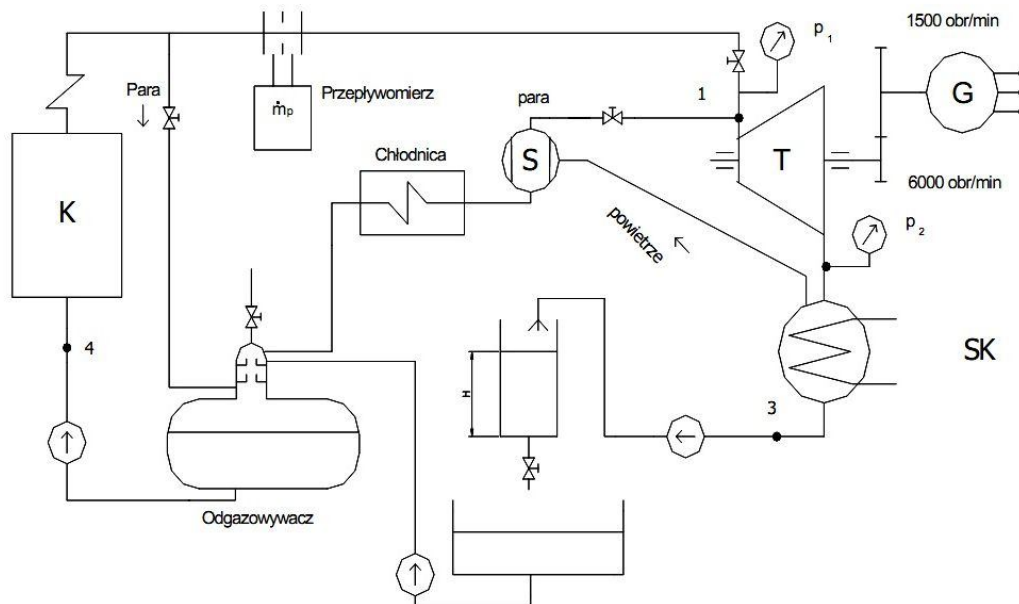
**PM – 9**

**PM – 10**

**Opracował: dr inż. Katarzyna Janusz-Szymańska  
Sprawdził: dr inż. Grzegorz Wiciak**

## 1. Opis instalacji technicznej

Badana siłownia cieplna znajduje się w Hali Maszyn Ciepłych Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki w Gliwicach. Zbudowana jest według schematu klasycznej siłowni kondensacyjnej - składa się z kotła, turbiny, generatora oraz chłodni kominowej. Zamontowanym kotłem jest kocioł typu Velox, analizowaną turbiną jest turbina parowa typu VGT - 15/12, natomiast generator jest produkcji firmy Mather & Platt Ltd. typ S14. Schemat instalacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1 Schemat instalacji siłowni cieplnej w budynku Hali Maszyn Ciepłych Politechniki Śląskiej

## 2. Cel i zakres badania kotła parowego "VELOX"

Badania dydaktyczne kotła, turbiny, generatora prowadzone w laboratorium Hali Maszyn Ciepłych umożliwiają studentom praktyczne poznanie podstawowych maszyn i urządzeń elektrowni cieplnej przez uczestniczenie w rozruchu i prowadzeniu ruchu tych maszyn, wykonanie pomiarów i sporządzenie bilansów energii.

## 3. Dane techniczne badanego kotła

Kocioł parowy typu VELOX

Producent BROWN BROWER

Ciśnienie robocze  $42 \text{ kg/cm}^2$  ( $42 \text{ at} = 41,19 \text{ bar} = 4,119 \text{ MPa}$ )

Ilość pary  $15 \text{ t/h}$

Rok produkcji - 1938

Temperatura znamionowa pary  $300^\circ\text{C}$

Paliwo - gaz  $\text{CH}_4$  o ciśnieniu  $0,28 \text{ MPa}$

## 4. Budowa i działanie kotła "VELOX"

Badany kocioł jest kotłem parowym produkującym parę przegrzaną o wydajności nominalnej  $15 \text{ Mg/h}$ . Początkowo kocioł ten był opalany olejem opałowym, następnie gazem miejskim, koksowniczym, jednak ostatecznie został on zaadaptowany do opalania gazem ziemnym.

