



AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

PROJEKT INŻYNIERSKI

IMIĘ i NAZWISKO: RZESZUTEK MATEUSZ

Nr albumu: 220619

KIERUNEK: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

KATEDRA: KSZTAŁTOWANIA I OCHRONY ŚRODOWISKA

TYTUŁ PROJEKTU: OPTIMALIZACJA WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH EMITORA
(WYBRANYM ZAKRESIE)

TYTUŁ PROJEKTU (w języku angielskim): EMITTER GEOMETRY OPTIMIZATION
(IN A SELECTED RANGE)

OPIEKUN PROJEKTU: dr inż. ROBERT OLENIACZ

Ocena projektu:

.....
Podpis Opiekuna projektu

Kraków, 2011 r.

Niniejszy projekt wykonałam/-em/ osobiście, nie korzystałam/-em/ ze źródeł innych, niż wymienione w tekście. Przedstawiony projekt nie był wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam, świadoma/-y/ odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że zaliczyłam/-em/ wszystkie przedmioty na studiach pierwszego stopnia i uzyskałam/-am/ średnią ocenę z okresu studiów (semestr 1 do 7)

.....
data

.....
czytelny podpis studenta

STRESZCZENIE

Celem niniejszego projektu było dobranie optymalnych wymiarów wysokości i średnicy emitora dla instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych. Czynniki decydującymi o wyborze wymiarów emitora są: strumień objętości spalin, wpływ emisji substancji pyłowych i gazowych na jakość powietrza atmosferycznego i liniowe straty ciśnienia w emitorze.

W projekcie wykonano następujące obliczenia: objętość spalin powstających w wyniku prowadzonego procesu, stopnia redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych, strumienia objętości spalin, wielkość emisji substancji gazowych i pyłowych, rozprzestrzenia zanieczyszczeń gazowych wybranych substancji, liniowych strat ciśnienia w przewodzie emitora. Na podstawie uzyskanych wyników, stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem dla instalacji unieszkodliwiania odpadów komunalnych jest emitor o wymiarach $h = 80$ m i $d = 2,6$ m.

SUMMARY

The aim of this project was match the optimal dimensions of height and diameter of the emitter for the installation of thermal transformation of public waste . Determining factors for choosing the dimensions of the emitter are: volume flow of gas, influence of emission dust and gaseous substances on air quality and line trading loss in emitter.

In the project were made the following calculations: exhaust gas volume resulting from the guided process, the flow volume of exhaust emissions, the reduction factor of gaseous missions, amount emission of dust and gaseous substances, spreading of gaseous pollutants selected substances, linear loss of pressure in the emitter. On the basis of the obtained results, it was found that the best solution for disposal installation of public waste would be the emitter with dimensions $h = 80$ diameter = 2.6 m.

Spis treści

1. CEL PROJEKTU	3
2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA WYNIESIENIE GAZÓW ODLOTOWYCH PONAD WYLOT EMITORA	4
3. ZAŁOŻENIA I ZAKRES PROJEKTU	9
4. OBLICZENIE OBJĘTOŚCI SPALIN POWSTAJĄCY PODCZAS PROCESU TERMICZNEGO PRZEKSZTAŁCANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH.....	12
4.1 METODYKA OBLICZANIA OBJĘTOŚCI SPALIN W WARUNKACH UMOWNYCH..	12
4.2 OBLICZENIA OBJĘTOŚCI SPALIN W WARUNKACH UMOWNYCH	16
5. OBLICZENIE OBJĘTOŚCI GAZÓW ODLOTOWYCH PO PROCESIE OCZYSZCZANIA SPALIN.....	17
5.1 METODYKA WYKONYWANIA OBLICZEŃ OBJĘTOŚCI GAZÓW ODLOTOWYCH PO PROCESIE OCZYSZCZANIA SPALIN	17
5.2 WYNIKI OBLICZEŃ OBJĘTOŚCI SPALIN OCZYSZCZONYCH	19
6. OBLICZENIE STRUMIENIA OBJĘTOŚCI SPALIN.....	20
7. OBLICZENIE ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI GAZU W PRZEWODZIE ORAZ OKREŚLENIE WARIANTÓW EMITORA.....	22
8. OKREŚLENIE EMISJI SUBSTANCJI PYŁOWYCH I GAZOWYCH	24
9. ZESTAWIENIE I ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZPRZESTRZENIANIA SUBSTANCJI GAZOWYCH I PYŁOWYCH W POWIETRZU	28
9.1 ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZPRZESTRZENIA ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH I PYŁOWYCH	29
9.2 ANALIZA ZMIENNOŚCI MAKSYMALNEGO STĘŻENIA SUBSTANCJI GAZOWEJ W POWIETRZU W OKREŚLONEJ SYTUACJI METEOROLOGICZNEJ	34
9.3 ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW OBLICZEŃ ROZPRZESTRZENIANIA ZANIECZYSZCZEŃ SUBSTANCJI PYŁOWYCH I GAZOWYCH W POWIETRZU.....	40

10. WYZNACZENIE LINIOWYCH STRAT CIŚNIENIA DLA WYBRANYCH WARIANTÓW EMITORA	47
10.1 METODYKA OBLICZANIA LINIOWYCH STRAT HYDRAULICZNYCH.....	47
10.2 WYNIKI OBLICZEŃ ORAZ ANALIZA STRAT CIŚNIENIA ROZPATRYWANYCH WARIANTÓW	49
11. PODSUMOWANIE	51
LITERATURA:.....	53
PROGRAMY KOMPUTEROWE:	54
SPIS WYKRESÓW	55
SPIS TABEL.....	56
ZAŁĄCZNIKI:.....	58

1. Cel projektu

Celem niniejszego projektu było dobranie optymalnych wymiarów geometrycznych emitora dla instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych. Optymalizacja wymiarów geometrycznych polegała na dobraniu wysokości oraz średnicy emitora. Czynnikiem decydującymi o wyborze optymalnych wymiarów emitora są: strumień objętości powstających spalin, wpływ emisji substancji pyłowych i gazowych na jakość powietrza atmosferycznego i liniowe starty ciśnienia w emitorze.

