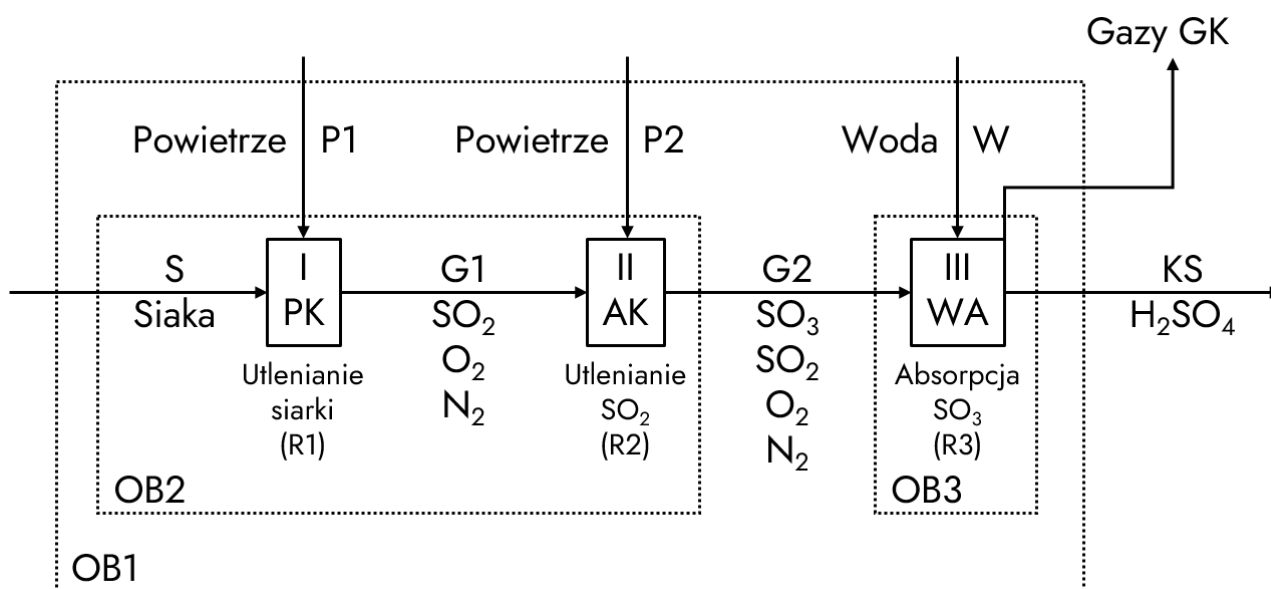


Produkcja kwasu siarkowego(VI) z siarki

Proces wytwarzania kwasu siarkowego(VI) z siarki przebiega zgodnie ze schematem instalacji, który w uproszczonej postaci przedstawiono na rys. 1. Proces ten składa się z następujących operacji:

- Utlenianie (spalanie) siarki w strumieniu powietrza w piecu **PK** (oddział I): $S + O_2 = SO_2$
- Utlenianie SO_2 w reaktorze katalitycznym **AK** (oddział II): $SO_2 + 0,5 O_2 = SO_3$
- Absorpcja SO_3 w H_2O w absorberze **WA** (oddział III): $SO_3 + H_2O = H_2SO_4$



Rysunek 1: Schemat instalacji stosowanej do wytwarzania kwasu siarkowego(VI) z siarki. Oddział I - utleniania siarki, oddział II - utlenianie SO_2 , oddział III - absorpcja SO_3 ; znaczenie symboli w tekście

Stosowane oznaczenia

1. $W[S]$, $W[SO_2]$, $W[SO_3]$, $W[H_2SO_4]$, $W[O_2]$, $W[N_2]$, $W[pow]$ i $W[H_2O]$ - molow natężenie przepływu strumieni dla poszczególnych reagentów [kmol/h]
2. $G[H_2SO_4]$, $G[H_2O]$ i $G[KS]$ - masowe natężenie przepływu strumieni poszczególnych reagentów [kg/h]