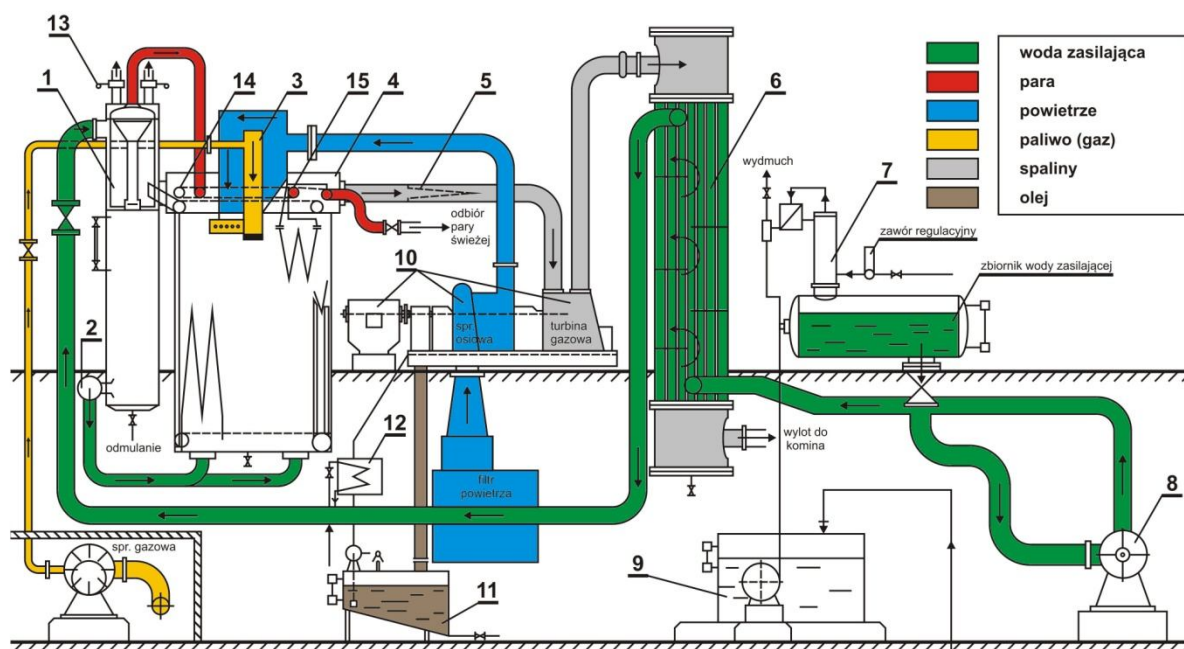
Na rys. 2 przedstawiona została sylwetka kotła.



Rys. 2 Kocioł typu Velox

Kocioł typu "Velox" obok podstawowego zadania jakim jest generacja pary realizuje obieg turbiny gazowej. W ciągu spalinowym kotła realizowany jest obieg turbiny gazowej, która napędza sprężarkę powietrza. Schemat zespołu kotłowego obrazuje rys. 3.

Komora paleniskowa kotła stanowi jednocześnie komorę spalania dla obiegu gazowego, dlatego panuje w niej odpowiednio wysokie ciśnienie - około 2,5 bar. W stropie komory paleniskowej umieszczony jest palnik gazowy (3). Komora paleniskowa ma kształt cylindra utworzonego przez opłomki ustawione na jej obwodzie, jedna przy drugiej. Opłomki mają średnicę 146 mm i wewnątrz umieszczone koncentrycznie płomieniówki o średnicy 110 mm, do których spaliny wpływają od dołu. Górą spaliny opuszczają płomieniówki i kierowane są do turbiny zespołu ładującego. Na turbinie (10) ulegają ekspansji i wykonują pracę, następnie wpływają do podgrzewacza wody (6). Po opuszczeniu podgrzewacza spaliny płyną do komina.



Rys. 3 Schemat zespołu kotłowego

- 1- Oddzielacz wody i pary; 2- Pompa przewałowa (obiegowa); 3- Palnik gazowy; 4- Kocioł z paleniskiem; 5- Sito przed turbiną gazową; 6- Podgrzewacz kondensatu; 7- Odgazowywacz; 8- Pompa zasilająca kocioł; 9- Zbiornik kondensatu; 10- Zespół ładujący; 11- Zbiornik i pompa olejowa; 12- Chłodnica olejowa; 13- Zawory bezpieczeństwa; 14- Pierścień zbiorczy pary przegrzanej; 15- Pierścień zbiorczy pary nasyconej.

Kocioł opalany jest gazem ziemnym z sieci miejskiej. Powietrze do spalania dostarczane jest przez sprężarkę wchodzącą w skład zespołu ładującego (10). Jest ona napędzana przez turbinę gazową. Cała moc turbiny gazowej jest zużywana do napędu sprężarki zespołu ładującego. Nadmiar mocy turbiny gazowej nad moc napędową sprężarki stanowi efekt pracy obiegu gazowego i jest zamieniany na energię elektryczną w generatorze napędzanym od wspólnego wału turbiny i sprężarki. Wyżej wspomniany generator może pracować zarówno jako prądnica i jako silnik. Jako silnik pracuje w fazie rozruchowej kotła.

Gaz zasilający palnik kotła pobierany jest z zewnętrznej sieci. Zanim jednak trafi do palnika, musi przejść przez zawór ręczny, zawór regulacji przepływu gazu i zawór doprowadzający gaz do palnika. Palnik zastosowany w kotle jest dwu-płomieniowy – rozpałkowego i zasadniczego płomienia.