2. Czynniki wpływające na wyniesienie gazów odlotowych ponad wylot emitora

Wyniesienie gazów odlotowych Δh zależy w głównej mierze od emisji ciepła Q , prędkości wylotowej gazów v oraz prędkości wiatru na wysokości wylotu z emitora u_h . W zależności od wartości emisji ciepła Q oraz prędkości wiatru na wysokości wylotu z emitora przyjmuje się różne metody wykonywania obliczeń wyniesienia gazów odlotowych. W tabeli 2.1 zestawiono wzory, według których przeprowadza się obliczenia wyniesienia gazów odlotowych ponad wylot emitora. Uwzględniono również zakresy emisji ciepła i prędkości wiatru na wysokości wylotu substancji pyłowych i gazowych z emitora. Natomiast obliczenia emisji ciepła Q [kJ/s] wykonuje się na podstawie poniższego wzoru [9]:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v \cdot C_p \cdot \frac{273,16}{T} \cdot (T - T_0) \quad (2.1)$$

gdzie:

d – średnica wewnętrzna emitora [m],

v – prędkość gazów odlotowych na wylocie z emitora [m/s],

C_p – ciepło właściwe gazów odlotowych przy stałym ciśnieniu
(w metodyce referencyjnej $C_p = 1,3$) [kJ/(m³·K)],

T – temperatura gazów odlotowych na wylocie z emitora [K],

T_0 – średnia temperatura powietrza dla okresu obliczeniowego [K].

Analiza zestawionych wzorów w tabeli 2.1. wykazuje, że wraz z wzrostem emisji ciepła Q wzrasta wysokość wyniesienia gazów odlotowych. Zależność tą przedstawiono na wykresie 2.1. przy założeniu stałej wysokości emitora $h = 120$ m, średnicy $d = 4$ m, prędkości gazów odlotowych $v = 10$ m/s, temperatury gazów odlotowych $T = 100$ °C i ciepła właściwego gazów odlotowych $C_p = 1,3$ kJ/(m³·K). Stosunek wysokości wyniesienia gazów odlotowych Δh do wartości emisji ciepła Q ulega zmianie w obrębie stosowania danej formuły obliczeniowej. Wartości ww. stosunku w odniesieniu do równoczesnego wzrostu emisji ciepła i wysokości wyniesienia gazów odlotowych ponad wylot emitora ulega zwiększeniu przy zastosowaniu metody kombinacji formuły Hollanda i CONCAWE. W przypadku zastosowania pozostałych dwóch metod wartość stosunku Δh do Q ulega stopniowemu zmniejszeniu [4, 9].

Wyniesienia gazów odlotowych zależy pośrednio od wartości średniej temperatury powietrza dla okresu obliczeniowego T_0 , temperatury gazów odlotowych na wylocie z emitora T . Wzrost średniej temperatury powietrza dla okresu obliczeniowego powoduje obniżenie wartości emisji ciepła, a w konsekwencji obniżenie wysokości wyniesienia gazów odlotowych. Natomiast wzrost temperatury gazów odlotowych przy wylocie z emitora wykazuje reakcję odwrotną w stosunku do temperatury otoczenia [9].

Tabela 2.1. Zestawienie wzorów, na podstawie których wykonuje się obliczenia wysokości wyniesienia gazów odlotowych ponad wylot z emitora (opracowanie własne na podstawie [9])