Założenia

1. Proces wytwarzania kwasu siarkowego(VI) z siarki prowadzi się w instalacji, której uproszczony schemat przedstawiono na rys. 1. W instalacji prowadzonej w trybie ciągłym proces przebiega w warunkach stacjonarnych. Produktem jest roztwór kwasu siarkowego(VI) o stężeniu 96% mas. H_2SO_4 wytwarzany w ilości 12 000 kg/h (strumień **KS**).
2. W piecu **PK** prowadzi się reakcję utleniania S, w której strumień doprowadzanej siarki S ulega całkowitemu przetworzeniu w ditlenek siarki. Do pieca **PK** doprowadza się strumień osuszonego powietrza **P1** o składzie [mol/mol]: O_2 - 0,21; N_2 - 0,79. Z pieca **PK** doprowadza się strumień gazów **G1** o składzie [mol/mol]: SO_2 - 0,12; O_2 - 0,09; N_2 - 0,79.
3. Strumień gazów **G1** kieruje się do reaktora katalitycznego **AK**, w którym prowadzi się reakcję utleniania SO_2 , uzyskując końcowy stopień przemiany SO_2 w SO_3 $x = 0,98$.
4. W celu regulacji temperatury w złożu katalizatora, do reaktora **AK** doprowadza się strumień osuszonego powietrza **P2**, którego wielkość $W_{P2}[\text{pow}] = 0,5W_{P1}[\text{pow}]$.
5. Strumień gazów **G2** odprowadzany z reaktora **AK** zawierający SO_2 , SO_3 , O_2 i N_2 kieruje się do absorbera **WA**, w którym następuje całkowite przetworzenie SO_3 w H_2SO_4 . SO_2 pozostaje w gazach kominowych **GK** odprowadzanych z instalacji.

Potrzebne dane - masy molowe

- S - 32 kg/kmol
- SO_2 - 64 kg/kmol
- H_2SO_4 - 98 kg/kmol

Cel zadania

Należy obliczyć wielkość i skład strumieni w instalacji wytwarzającej kwas siarkowy(VI) z siarki zgodnie ze schematem (rys. 1) i przedstawić ogólny bilans masy tego procesu.

Podstawa bilansu

Podstawa bilansu Natężenie strumienia **KS** zawierającego roztwór kwasu siarkowego(VI) o stężeniu 96% mas. H_2SO_4 , który odprowadza się z instalacji $G_{KS} = 12\,000\text{ kg/h}$

Rozwiązanie

Całkowity bilans strumieni masy w procesie wytwarzania kwasu siarkowego(VI) obejmuje pierwiastkowe bilanse siarki, tlenu, wodoru i azotu w instalacji produkcyjnej (obszar bilansowania **OB1**, rys. 1).

Wytwarzany strumień produktu **KS** składa się z kwasu siarkowego(VI) i wody. Wielkość i skład strumienia **KS** wynika z podstawy bilansu i założenia 1.

Strumień kwasu siarkowego(VI)

$$G_{KS}[H_2SO_4] = 12000 \cdot 0,96 = 11520 \text{ kg/h} \quad \text{co odpowiada} \quad W_{KS}[H_2SO_4] = 117,6 \text{ kmol/h} \quad (1)$$

Strumień wody:

$$G_{KS}[H_2O] = 12000 \cdot 0,04 = 480 \text{ kg/h} \quad \text{co odpowiada} \quad W_{KS}[H_2O] = 26,7 \text{ kmol/h} \quad (2)$$

Pierwiastkowy bilans siarki [S]

Siarka doprowadzana do instalacji w strumieniu **S** (obszar **OB1**) utlenia się w piecu **PK** do ditlenku siarki (założenie 2), który następnie utlenia się do tritlenku siarki w reaktorze **AK** (obszar **OB2**). W reaktorze **AK** uzyskuje się stopień przemiany SO_2 w SO_3 $x = 0,98$ (założenie 3). Strumień tritlenku siarki wytworzony w reaktorze **AK** jest w całości przetwarzany w kwas siarkowy(VI) w absorberze **WA** (obszar **OB3**). Ditlenek siarki znajdujący się w strumieniu gazów **G2** opuszczających reaktor **AK** odprowadza się z instalacji w gazach kominowych **GK**, a zatem wielkość strumienia SO_2 w gazach kominowych jest taka sama, jak w strumieniu **G2** odprowadzanym z reaktora **AK**. Można ją obliczyć na podstawie założonego stopnia przemiany SO_2 w SO_3 w tym reaktorze. Tritlenek siarki zawarty w strumieniu **G2** jest w całości przetwarzany w kwas siarkowy(VI) (założenie 5), dlatego korzystając z wyniku (1), można obliczyć natężenie strumienia $W_{G2}[SO_3]$:

$$W_{G2}[SO_3] = W_{KS}[H_2SO_4] = 117,6 \text{ kmol/h} \quad (3)$$

Z założonej wielkości stopnia przemiany SO_2 w reaktorze **AK** ($x = 0,98$) wynika natężenie $W_{G1}[SO_2]$:

$$W_{G1}[SO_2] = W_{G2}[SO_3] \cdot \frac{1}{0,98} = 117,6 \cdot \frac{1}{0,98} = 120 \text{ kmol/h} \quad (4)$$

Siarka doprowadzana do pieca **PK** zostaje w całości przetworzona i odprowadzana w postaci SO_2 (założenie 2), dlatego strumienie $W_S[S]$ i $W_{G1}[SO_2]$ mają jednakową wielkość:

$$W_S[S] = W_{G1}[SO_2] = 120 \text{ kmol/h} \quad (5)$$

Wielkość strumienia SO_2 w gazach kominowych wynika z różnicy:

$$W_{GK}[SO_2] = W_S[S] - W_{KS}[H_2SO_4] = 2,4 \text{ kmol/h} \quad (6)$$

Na podstawie wyniku 6 i założonego składu strumienia gazów **G1** odprowadzanych z pieca **PK** (założenie 2) można obliczyć wielkość składowych strumienia **G1**:

$$W_{G1} = W_{G1}[\text{SO}_2] \cdot \frac{1}{0,12} = 1000 \text{ kmol/h} \quad (7)$$

Skład strumienia **G1**:

$$W_{G1}[\text{SO}_2] = 120 \text{ kmol/h} \quad (8)$$

$$W_{G1}[\text{O}_2] = 1000 \cdot 0,9 = 90 \text{ kmol/h} \quad (9)$$

$$W_{G1}[\text{N}_2] = 1000 \cdot 0,79 = 790 \text{ kmol/h} \quad (10)$$

Tablica 1: Pierwiastkowy bilans siarki [S] w obszarze **OB1**

Przychód			Rozchód		
Strumień [S]	kmol/h	kg/h	Strumień [S]	kmol/h	kg/h
S [siarka]	120	3840	KS [H ₂ SO ₄]	117,6	3763
			GK SO ₂	2,4	77
Suma przychodu	120	3840	Suma rozchodu	120	3840

Pierwiastkowy bilans wodoru [H]

W odprowadzanym z instalacji strumieniu **KS** znajduje się wodór będący składnikiem kwasu siarkowego(VI) i wody [wyniki 1 i 2].

Strumień wodoru [H] zawartego w kwasie siarkowym(VI):

$$2W_{KS}[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2 \cdot 117,6 = 235,2 \text{ kmol/h} \quad (11)$$

Strumień wodoru [H] zawartego w wodzie rozcieńczającej:

$$2W_{KS}[\text{H}_2\text{O}] = 2 \cdot 26,7 = 53,4 \text{ kmol/h} \quad (12)$$

Całkowita ilość wodoru [H] zawarta w strumieniu **KS**:

$$W_{KS}[\text{H}] = 235,2 + 53,4 = 288,6 \text{ kmol/h} \quad (13)$$

Doprowadzany do instalacji wodór jest zawarty w strumieniu wody (**W**) kierowanym do absorbera **WA**. Wielkość strumienia wody wynika z bilansu wodoru:

$$W_W[\text{H}_2\text{O}] = 0,5W_{KS}[\text{H}] = 144,3 \text{ kmol/h} \quad (14)$$

Tablica 2: Pierwiastkowy bilans siarki [H] w obszarze **OB1**

Przychód			Rozchód		
Strumień [H]	kmol/h	kg/h	Strumień [H]	kmol/h	kg/h
W [H ₂ O]	288,6	288,6	KS [H ₂ SO ₄]	235,2	235,2
			KS H ₂ O	53,4	53,4
Suma przychodu	288,6	288,6	Suma rozchodu	288,6	288,6

Pierwiastkowy bilans tlenu [O]

Na podstawie składu strumienia **G1** kierowanego z pieca **PK** do reaktora **AK** i wielkości strumienia siarki S doprowadzanej do pieca **PK** [wynik 5] można obliczyć wielkość strumieni składników zawierających tlen. Do reaktora **AK** wprowadza się strumień gazów **G1** o natężeniu 1000 kmol/h [wynik 7] i o składzie wynikającym z założenia 2: SO₂ - 0,12; O₂ - 0,09; N₂ - 0,79 [mol/mol]. Na tej podstawie można obliczyć wielkości poszczególnych składników strumienia **G1** [wyniki 4 oraz 8-10].