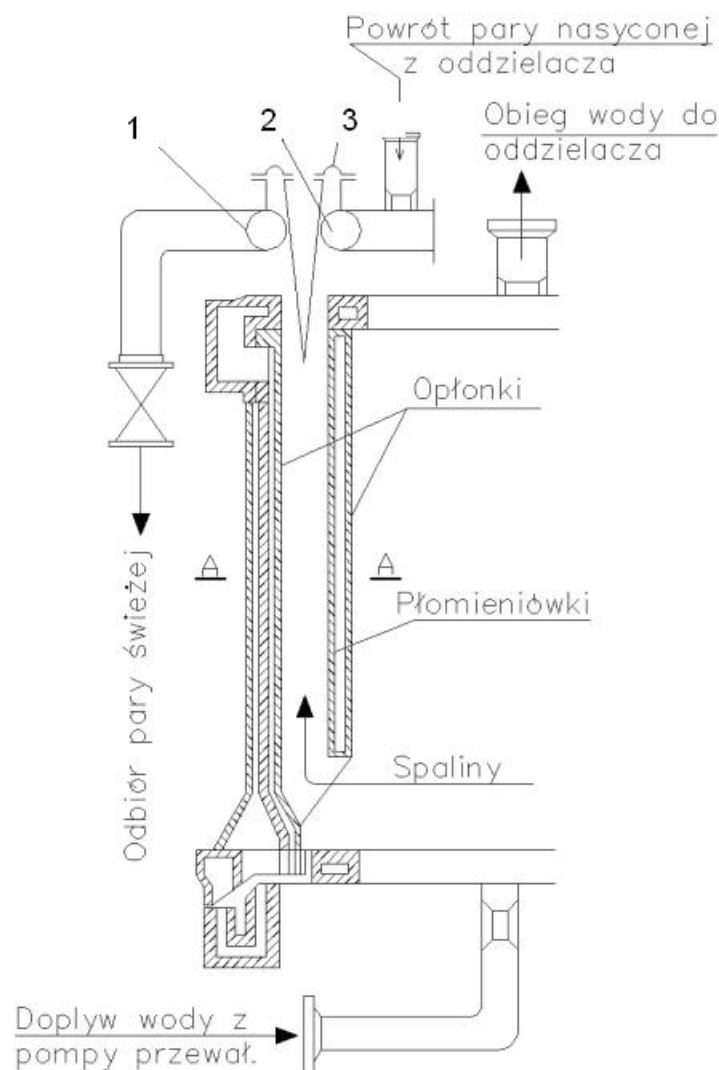
Kocioł "Velox" jest kotłem z wymuszonym obiegiem o parowniku za pomocą pompy przewałowej (2). Pompa ta zasysa wodę z separatora i tłoczy od dołu do opłomek. Mieszanka parowo-wodna powraca do separatora. Z uwagi na pionowe ustawienie separatora i wynikająca stąd małą powierzchnię rozdziału wody od pary zabudowano urządzenie cyklonowe. Para nasycona z separatora dopływa do kolektora zbiorczego i stąd wypływa do spiralnych rurek przegrzewacza parowego umieszczonych wewnątrz płomieniówek.

Kocioł zasilany jest kondensatem powracającym z turbiny parowej. Kondensat wraz z wodą uzupełniającą podawany jest do odgazowywacza (7). Odgazowana woda gromadzona jest w zbiorniku wody zasilającej i tłoczona przez pompy wody zasilającej (8) do kotła.

Pompa wody zasilającej (8) podaje czynnik, który przepływa przez podgrzewacz kondensatu (6) skąd trafia do walczaka (1). Pod walczakiem znajduje się pompa przewałowa (2) (pompa

wewnętrznego obiegu kotła), która pompuje wodę do kolektorów u góry paleniska. Woda zostaje rozprowadzona do płomienic, a następnie ponownie do walczaka (walczak – pompa – walczak). Para jest podawana do kolektorów parowych i do rurek przegrzewacza pary. W pierwszej kolejności nagrzewa się woda w rurce, potem w płomienicy. Z przegrzewacza para jest kierowana do turbiny, a po rozprężeniu w turbinie i skropleniu czynnik trafia do dolnego zbiornika, a stamtąd za pomocą pompy kierowany jest do zbiornika górnego. Jeśli woda zasilająca osiągnie około 100°C przepuszczana jest przez odgazowywacz. W walczaku regulowany jest poziom wody, jeśli staje się on zbyt niski, zawór regulujący jej poziom otwiera się. Możliwa jest także ręczna regulacja poziomu wody w walczaku.

Schemat obiegu wody w rurach płomienicowych obrazuje rys. 4.



Rys. 4 Schemat obiegu wody w rurach płomienicowych

1- Pierścień zbiorczy pary przegrzanej; 2- Pierścień zbiorczy pary nasyconej; 3- Przegrzewacz pary.