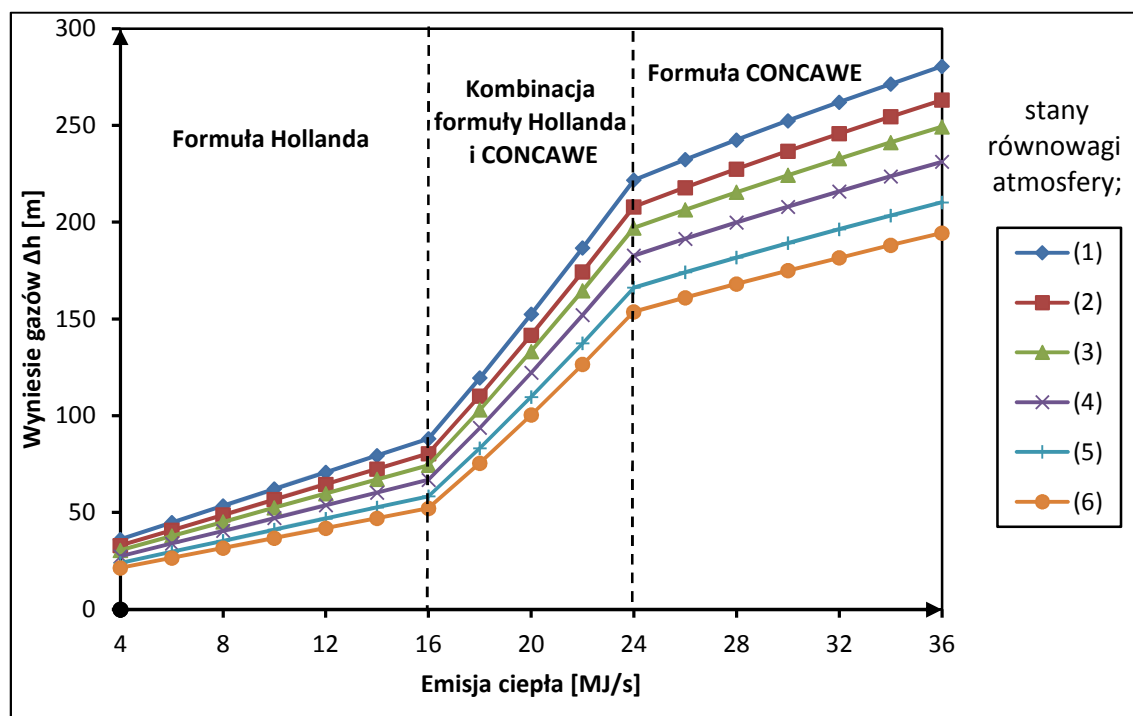
Emisja ciepła Q [kJ/s]	Prędkość wylotowa gazów v [m/s]	Wyniesienie gazów odlotowych Δh [m]	Formuła
$0 \leq Q \leq 16\ 000$	$v \leq 0,5 u_h$	$\Delta h = \Delta h_H^1 = 0$	Hollanda
	$0,5 u_h \leq v \leq u_h$	$\Delta h = \Delta h_H = \frac{1,5 \cdot v \cdot d \cdot 0,00974 \cdot Q}{u_h}$	
	$v \geq u_h$	$\Delta h = \Delta h_H = \frac{1,5 \cdot v \cdot d \cdot 0,00974 \cdot Q}{u_h} \cdot \frac{v - 0,5 u_h}{0,5 u_h}$	
$Q \geq 24\ 000$	-	$\Delta h = \Delta h_C^2 = \frac{1,26 \cdot Q^{0,58}}{u_h^{0,7}}$	CONCAWE
$Q > 16\ 000$ i $Q < 24\ 000$	-	$\Delta h = \Delta h_H \cdot \frac{24000 - Q}{8000} + \Delta h_C \cdot \frac{Q - 16000}{8000}$	Kombinacja formuł Hollanda i CONCAWE

Kolejnym czynnikiem wpływającym na wyniesienie gazów odlotowych jest stan równowagi atmosferycznej. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i emisją ciepła Q dla wszystkich stanów równowagi atmosferycznej przy założonej prędkości wiatru $v = 1$ m/s przedstawiono na wykresie 2.1. Stan równowagi atmosferycznej określa się na podstawie parametrów meteorologicznych oraz zakresu prędkości wiatru. W sumie występuje 36 sytuacji meteorologicznych. W tabeli 2.2. zostały zestawione stany równowagi atmosferycznej, odpowiadające im prędkości oraz parametry meteorologiczne. Najwyższe wartości wyniesienia gazów odlotowych Δh

¹ Δh_H – wyniesienia gazów odlotowych według formuły Hollanda

² Δh_C – wyniesienie gazów odlotowych według formuły CONCAWE

odnotowano dla stanu równowagi atmosferycznej silnie chwiejnej (1). Natomiast najniższe wartości Δh uzyskano dla stałego (6) stanu równowagi atmosferycznej. Podsumowując, wartości wyniesienia gazów odlotowych ulegają zmniejszeniu wraz z zmianą stanu równowagi w kolejności od (1) do (6) przy założeniu stałej prędkości wiatru na wysokości anemometru, stałej wysokości i średnicy emitora oraz przy stałej prędkości i temperaturze gazów odlotowych [4, 9].



Wykres 2.1. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i emisją ciepła z emitora ($h = 120\text{m}$, $v = 10\text{ m/s}$, $C_p = 1,3\text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $d = 4\text{ m}$, $T = 100^\circ\text{C}$)

Następnym czynnikiem decydującym o wartości wyniesienia gazów odlotowych jest prędkość gazów odlotowych na wylocie z emitora v . W przypadku gdy prędkość gazów odlotowych jest dwukrotnie mniejsza od prędkości wiatru na wysokości wylotu z emitora przyjmuje się, że wysokość wyniesienia gazów odlotowych ponad wylot z emitora równa się zero. Oznacza to, że w przypadku wystąpienia bardzo silnych wiatrów w strefie wylotu gazów odlotowych, smuga dymu będzie rozprzestrzeniać się na wysokości emitora. Wartość wysokości wyniesienia gazów odlotowych ulega podniesieniu wraz z wzrostem prędkości wylotu spalin z emitora. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i prędkością wylotową gazów przedstawiono na wykresie 2.2. Również w tym przypadku zaobserwowano, że stosunek prędkości gazów przy wylocie z emitora do wyniesienia gazów odlotowych przyjmuje różne

wartości dla różnych zakresów wartości emisji ciepła Q . Dla wartości $Q > 24\ 000$ kJ/s ww. zależność wykazuje stopniowy wzrost wartości, natomiast dla zakresu Q od 16 000 do 24 000 kJ/s wartość stosunku v do Δh stopniowo maleje z jednoczesnym wzrostem wartości emisji ciepła Q . W sytuacji, gdy wartość $Q < 16\ 000$ kJ/s wielkość zaproponowanego stosunku przyjmuje stałą wartość w zakresie prędkości od 1,2 m/s do 10,7 m/s. Oznacza to, że zmiana wysokości wyniesienia gazów odlotowych jest wprost proporcjonalny do zmiany prędkości gazów odlotowych przy wylocie z emitora [9].