Do pieca **PK** doprowadza się strumień powietrza **P1** zawierający tlen i azot. Skład tego strumienia wynika ze składu strumienia **G1** [wyniki 8-10]:

$$W_{P1}[O_2] = W_{G1}[O_2] + W_{G1}[SO_2] = 210 \text{ kmol/h} \quad (15)$$

$$W_{P1}[N_2] = W_{G1}[N_2] = 790 \text{ kmol/h} \quad (16)$$

$$W_{P1} = W_{P1}[O_2] + W_{P1}[N_2] = 1000 \text{ kmol/h} \quad (17)$$

W celu regulacji temperatury reagentów do reaktora **AK** doprowadza się dodatkowy strumień powietrza **P2** o natężeniu $W_{P2} = 0,5 \cdot W_{P1} = 500 \text{ kmol/h}$

Strumień ten zawiera:

$$W_{P2}[O_2] = 0,21 \cdot W_{P2} = 105 \text{ kmol/h} \quad (18)$$

$$W_{P2}[N_2] = 0,79 \cdot W_{P2} = 395 \text{ kmol/h} \quad (19)$$

Do absorbera **WA** doprowadza się strumień wody **W**, którego wielkość wynika z bilansu wodoru [wynik 13]:

$$W_W[O_2] = W_{KS}[H] = 288,6 \text{ kmol/h} \quad (20)$$

$$W_W[H_2O] = 0,5W_W[H] = 144,36 \text{ kmol/h} \quad (21)$$

Do instalacji (obszar **OB1**) doprowadza się następujące strumienie zawierające tlen:

- strumień **P1** doprowadzany do pieca **PK**: $W_{P1}[O_2] = 210 \text{ kmol/h}$ [wynik 15]
- strumień **P2** doprowadzany do reaktora **AK**: $W_{P2}[O_2] = 105 \text{ kmol/h}$ [wynik 18]
- strumień **W** doprowadzany do absorbera **WA**: $W_W[H_2O] = 144,3 \text{ kmol/h}$ [wynik 21]

Całkowita ilość tlenu [O] doprowadzanego do instalacji:

$$W[O] = 2W_{P1}[O_2] + 2W_{P2}[O_2] + W_W[H_2O] = 774,3 \text{ kmol/h} \quad (22)$$

Strumienie odprowadzane z instalacji (obszar OB1), w których znajduje się tlen:

- strumień tlenu [O] zawarty w produkowanym kwasie siarkowym(VI) [wynik 1]:

$$4W_{KS}[H_2SO_4] = 4 \cdot 117,6 = 470,4 \text{ kmol/h} \quad (23)$$

- strumień tlenu [O] zawarty w wodzie rozcieńczającej [wynik 2]:

$$W_{KS}[H_2O] = 26,7 \text{ kmol/h}$$

- w gazach kominowych **GK** odprowadza się SO_2 w ilości

$$W_{GK}[SO_2] = 2,4 \text{ kmol/h}$$

w którym strumień tlenu [O] jest równy 4,8 kmol/h.

Nieprzetworzony w toku procesu tlen zostaje odprowadzony z instalacji w strumieniu gazów kominowych **GK**. Strumień tlenu $W_{GK}[O_2]$ można obliczyć na podstawie pierwiastkowego bilansu tlenu [O] przez porównanie strony przychodu i rozchodu

$$2W_{P1}[O_2] + 2W_{P2}[O_2] + W_W[H_2O] = 2W_{GK}[O_2] + 4W_{KS}[H_2SO_4] + W_{KS}[H_2O] + 2W_{GK}[SO_2]$$

Z tego równania wynika wielkość strumienia tlenu zawartego w gazach kominowych

$$W_{GK}[O_2] = 136,2 \text{ kmol/h} \quad (24)$$

Tablica 3: Pierwiastkowy bilans siarki [O] w obszarze **OB1**

Przychód			Rozchód		
Strumień [O]	kmol/h	kg/h	Strumień [O]	kmol/h	kg/h
P1 [pow.]	420	6720	KS [H ₂ SO ₄]	470,4	7526
P2 [pow.]	210	3360	KS H ₂ O	26,7	427
P2 [pow.]	144,3	2310	GK SO ₂	4,8	77
			GK O ₂	272,4	4360
Suma przychodu	774,3	12390	Suma rozchodu	774,3	12390