**5. Bilans kotła**  
**Obliczanie entalpii gazu**

Tabela pomiarowa I		Wartości obliczane		
Lp.	Przepływ gazu, m <sup>3</sup>	$\Delta\tau$ , s	$\Delta V$ , m <sup>3</sup>	$V_g$ , m <sup>3</sup> /s
1.	6362,40	0	-	-
2.	6364,34	180	1,96	0,0109
3.	6366,30	180	1,92	0,0107
4.	6368,22	180	1,78	0,099
5.	6372,14	180	2,14	0,0119
	Wartość średnia			0,0108

$$T_n = 273,15 \text{ K}$$

$$p_n = 0,101325 \text{ MPa}$$

$$T_g = 293,85 \text{ K}$$

$$p_g = 0,28 \text{ MPa}$$

$$\dot{n}_g = \dot{V}_g \cdot \frac{T_n \cdot p_g}{T_g \cdot p_n} \cdot \frac{1}{22,41}$$

$$\dot{n}_g = 0,0108 \cdot \frac{273,15 \cdot 0,28}{293,85 \cdot 0,101325} \cdot \frac{1}{22,41}$$

$$\dot{n}_g = 0,0012 \left[ \frac{\text{kmol} \cdot \text{pal.}}{\text{s}} \right]$$

Entalpia dewaluacji metanu:  $(MWd)_{CH_4} = 802,3 \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} \right]$

$$I_{ch} = \dot{n}_g \cdot (MWd)_{CH_4}$$

$$I_{ch} = 0,0012 \cdot 802,3$$

$$I_{ch} = 998,13 [\text{kW}]$$

Entalpia fizyczna gazu wynosi 0, gdyż dla gazów w temperaturze poniżej 25 °C (298,15 K) przyjmuje się, entalpię fizyczną równą 0.

$$I_f = 0$$

Strumień entalpii całkowitej wynosi:

$$I_g = I_{ch} + I_f$$

$$I_g = 998,13 + 0$$

$$I_g = 998,13 [\text{kW}]$$

### Strumień entalpii pary na wylocie z przegrzewacza

Obliczenia wykonujemy dla wartości średnich wyznaczonych w tabeli pomiarowej II. Obliczamy strumień masy skroplin wykorzystując pomiar przyrostu poziomu wody w zbiorniku mierniczym o znanych wymiarach oraz pomiar temperatury skroplin.

L.p.	Poziom wody w zbiorniku		Temp skroplin		Odstęp czasu $\Delta\tau$ [s]	$\Delta H$ [m]
	[cm]	[m]	$t_3$ [°C]	$T_3$ [K]		
1.	8,0	0,080	21	294,15	120	0,100
2.	18,0	0,180	22	295,15		
3.	27,0	0,270	22	295,15	120	0,100
4.	37,0	0,370	22	295,15		
5.	45,0	0,450	22	295,15	120	0,090
6.	54,0	0,540	22	295,15		
7.	64,0	0,640	22	295,15	120	0,120
8.	76,0	0,760	22	295,15		
9.	54,0	0,540	22	295,15	120	0,070
10.	61,0	0,610	22	295,15		
11.	67,5	0,675	22	295,15	120	0,065
12.	74,0	0,740	22	295,15		
13.	80,0	0,800	22	295,15	120	0,060
14.	86,0	0,860	22	295,15		

wartości średnie

295,03

0,103

odrzucono

Wymiary podstawy zbiornika:

$$a = 1,20 \text{ [m]}$$

$$b = 0,63 \text{ [m]}$$

Przyrost objętości wody w zbiorniku pomiarowym  $\Delta V_{SK}$ :

$$\Delta V_{SK} = a \cdot b \cdot \Delta H$$

$$\Delta V_{SK1} = 1,2 \cdot 0,63 \cdot 0,10 = 0,076 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$\Delta V_{SK2} = 1,2 \cdot 0,63 \cdot 0,10 = 0,076 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$\Delta V_{SK3} = 1,2 \cdot 0,63 \cdot 0,09 = 0,068 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$\Delta V_{SK4} = 1,2 \cdot 0,63 \cdot 0,12 = 0,091 \text{ [m}^3\text{]}.$$

Strumień skroplin  $\dot{V}_{SK}$ :

$$\dot{V}_{SK} = \frac{\Delta V_{SK}}{\Delta\tau}$$

$$\dot{V}_{SK1} = \frac{0,076}{120} = 0,00063 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right],$$

$$\dot{V}_{SK2} = \frac{0,076}{120} = 0,00063 \left[ \frac{m^3}{s} \right],$$

$$\dot{V}_{SK3} = \frac{0,068}{120} = 0,00057 \left[ \frac{m^3}{s} \right],$$

$$\dot{V}_{SK4} = \frac{0,091}{120} = 0,00076 \left[ \frac{m^3}{s} \right].$$

Średni strumień skroplin  $\dot{V}_{SK\bar{s}}$ :

$$\dot{V}_{SK\bar{s}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{SKi}}{n}$$

$$\dot{V}_{SK\bar{s}} = \frac{0,00063 + 0,00063 + 0,00057 + 0,00076}{4} = 0,00065 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Objętość właściwa wody (skroplin) odczytana z tablic dla temperatury średniej  $T_{sr} = 295,03[K]$  wynosi:

$$(v_w)_{T=295,03} = 0,0010022 \left[ \frac{m^3}{kg} \right],$$

natomiast gęstość:

$$(\rho_w)_{T=295,03} = 997,80 \left[ \frac{kg}{m^3} \right].$$

Strumień masy skroplin wynosi więc:

$$\dot{m}_{SK} = \rho_w \cdot \dot{V}_{SK}$$

$$\dot{m}_{SK} = 997,80 \cdot 0,00065$$

$$\dot{m}_{SK} = 0,644 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Ze względu na dużą niedokładność pomiaru strumienia skroplin wynikającą z przyjętej metody pomiaru przyjmujemy, że strumień skroplin wypływających ze skraplacza będzie równy strumieniowi pary dopływającej do turbiny:

$$\dot{m}_{SK} = \dot{m}_p$$

Stąd (po obliczeniach w następnym punkcie):

$$\dot{m}_{SK} = 0,2589 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$



## Obliczanie strumienia masy pary poprzez pomiar spadku ciśnienia na kryzie

TABELA POMIAROWA III							
Ciśnienie pary $p_1$ manometryczne		Temp pary $t_1$	Temp skroplin $t_3$	Ciśń. pary $p_{1k}$ przed kryzą manometr.		Różnica ciśnień na kryzie $\Delta H_k H_g$	Poziom wody w zbiorniku $\Delta H/\Delta t$ [m/s]
[kG/cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[°C]	[°C]	[kG/cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	H <sub>2</sub> O [mm]	
19,00	1,86	302	21	18	1,77	53	0,00083
18,20	1,79	302	22	18	1,77	54	
18,00	1,77	302	22	18	1,77	54	0,00083
18,00	1,77	301	22	18	1,77	54	
17,90	1,76	301	22	19	1,86	54	0,00075
17,90	1,76	301	22	21	2,06	54	
17,10	1,68	301	22	21	2,06	54	0,00100
19,90	1,95	300	22	19	1,86	54	
21,00	2,06	298	22	18	1,77	55	0,00058
22,00	2,16	298	22	17	1,67	54	
19,00	1,86	292	22	16	1,57	54	0,00054
17,50	1,72	289	22	15	1,47	54	
16,90	1,66	282	22	-	-	-	0,00050
15,90	1,56	279	22	-	-	-	
<b>ŚREDNIA</b>	1,84	298,92	21,9	18,17	1,78	54,00	0,00076

Obliczenia wykonano wg polskiej normy **PN-93/M-53950/01**.

Średnica wewnętrzna rurociągu:  $D = 100$  [mm]

Średnica kryzy:  $d = 67,5$  [mm]

Przewężenie kryzy  $\beta$ :

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$\beta = \frac{67,5}{100}$$

$$\beta = 0,675$$

Ciśnienie absolutne przed kryzą  $p_{1k,abs}$ :

$$p_{1k,abs} = p_{1k,man} + p_b$$

$$p_{1k,abs} = 1,78 + 0,101325 \quad (\text{przyjęto } p_b = p_n)$$

$$p_{1k,abs} \cong 1,88 [\text{MPa}]$$

Różnica ciśnień na kryzie  $\Delta p$ :

Do obliczeń przyjęto:

$$\rho_{Hg} = 13560 \left[ \frac{kg}{m^3} \right], \quad \rho_{H_2O} = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right], \quad g = 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right].$$

$$\Delta p = \Delta H_k \cdot g \cdot (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O})$$

$$\Delta p = 0,054 \cdot 9,81 \cdot (13560 - 1000)$$

$$\Delta p = 0,00665353 [\text{MPa}]$$

Temperatura pary przed kryzą  $T_{1,k} = 569,13\text{K}$  ( $295,98^\circ\text{C}$ ).

Dla tej wartości odczytano z tablic:

- Lepkość dynamiczna pary w temperaturze  $295,98^\circ\text{C}$

$$\mu_1 = 0,000022 [Pa \cdot s],$$

- Objętość właściwa pary (dla ciśnienia  $p_{1k,abs} = 1,88 \text{ MPa}$ )

$$v_1 = 0,14 \left[ \frac{m^3}{kg} \right],$$

- Gęstość pary

$$\rho_1 = 7,143 \left[ \frac{kg}{m^3} \right],$$

- Wykładnik izentropy pary w temperaturze  $295,98^\circ\text{C}$

$$\chi_1 = 1,3.$$

Współczynnik przepływu kryzy C:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^3 + 0,0029\beta^{2,5} \left[ \frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75} + 0,0900 \frac{L_1 \cdot \beta^4}{1 - \beta^4} - 0,0337L_2\beta^3$$

Liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy rurociągu  $Re_D$ :

$$Re_D = \frac{4 \cdot m_p}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D}$$

$$Re_D = \frac{4 \cdot 0,644}{3,14 \cdot 0,000022 \cdot 0,1}$$

$$Re_D = 330627,57$$

Ponieważ mamy przytarczowy odbiór ciśnienia, wartości  $L_1$  i  $L_2$  są równe zero.