Tabela 2.2. Zestawienie stanów równowagi atmosferycznej z odpowiadającymi im stałymi meteorologicznymi i zakresami prędkości wiatru [9]

Stała	Stan równowagi atmosferycznej					
	Silnie chwiejna (1)	Chwiejna (2)	Lekko chwiejna (3)	Obojętna (4)	Lekko stała (5)	Stała (6)
m	0,080	0,143	0,196	0,270	3,363	0,440
a	0,888	0,865	0,845	0,818	0,784	0,756
b	1,284	1,108	0,978	0,822	0,660	0,551
g	1,692	1,781	1,864	1,995	2,188	2,372
C₁	0,213	0,218	0,224	0,234	0,251	0,271
C₂	0,815	0,771	0,727	0,657	0,553	0,457
Zakres prędkości u_a [m/s]	1 - 3	1 - 5	1 - 8	1 - 11	1 - 5	1 - 4

Czynnikami decydującymi o wartości prędkości gazów odlotowych przy wylocie z emitora są średnica emitora i strumień objętości spalin. Zmniejszenie średnicy wewnętrznej emitora powoduje wzrost prędkości gazów odlotowych v , a w konsekwencji zwiększenie wysokości wyniesienia gazów odlotowych. Natomiast zmniejszenie wartości strumienia objętości spalin spowoduje spadek prędkości gazów odlotowych wywołując obniżenie wysokości wyniesienia gazów odlotowych [9].

Czynnikiem decydującym o wyniesieniu gazów odlotowych jest również prędkość wiatru na wysokości wylotu z emitora u_p . Wraz z spadkiem prędkości wiatru następuje wzrost wartości wyniesienia gazów odlotowych. Prędkość wiatru na wysokości wylotu z emitora oblicza się w zależności od wysokości emitora H . W przypadku gdy $H \leq 300$ m stosuje się wzór (2.2). Natomiast według wzoru (2.3) prowadzi się obliczenia prędkości wiatru na wysokości wylotu z emitora gdy $H > 300$ m [9].

$$u_h = u_a \cdot \left(\frac{h}{h_a} \right)^m \quad (2.2)$$

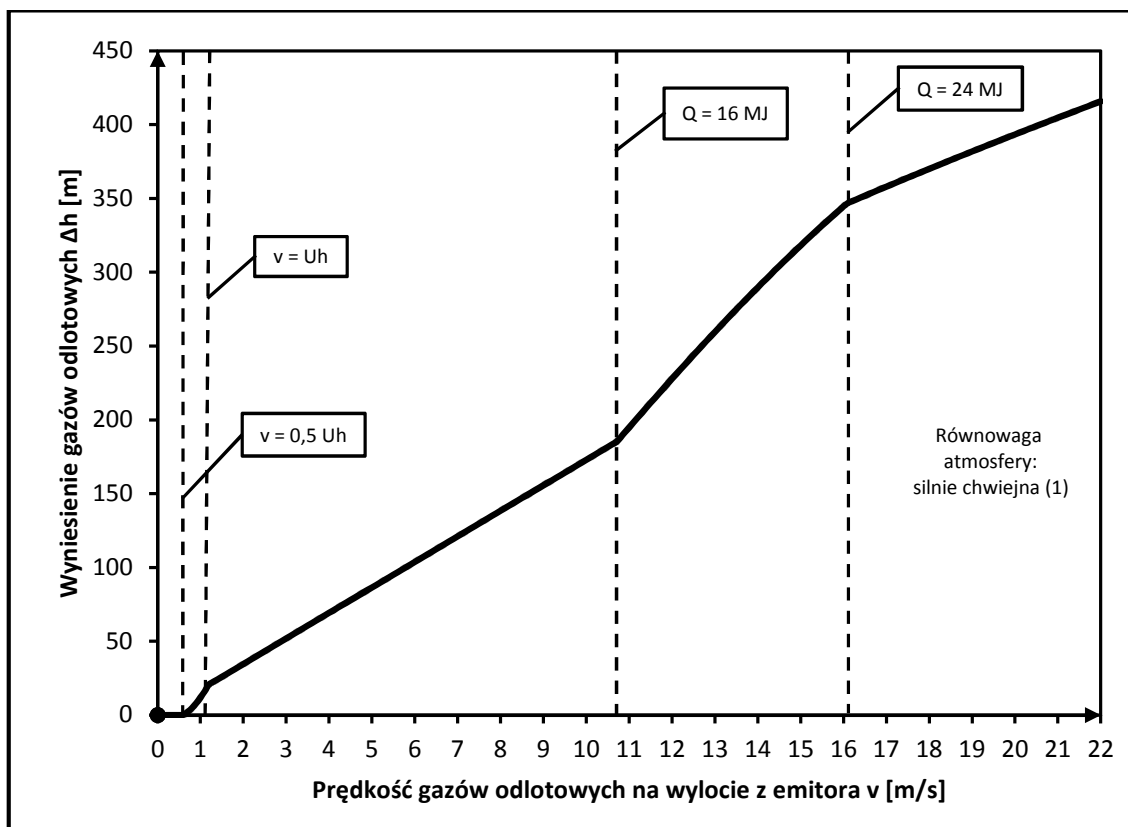
$$u_h = u_a \cdot \left(\frac{300}{h_a} \right)^m \quad (2.3)$$

gdzie:

u_h – prędkość wiatru na wysokości wylotu z emitora [m/s],

u_a – prędkość wiatru na wysokości anemometru [m/s],

h_a – wysokość anemometru (w metodyce referencyjnej $h_a = 14$) [m].