Pierwiastkowy bilans azotu [N₂] w obszarze **OB1**

We wszystkich strumieniach w instalacji azot występuje w postaci niezwiązanej. Jest wprowadzany w strumieniach powietrza **P1** i **P2**. Odprowadza się go w strumieniu gazów kominowych **GK**. Równanie bilansowe azotu ma postać:

$$W_{P1}[N_2] + W_{P2}[N_2] = W_{GK}[N_2]$$

$$W_{P1}[N_2] = 790 \text{ kmol/h}$$

$$G_{P1}[N_2] = 22120 \text{ kg/h}$$

$$W_{P2}[N_2] = 395 \text{ kmol/h}$$

$$G_{P1}[N_2] = 11060 \text{ kg/h}$$

Suma przychodu:

$$W_{P1}[N_2] + W_{P2}[N_2] = 1185 \text{ kmol/h}$$

$$G_{P1}[N_2] + G_{P2}[N_2] = 33180 \text{ kg/h}$$

Suma rozchodu:

$$W_{GK}[N_2] = 1185 \text{ kmol/h}$$

$$G_{GK}[N_2] = 33180 \text{ kg/h}$$

Ogólny bilans instalacji (obszar **OB1**)

Przychód

Siarka

$$W_S[S] = 120 \text{ kmol/h} \quad \text{czyli: } 3840 \text{ kg/h}$$

Powietrze (P1 + P2) w tym:

tlen: $6720 + 3360 = 10080$ kg/h

azot: $22120 + 11060 = 33180$ kg/h

Suma tlenu i azotu: 43 260 kg/h

Woda: 2600 kg/h

Suma przychodu: 49700 kg/h

Rozchód

Kwas siarkowy(VI) (96% H_2SO_4): 12000 kg/h (podstawa bilansu)

Gazy kominowe 37 700 kg/g

Składniki gazów kominowych:

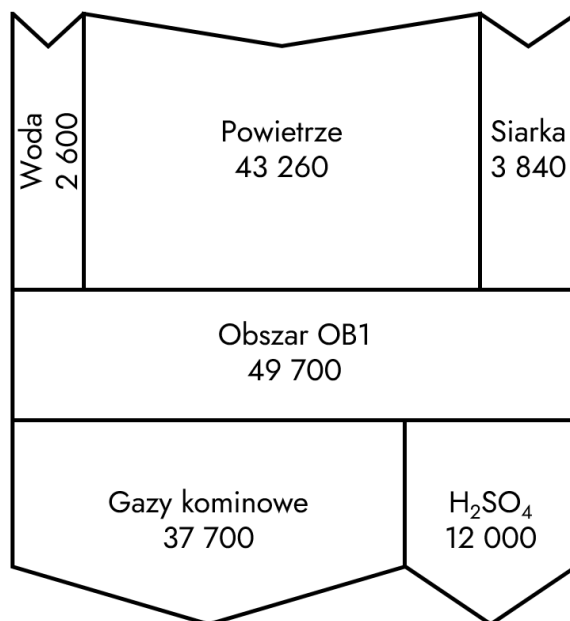
azot: 33180 kg/h

tlen: 4360 kg/h

SO_2 : 154 kg/h

Suma rozchodu: 49700 kg/h

Ogólny bilans instalacji został przedstawiony na wykresie strumieniowym (rys. 2). Rozbieżność między całkowitymi wielkościami przychodu i rozchodu wynika ze stosowanej dokładności obliczeń strumieni masy (1 kg/h). Wielkości przedstawione na wykresie strumieniowym podano z dokładnością do 10 kg/h.



Rysunek 2: Wykres strumieniowy przedstawiający ogólny bilans instalacji stosowanej do wytwarzania kwasu siarkowego(VI) z siarki. Wielkość strumieni podano z dokładnością do 10 kg/h