Współczynnik przepływu kryzy w pierwszym przybliżeniu wynosi:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^3 + 0,0029\beta^{2,5} \left[ \frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75}$$

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot 0,675^{2,1} - 0,1840 \cdot 0,675^3 + 0,0029 \cdot 0,675^{2,5} \cdot \left[ \frac{10^6}{330627,57} \right]^{0,75}$$

$$C = 0,21$$

Liczba ekspansji  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{\chi_1 \cdot p_{1,k}}$$

$$\varepsilon_1 = 1 - 0,41 + (0,35 \cdot 0,0675^4) \cdot \frac{0,0066535}{1,3 \cdot 1,78}$$

$$\varepsilon_1 = 0,9953$$

Strumień masy pary:

$$\dot{m}_p = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

$$\dot{m}_p = \frac{0,21}{\sqrt{1 - 0,675^4}} \cdot 0,9953 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,0675^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,0066535 \cdot 10^6 \cdot 7,143}$$

$$\dot{m}_p = 0,2589 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

### Wyznaczenie entalpii pary świeżej (korzystamy z wykresu i - s dla pary )

Dla ciśnienia  $p_{1k,abs} = 1,88 \text{ MPa}$  i temperatury  $T_{1,k} = 569,13 \text{ K}$  ( $295,98^\circ\text{C}$ ) odczytano entalpię właściwą pary:

$$i_p = 3070 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Strumień entalpii pary świeżej  $\dot{I}_p$ ;

$$\dot{I}_p = \dot{m}_p \cdot i_p$$

$$\dot{I}_p = 0,2589 \cdot 3070$$

$$\dot{I}_p = 794,82 [\text{kW}]$$

### Stechiometria spalania

TABELA POMIAROWA IV				
L.p.	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]	λ [-]
1.	0,1520	2,9000	16,0100	4,4400
2.	0,1500	2,9000	16,0200	4,4450
3.	0,1500	2,9100	16,0300	4,4430
4.	0,0940	4,1500	13,9400	3,2000
5.	0,0800	4,3200	13,8600	3,1400
6.	0,0320	5,2700	12,1200	2,5600
7.	0,0300	5,3400	12,0900	2,5450
8.	0,0300	5,3400	12,1200	2,5550
9.	0,0500	4,7800	13,1300	2,8590
10.	0,0260	5,7700	11,3200	2,3400
11.	0,0280	6,5900	9,9900	2,0360
12.	0,0500	7,7600	7,9500	1,6980
<b>ŚREDNIA</b>	<b>0,0336</b>	<b>5,3000</b>	<b>12,1560</b>	<b>2,5718</b>

odrzucono

Skład spalin na wylocie z komory paleniskowej:

$$\dot{n}'_C = CH_4 = 1 \left[ \frac{\text{kmol}, C}{\text{kmol}, \text{g.s.}} \right],$$

$$\dot{n}'_{H_2} = 2CH_4 = 2 \left[ \frac{\text{kmol}, H_2}{\text{kmol}, \text{g.s.}} \right],$$

$$\dot{n}'_{O_{\min}} = \dot{n}'_C + 0,5\dot{n}'_{H_2} = 1 + 0,5 \cdot 2 = 2 \left[ \frac{\text{kmol}, O_2}{\text{kmol}, \text{g.s.}} \right],$$

$$\dot{n}'_{a_{\min}} = \frac{\dot{n}'_{O_{\min}}}{0,21} = \frac{2}{0,21} = 9,52 \left[ \frac{\text{kmol}, \text{pow}}{\text{kmol}, \text{g.s.}} \right],$$

$$\dot{n}'_a = \lambda \cdot \dot{n}'_{a_{\min}} = 2,5718 \cdot 9,52 = 24,49 \left[ \frac{\text{kmol}, \text{pow}}{\text{kmol}, \text{g.s.}} \right],$$

$$\dot{n}_a = \dot{n}'_g \cdot \dot{n}'_a = 0,0012 \cdot 24,49 = 0,0305 \left[ \frac{\text{kmol}, \text{pow.}}{s} \right],$$

**Bilans spalin:**

$$n''_{sw} = n''_{CO_2} + n''_{CO} + n''_{O_2} + n''_{N_2} + n''_{H_2O}$$

$$n''_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot n_{O_{min}} = (2,5718 - 1) \cdot 2 = 3,1436 \left[ \frac{kmol, O_2}{kmol, g.s.} \right],$$

$$n''_{H_2O} = n'_{H_2} = 2 \left[ \frac{kmol, H_2O}{kmol, g.s.} \right],$$

$$n''_{N_2} = 0,79 n'_a = 0,79 \cdot 24,49 = 19,35 \left[ \frac{kmol, N_2}{kmol, g.s.} \right],$$

$$n''_{sw} = \frac{n''_{O_2}}{(O_2)} = \frac{3,1436}{\frac{12,1560}{100}} = 25,86 \left[ \frac{kmol, s.w}{kmol, g.s.} \right],$$

$$n''_{CO} = n''_{sw} \cdot (CO) = 25,84 \cdot \frac{0,0336}{100} = 0,0087 \left[ \frac{kmol, CO}{kmol, g.s.} \right],$$

$$n''_{CO_2} = n''_{sw} \cdot (CO_2) = 25,84 \cdot \frac{5,3}{100} = 1,3706 \left[ \frac{kmol, CO_2}{kmol, g.s.} \right].$$