Wykres 2.2. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i prędkością wylotową gazów ($h = 120$ m, $d = 4$ m, $C_p = 1,3$ kJ/($m^3 \cdot K$), $T = 150^\circ C$, $m = 0,08$)

3. Założenia i zakres projektu

W nowopowstającej instalacji termicznego przekształcania odpadów spalane będzie 220 000 Mg odpadów komunalnych w ciągu roku. Proces spalania prowadzony będzie w piecu rusztowym. Instalacja pracować będzie przez 7800 h/rok [5]. Charakterystykę właściwości palnych odpadów komunalnych zestawiono w tabeli 2.1. Właściwości palne odpadów komunalnych zostały opracowane na podstawie [6, 7]. Proces spalania w instalacji unieszkodliwiania odpadów komunalnych odbywa się z nadmiarem powietrza $\lambda = 2,0$. Nadmiar powietrza spalania uwzględnia sumę powietrza pierwotnego i wtórniego dostarczonego do komory paleniskowej. Wilgotność powietrza atmosferycznego dostarczanego do komory spalania wynosi $x = 0,014 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ suchego powietrza. Temperatura gazów odlotowych przy wylocie z emitora wynosi $T = 397 \text{ K}$ [5].

Pozostałe dane, które wykorzystano w obliczeniach [2, 5, 8]:

- objętość molowa w warunkach normalnych: $V_u = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ ($p_u = 101,3 \text{ kPa}$; $T_u = 273 \text{ K}$),
- średnia roczna temperatura powietrza: $281,5 \text{ K}$,
- współczynnik szorstkości aerodynamicznej podłoża $z_0 = 1,0 \text{ m}$,
- ciepło właściwe gazów odlotowych $C_p = 1,3 \text{ KJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$.

Założono, że odpady komunalne ulegać będą całkowitemu i zupełnemu spalaniu w piecu rusztowym. Instalacja wyposażona będzie w wielostopniowy system oczyszczania spalin, który zredukuje zawartość zanieczyszczeń substancji pyłowych i gazowych co najmniej do poziomu wymaganego standardami emisyjnymi.

Minimalna wysokość rozpatrywanych wariantów emitora wynosi 60 m, a maksymalna 100 m. Prędkość gazów przepływających przez przewód powinna zawierać się w zakresie od 9 do 18 m/s. Liniowe straty ciśnienia powinny być jak najniższe.

Przyjęto, że najwyższe ze stężeń maksymalnych S_{mm} , uśrednione dla jednej godziny i maksymalne stężenia jednogodzinne S_1 w receptorach obliczeniowych nie mogą przekraczać 40 % wartości odniesienia substancji w powietrzu D_1 , uśrednionego dla jednej godziny. Ponadto percentyle (99,726 dla dwutlenku siarki oraz 99,8 dla pozostałych substancji) ze stężeń maksymalnych jednogodzinnych S_p w receptorach obliczeniowych nie mogą przekraczać 20 % wartości odniesienia substancji w

powietrzu D_1 , uśrednionego dla jednej godziny. Stężenie substancji w powietrzu S_a , uśrednione dla roku w receptorach obliczeniowych nie może przekraczać 10 % wartości odniesienia substancji w powietrzu D_a , uśrednionej dla roku.

Tabela 3.1. Charakterystyka właściwości chemicznych odpadów komunalnych (opracowanie własne na podstawie [6, 7])

Składniki paliwa	Jednostka	Udziały masowe wyrażone w procentach
Wilgotność	[%]	32,7
Części palne	[%]	39,2
Części niepalne	[%]	28,1
Analiza chemiczna części palnych		
Węgiel C	[%]	19,7
Wodór H	[%]	4,5
Azot N	[%]	0,7
Siarka S	[%]	0,05
Chlor Cl	[%]	0,25
Tlen O	[%]	14

Tabela 3.2. Masy molowe pierwiastków, związków chemicznych wykorzystanych w obliczeniach (opracowanie własne)

Pierwiastek	M [kg/kmol]	Pierwiastek	M [kg/kmol]
Węgiel C	12,01	Dwutlenek węgla CO ₂	44,01
Azot N	14,008	Azot N ₂	28,016
Wodór H	1,008	Woda H ₂ O	18,016
Siarka S	32,065	Dwutlenek siarki SO ₂	64,066
Chlor Cl	35,457	Chlorowodór HCl	36,465
Tlen O	16	Tlen O ₂	32

W projekcie przeprowadzono następujące obliczenia:

- obliczono objętość spalin powstających w wyniku procesu termicznego przekształcania odpadów,
- wykonano obliczenia objętości gazów odlotowych po procesie oczyszczania spalin,
- wykonano obliczenia strumienia objętości spalin,
- obliczono średnią prędkość gazów w przewodzie i określono wymiary wariantów emitora,
- określono wielkość emisji substancji gazowych i pyłowych do środowiska na podstawie standardów emisyjnych,

- przeprowadzono obliczenia rozprzestrzenia się zanieczyszczeń gazowych i pyłowych w powietrzu,
- wykonano analizę zmienności stężeń S_m^3 w zależności od sytuacji meteorologicznych w których występują,
- wykonano obliczenia liniowych strat ciśnienia.