Cząstkowe strumienie gazów spalinowych:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_g \cdot n''_i$$

$$\dot{n}_{O_2} = \dot{n}_g \cdot n''_{O_2} = 0,0012 \cdot 3,1436 = 0,0039 \left[ \frac{kmol, O_2}{s} \right],$$

$$\dot{n}_{N_2} = \dot{n}_g \cdot n''_{N_2} = 0,0012 \cdot 19,35 = 0,0241 \left[ \frac{kmol, N_2}{s} \right],$$

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_g \cdot n''_{H_2O} = 0,0012 \cdot 2 = 0,0024 \left[ \frac{kmol, H_2O}{s} \right],$$

$$\dot{n}_{CO} = \dot{n}_g \cdot n''_{CO} = 0,0012 \cdot 0,0087 = 0,0000108 \left[ \frac{kmol, CO}{s} \right],$$

$$\dot{n}_{CO_2} = \dot{n}_g \cdot n''_{CO_2} = 0,0012 \cdot 1,3706 = 0,0017 \left[ \frac{kmol, CO_2}{s} \right].$$

**Entalpie cząstkowe gazów spalinowych**

TABELA POMIAROWA V							
L.p.	Temp. spalin za paleniskiem [°C]	Temp. spalin przed turbiną gazową [°C]	Temp. spalin za turbiną gazową [°C]	Temp. powietrza przed dmuchawą [°C]	Temp. powietrza za dmuchawą [°C]	Temp. spalin za podgrzewaczem [°C]	Temp. pary za kotłem [°C]
1.	267	238	243	21	32	95	282
2.	263	236	242	21	32	96	273
3.	283	248	252	21	32	96	300
4.	288	254	260	21	32	95	309
5.	291	257	262	21	33	92	306
6.	299	263	267	21	33	92	313
7.	305	297	271	21	33	90	320
8.	309	271	274	21	33	90	328
<b>ŚREDNIA</b>	288,125	258	258,9	21	32,5	93,25	303,875

Entalpie cząstkowe wyznacza się z tablic dla poszczególnych składników gazów spalinowych, przy czym entalpia całkowita dla CO jest sumą entalpii fizycznej i chemicznej. Dla pozostałych składników entalpię całkowitą stanowi entalpia fizyczna. Cząstkowe entalpie fizyczne wyznaczamy dla średniej temperatury spalin przed turbiną gazową  $T_{sp2}$ .

$$T_{sp2} = 531,15[K]$$

$$(Mi)_{O_2}|_0^T = 7802 \left[ \frac{kJ}{kmol, O_2} \right],$$

$$(Mi)_{N_2}|_0^T = 7566 \left[ \frac{kJ}{kmol, N_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO_2}|_0^T = 10626 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO}|_0^T = 7598 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(Mwd)_{CO} = 282984 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(Mi)_{H_2O}|_0^T = 8881 \left[ \frac{kJ}{kmol, H_2O} \right].$$

Jednostkowy strumień entalpii spalin przed turbiną gazową :

$$\dot{i}_{sp2}'' = n_{O_2}'' (Mi)_{O_2}|_0^T + n_{N_2}'' (Mi)_{N_2}|_0^T + n_{CO_2}'' (Mi)_{CO_2}|_0^T + n_{CO}'' [(Mi)_{CO}|_0^T + (Mwd)_{CO}] + n_{H_2O}'' (Mi)_{H_2O}|_0^T$$

$$\dot{i}_{sp2}'' = 0,0039 \cdot 7802 + 0,0241 \cdot 7566 + 0,0017 \cdot 10626 + 0,0000108 \cdot (7598 + 282984) + 0,0024 \cdot 8881$$

$$\dot{i}_{sp2}'' = 205777 \left[ \frac{kJ}{kmol, g.s} \right]$$

Strumień entalpii spalin przed turbiną gazową :

$$\dot{I}_{sp2} = \dot{n}_g \cdot \dot{i}_{sp2}''$$

$$\dot{I}_{sp2} = 0,0012 \cdot 205777$$

$$\dot{I}_{sp2} = 256[kW]$$

Strumień entalpii powietrza przy temperaturze  $T_{pow} = 305,15K$  :

$$(Mi)_{pow.} = 945 \left[ \frac{kJ}{kmol, pow.} \right]$$

$$\dot{I}_{pow.} = \dot{n}_a \cdot (Mi)_{pow.}$$

$$\dot{I}_{pow.} = 0,0305 \cdot 945$$

$$\dot{I}_{pow.} = 28,81[kW]$$

### Bilans zespołu ładującego

Strumień entalpii spalin na wylocie z turbiny gazowej dla temperatury  $T_{sp3} = 532,05 K$ :

$$(Mi)_{O_2}|_0^T = 7831 \left[ \frac{kJ}{kmol, O_2} \right],$$

$$(Mi)_{N_2}|_0^T = 7593 \left[ \frac{kJ}{kmol, N_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO_2}|_0^T = 10667 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO}|_0^T = 7625 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(MWd)_{CO} = 282984 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(Mi)_{H_2O}|_0^T = 8913 \left[ \frac{kJ}{kmol, H_2O} \right].$$