³ S_m – stężenie maksymalnej substancji gazowej w powietrzu dla określonej sytuacji meteorologicznej [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

4. Obliczenie objętości spalin powstający podczas procesu termicznego przekształcania odpadów komunalnych

4.1 Metodyka obliczania objętości spalin w warunkach umownych

Objętość powstających spalin obliczono przy założeniu procesu całkowitego i zupełnego spalania części palnych odpadów komunalnych. Ponadto przyjmuje się, że cała wilgoć zawarta w odpadach komunalnych przejdzie w stan pary wodnej. Metodykę opracowano na podstawie literatury [10].

$$V'_{s.u.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{HCl} \quad (4.1)$$

$$V_{s.u.} = V'_{s.u.} - V_{H_2O} \quad (4.2)$$

gdzie:

V'_u – objętość spalin wilgotnych w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

V_u – objętość spalin suchych w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

V_{CO_2} – objętość dwutlenku węgla w spalinach w warunkach umownych [$m^3 CO_2/kg$ paliwa],

V_{H_2O} – objętość pary wodnej w spalinach w warunkach umownych [$m^3 H_2O/kg$ paliwa],

V_{SO_2} – objętość dwutlenku siarki w spalinach w warunkach umownych [$m^3 SO_2/kg$ paliwa],

V_{O_2} – objętość tlenu w spalinach w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

V_{N_2} – objętość azotu w spalinach w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

V_{HCl} – objętość chlorowodoru w spalinach w warunkach umownych [m^3/kg paliwa].

$$V_{CO_2} = \frac{V_u}{M_C} \cdot C^r \quad (4.3)$$

gdzie:

V_{CO_2} – objętość dwutlenku węgla w spalinach w warunkach umownych [$m^3 CO_2/kg$ paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [$m^3/kmol$],

M_C – masa molowa węgla [kg/kmol],

C^r – procentowy udział masowy węgla w spalanej paliwie [%].

$$V_{SO_2} = \frac{V_u}{M_S} \cdot S^r \quad (4.4)$$

gdzie:

V_{SO_2} – objętość dwutlenku siarki w spalinach warunkach umownych [m³ SO₂/kg paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [m³/kmol],

M_S – masa molowa siarki [kg/kmol],

S^r – procentowy udział masowy siarki w spalanej paliwie [%].

$$V_{HCl} = 2 \cdot \left(\frac{V_u}{M_{Cl_2}} \cdot Cl^r \right) \quad (4.5)$$

gdzie:

V_{HCl} – objętość chlorowodoru w spalinach w warunkach umownych [m³ HCl/kg paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [m³/kmol],

M_{Cl_2} – masa molowa chloru [kg/kmol],

Cl^r – procentowy udział masowy chloru w spalanej paliwie [%].

$$V_{H_2O} = V_u \cdot \left(\frac{W_t^r}{M_{H_2O}} + \frac{(H^r - H_{HCl}^r)}{M_{H_2}} \right) + V_{H_2O}^p \quad (4.6)$$

gdzie:

V_{H_2O} – objętość pary wodnej w spalinach w warunkach umownych [m³ CO₂/kg paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [m³/kmol],

W_t^r – wilgotność paliwa [%],

M_{H_2O} – masa molowa wody [kg/kmol],

M_{H_2} – masa molowa wodoru [kg/kmol],

H^r – procentowy udział masowy wodoru w spalanej paliwie [%],

$V_{H_2O}^p$ – Objętość pary wodnej wprowadzonej z powietrzem wilgotnym do komory spalania w warunkach umownych [$m^3 H_2O/ kg$ paliwa],

H_{HCl}^r – Procentowy udział masowy wodoru reagującego z chlorem [%]:

$$H_{HCl}^r = \frac{m_{H_2} \cdot 100\%}{m_p} \quad (4.7)$$

gdzie:

m_p – masa spalanego paliwa [kg],

m_{H_2} – masa wodoru reagującego z chlorem [kg/kg paliwa]:

$$m_{H_2} = \left(\frac{0,5 \cdot V_{HCL}}{V_u} \right) \cdot M_{H_2} \quad (4.8)$$

gdzie:

V_{HCl} – objętość chlorowodoru w spalinach w warunkach umownych [$m^3 HCl/kg$ paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [$m^3/kmol$],

M_{H_2} – masa molowa wodoru [kg/kmol].

$$V_{H_2O}^p = 1,6 \cdot x \cdot V \quad (4.9)$$

gdzie:

$V_{H_2O}^p$ – Objętość wody wprowadzona z powietrzem wilgotnym do komory spalania w warunkach umownych [$m^3 H_2O/ kg$ paliwa],

x – wilgotność powietrza atmosferycznego [kg H_2O/kg powietrza suchego],

V – całkowite powietrze dostarczone do komory spalania w warunkach umownych [m^3 /kg paliwa]:

$$V = \lambda \cdot V_0 \quad (4.10)$$

gdzie:

λ – stosunek nadmiaru powietrza,

V_0 – teoretyczna ilość powietrza dostarczona do komory spalania [m^3/kg paliwa]:

$$V_0 = \frac{100}{21} \cdot O_t \quad (4.11)$$

gdzie:

O_t – tlen teoretyczny [$\text{m}^3 \text{O}_2/\text{kg}$ paliwa]:

$$O_t = V_u \cdot \left(\frac{C^r}{M_c} + \left(0,5 \cdot \frac{(H^r - H_{HCl}^r)}{M_{H_2}} \right) + \frac{S^r}{M_s} - \frac{O^r}{M_{O_2}} \right) \quad (4.12)$$

gdzie:

O_t – tlen teoretyczny [$\text{m}^3 \text{O}_2/\text{kg}$ paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [m^3/kmol],

C^r – procentowy udział masowy węgla w spalonym paliwie [%],

S^r – procentowy udział masowy siarki w spalonym paliwie [%],

H^r – procentowy udział masowy chloru w spalonym paliwie [%],

O^r – procentowy udział masowy tlenu w spalonym paliwie [%],

H_{HCl}^r – procentowy udział masowy wodoru reagującego z chlorem [%],

M_{H_2} – masa molowa wodoru [kg/kmol],

M_s – masa molowa siarki [kg/kmol],

M_c – masa molowa węgla [kg/kmol].

M_{O_2} – masa molowa tlenu [kg/kmol].

$$V_{O_2} = O_t (\lambda - 1) \quad (4.13)$$

gdzie:

V_{O_2} - objętość tlenu w spalinach w warunkach umownych [$\text{m}^3 \text{O}_2/\text{kg}$ paliwa],

O_t – tlen teoretyczny [$\text{m}^3 \text{O}_2/\text{kg}$ paliwa],

λ – stosunek nadmiaru powietrza.

$$V_{N_2} = \frac{V_u}{M_{N_2}} \cdot N^r + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_0 \quad (4.14)$$

gdzie:

V_{N_2} – objętość azotu w spalinach w warunkach umownych [$\text{m}^3 \text{SO}_2/\text{kg}$ paliwa],

V_u – objętość molowa w warunkach umownych [$m^3/kmol$],

M_{N_2} – masa molowa azotu [$kg/kmol$],

N^r – procentowy udział masowy azotu w spalonym paliwie [%],

λ – stosunek nadmiaru powietrza,

V_0 – teoretyczna ilość powietrza dostarczona do komory spalania [m^3/kg paliwa].

4.2 Obliczenia objętości spalin w warunkach umownych

Wyniki wykonanych obliczeń objętości spalin powstających wyniku spalania jednego kilograma paliwa (odpadów komunalnych) według wyżej opisanej metodyki przedstawiono w tabeli 4.1. Pomocnicze wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały zestawione w tabeli 4.2.

Tabela 4.1. Zestawienie wyników obliczeń objętości spalin (opracowanie własne)

Skład paliwa	Udziały masowe w [%]	Skład spalin	$V_{i,u}$ [m^3/kg paliwa]	$V'_{s,u}$ [m^3/kg paliwa]	$V_{s,u}$ [m^3/kg paliwa]
C	0,197	CO ₂	0,3678	5,824	4,806
S	0,0005	SO ₂	0,0003496		
Cl	0,0025	HCl	0,001581		
O	0,14	O ₂	0,5198		
H	0,045	H ₂ O	1,018		
W_t^r	0,007				
N	0,392	N ₂	3,917		

Tabela 4.2. Zestawienie wyników pośrednich obliczeń objętości spalin (opracowanie własne)

Parametr	Wartość	Jednostka
m_{H_2}	0,00007107	kg
H_{cl}^r	0,007107	%
$V_p^{H_2O}$	0,1109	m^3/kg
V	4,951	m^3/kg
V_0	2,476	m^3/kg
O_t	0,5198	m^3/kg

5. Obliczenie objętości gazów odlotowych po procesie oczyszczania spalin

Gazy powstające po procesie termicznego przekształcania odpadów komunalnych przechodzą przez wielostopniowy system oczyszczania spalin [6]. Znajdujące się w nich zanieczyszczenia muszą ulegać redukcji co najmniej do poziomu wymaganego przez *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 w sprawie standardów emisyjnych z instalacji*. Wyniku redukcji emisji zanieczyszczeń strumień objętości spalin ulegnie zmniejszeniu.

Obliczenia redukcji emisji zanieczyszczeń przeprowadzono dla dwutlenku siarki i chlorowodoru. Standard emisyjny średniodobowy dla dwutlenku siarki w spalinach suchych przy standardowej zawartości tlenu wynosi 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast średniodobowy standard emisyjny dla chlorowodoru w spalinach suchych przy standardowej zawartości tlenu wyrażonej w procentach objętościowych wynosi 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [8].

5.1 Metodyka wykonywania obliczeń objętości gazów odlotowych po procesie oczyszczania spalin

Poniższą metodykę wykonywania obliczeń objętości spalin po procesie oczyszczania gazów odlotowych opracowano na podstawie literatury [2, 4, 8].

$$V_{i.u.o.} = \frac{(100\% - \phi) * V_{i.u.}}{100\%} \quad (5.1)$$

gdzie:

$V_{i.u.o}$ – objętość i-tego składnika spalin oczyszczonych w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

$V_{i.u.}$ – objętość i-tego składnika gazów warunkach umownych [m^3],

ϕ – stopień redukcji zanieczyszczeń gazowych [%]:

$$\phi = \left(1 - \frac{S_r}{S}\right) \cdot 100\% \quad (5.2)$$

gdzie:

S – stężenie masowo-objętościowe substancji w spalinach w warunkach umownych przy standardowej zawartości tlenu [mg/m^3],

S_r – stężenie masowo-objętościowe substancji w spalinach w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości tlenu [mg/m^3]:

$$S_r = S \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_1} \quad (5.3)$$

gdzie:

S – stężenie masowo-objętościowe substancji w spalinach w warunkach umownych przy standardowej zawartości tlenu [mg/m^3],

S_r – stężenie masowo-objętościowe substancji w spalinach w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości tlenu [mg/m^3],

O_1 – standardowa zawartość tlenu w gazach odlotowych [%],

O_2 – rzeczywista zawartość tlenu w gazach odlotowych [%].

$$S_i = \frac{C_{\%obj.}}{100\%} \cdot \frac{M}{V_u} \quad (5.4)$$

gdzie:

S_i – stężenie masowo-objętościowe i -tego składnika gazów odlotowych w warunkach umownych [kg/m^3],

V_u – objętość molowa gazu w warunkach umownych [m^3/kmol],

M – masa molowa substancji [kg/kmol],

$C_{\%obj.}$ – stężenie objętościowe [%obj]:

$$C_{\%obj.} = \frac{V_{i.u.}}{V_{s.u.}} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

gdzie:

$V_{i.u.}$ – objętość i -tego składnika gazów warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

$V_{s.u.}$ – objętość spalin suchych warunkach umownych w [m^3/kg paliwa].