Jednostkowy strumień entalpii spalin za turbiną gazową :

$$\dot{i}_{sp_3}'' = n_{O_2}'' (Mi)_{O_2}|_0^T + n_{N_2}'' (Mi)_{N_2}|_0^T + n_{CO_2}'' (Mi)_{CO_2}|_0^T + n_{CO}'' [(Mi)_{CO}|_0^T + (MWd)_{CO}] + n_{H_2O}'' (Mi)_{H_2O}|_0^T$$

$$\dot{i}_{sp_3}'' = 0,0039 \cdot 7831 + 0,0241 \cdot 7593 + 0,0017 \cdot 10667 + 0,0000108 \cdot (7625 + 282984) + 0,0024 \cdot 8913$$

$$\dot{i}_{sp_3}'' = 206511 \left[ \frac{kJ}{kmol, g.s} \right]$$

$$\dot{I}_{sp_3} = \dot{n}_g \cdot \dot{i}_{sp_3}''$$

$$\dot{I}_{sp_3} = 0,0012 \cdot 206511$$

$$\dot{I}_{sp_3} = 257[kW]$$

Strumień entalpii powietrza na wlocie do dmuchawy:

Średnia temperatura na wlocie do dmuchawy wynosi:  $T_D = 294,15K$

$$\dot{I}_D = \dot{n}_a \cdot (Mi)_{1+X_a}$$

$$(Mi)_{1+X_a} = (Mi)_{pow}|_0^{T_{pow}} + X_a \cdot (Mi)_{H_2O}|_0^{T_{pow}}$$

$$X_a = 0 \text{ więc: } (Mi)_{1+X_a} = (Mi)_{pow}|_0^{T_{pow}}$$

$$(Mi)_{pow}|_0^{T_{pow}} = 610 \left[ \frac{kJ}{kmol, pow.} \right]$$

$$(Mi)_{1+X_a} = 610 \left[ \frac{kJ}{kmol, pow.} \right]$$

$$\dot{I}_D = \dot{n}_a \cdot (Mi)_{1+X_a}$$

$$\dot{I}_D = 0,0305 \cdot 610$$

$$\dot{I}_D = 18,59[kW]$$

### Bilans podgrzewacza wody

Średnia temperatura spalin na wylocie z podgrzewacza wody  $T_{sp4} = 366,4 K$ .

$$(Mi)_{O_2}|_0^T = 2761 \left[ \frac{kJ}{kmol, O_2} \right],$$

$$(Mi)_{N_2}|_0^T = 2719 \left[ \frac{kJ}{kmol, N_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO_2}|_0^T = 3586 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO_2} \right],$$

$$(Mi)_{CO}|_0^T = 2723 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(MWd)_{CO} = 282984 \left[ \frac{kJ}{kmol, CO} \right],$$

$$(Mi)_{H_2O}|_0^T = 3152 \left[ \frac{kJ}{kmol, H_2O} \right].$$

Jednostkowy strumień entalpii spalin za podgrzewaczem wody :

$$\dot{i}_{sp_4}'' = n_{O_2}'' (Mi)_{O_2}|_0^T + n_{N_2}'' (Mi)_{N_2}|_0^T + n_{CO_2}'' (Mi)_{CO_2}|_0^T + n_{CO}'' [(Mi)_{CO}|_0^T + (MWd)_{CO}] + n_{H_2O}'' (Mi)_{H_2O}|_0^T$$

$$\dot{i}_{sp_4}'' = 0,0039 \cdot 2761 + 0,0241 \cdot 2719 + 0,0017 \cdot 3586 + 0,0000108 \cdot (2723 + 282984) + 0,0024 \cdot 3152$$

$$\dot{i}_{sp_4}'' = 74992 \left[ \frac{kJ}{kmol, g.s} \right]$$

$$\dot{I}_{sp_4} = \dot{n}_g \cdot \dot{i}_{sp_4}''$$

$$\dot{I}_{sp_4} = 0,0012 \cdot 74992$$

$$\dot{I}_{sp_4} = 93[kW]$$

Strumień entalpii wody zasilającej na wlocie do podgrzewacza wody :

Średnia temperatura spalin na wylocie z podgrzewacza wody  $T_w = 365K$ .

$$i_w = 384,73 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\dot{I}_w = i_w \cdot m_{sk}$$

$$\dot{I}_w = 384,73 \cdot 0,2589$$

$$\dot{I}_w = 99,6[kW]$$

### Sprawność kotła brutto

$$\eta_K = \frac{\dot{I}_p - \dot{I}_w}{\dot{I}_g + \dot{I}_{pow}}$$

$$\eta_K = \frac{794,82 - 99,6}{998,13 + 28,81}$$

$$\eta_K = 0,68$$

### 6. Opracowanie wyników pomiarów

- Wypełnić tabele pomiarowe.
- Sporządzić bilans energii.
- Wyznaczyć sprawność kotła

### 7. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Stronę tytułową (nazwę ćwiczenia, numer sekcji, nazwiska i imiona ćwiczących oraz datę wykonania ćwiczenia).
- Dane znamionowe badanego układu.
- Schemat układu pomiarowego.
- Tabele wyników pomiarowych i obliczenia.
- Uwagi i wnioski.