5.2 Wyniki obliczeń objętości spalin oczyszczonych

Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono, że zawarte zanieczyszczenia w gazach odlotowych nieznaczająco wpływają na objętość spalin. Wyniki stopnia redukcji emisji zanieczyszczeń zestawiono w tabeli 5.1 a w tabeli 5.2 zestawiono wyniki objętości spalin oczyszczonych w warunkach umownych.

Tabela 5.1. Zestawienie wyników obliczeń stopnia redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych (opracowanie własne)

Rodzaj spalin	$V_{i,u}$ [m ³ /kg paliwa]	$C_{\%obj,s}$ ⁴ [%]	S_i [mg/m ³]	S_r [mg/m ³]	ϕ [%]
SO ₂	0,0003496	0,007274	207,847	50,921	75,5
HCl	0,00158	0,03289	534,932	10,184	98,1

Tabela 5.2. Zestawienie wyników obliczeń objętości spalin oczyszczonych (opracowanie własne)

Skład spalin	$V_{i,u,o}$ [m ³ /kg paliwa]	$V_{s,u,o}$ [m ³ /kg paliwa]	$C_{\%obj,s,o}$ ⁵ [%]
CO ₂	0,3678	4,805	7,654
SO ₂	0,00008565		0,001783
HCl	0,0000301		0,0006264
O ₂	0,5198		10,82
H ₂ O	1,018		-
N ₂	3,917		81,523

⁴ $C_{\%obj,s}$ – stężenie objętościowe spalin suchych nieoczyszczonych [%obj]

⁵ $C_{\%obj,s,o}$ - stężenie objętościowe spalin suchych oczyszczonych [%obj]

6. Obliczenie strumienia objętości spalin

W celu określenia emisji substancji pyłowych i gazowych do środowiska obliczono strumień objętości spalin suchych odniesiony do warunków umownych. Natomiast w celu określenia prędkości przepływu gazów odlotowych w emitorze wykonano obliczenia strumienia objętości spalin wilgotnych w odniesieniu do warunków rzeczywistych. Metodykę wykonywania obliczeń strumienia objętości spalin w odniesieniu do ww. warunków opracowano na podstawie literatury [3, 6].

$$\dot{V}'_{s.rz.o.} = \frac{T \cdot \dot{V}'_{s.u.o.}}{T_u} \quad (6.1)$$

gdzie:

$\dot{V}'_{s.rz.o.}$ – strumień objętości spalin wilgotnych, oczyszczonych w warunkach rzeczywistych [m³/h],

T – temperatura gazów odlotowych na wylocie z emitora [K],

T_u – temperatura gazów odlotowych w warunkach umownych [K],

$\dot{V}'_{s.u.o.}$ – strumień objętości spalin wilgotnych, oczyszczonych w warunkach umownych [m³/h]:

$$\dot{V}'_{s.u.o.} = \dot{m}_p \cdot V'_{s.u.o.} \quad (6.2)$$

$$\dot{V}_{s.u.o.} = \dot{m}_p \cdot V_{s.u.o.} \quad (6.3)$$

gdzie:

$\dot{V}_{s.u.o.}$ – strumień objętości spalin suchych, oczyszczonych w warunkach umownych [m³/h],

V'_{s.u.o.} – objętość spalin wilgotnych oczyszczonych w warunkach umownych [m³/kg paliwa],

V_{s.u.o.} – objętość spalin suchych oczyszczonych w warunkach umownych [m³/kg paliwa],

\dot{m}_p – strumień masy spalanych odpadów [kg/h]:

$$\dot{m}_p = \frac{m_p}{\tau} \quad (6.4)$$

gdzie:

m_p – masa spalanych odpadów [kg/rok],

τ – czas pracy instalacji [h/rok].

Wyniki przeprowadzonych obliczeń według wzorów (6.1 – 6.4) zestawiono w tabelach 6.1 i 6.2. W tabeli 6.1. zestawiono wyniki obliczeń rzeczywistego strumienia objętości spalin, a w tabeli 6.2. zestawiono wyniki obliczeń spalin suchych w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości tlenu.

Tabela 6.1. Zestawienie wyników obliczeń rzeczywistego strumienia objętości spalin (opracowanie własne)

Rodzaj spalin	$V_{i.u.o}$ [m ³ /kg paliwa]	$V'_{s.u.o}$ [m ³ /kg paliwa]	\dot{m}_p [kg/h]	$\dot{V}'_{s.u.o}$ [m ³ /h]	$\dot{V}'_{s.rz.o}$ [m ³ /h]	$\dot{V}'_{s.rz.o}$ [m ³ /s]
CO ₂	0,3678	5,822	28205,128	164211,006	238797,690	66,333
SO ₂	0,00008565					
HCl	0,0000301					
O ₂	0,5198					
H ₂ O	1,018					
N ₂	3,917					

Tabela 6.2. Zestawienie wyników obliczeń strumienia objętości spalin suchych w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości tlenu (opracowanie własne)

Rodzaj spalin	$V_{i.u.o}$ [m ³ /kg paliwa]	$V_{s.u.o}$ [m ³ /kg paliwa]	\dot{m}_p [kg/h]	$\dot{V}_{s.u.o}$ [m ³ /h]
CO ₂	0,3678	4,805	28205,128	135512,533
SO ₂	0,00008565			
HCl	0,0000301			
O ₂	0,5198			
H ₂ O	1,018			
N ₂	3,917			

7. Obliczenie średniej prędkości gazu w przewodzie oraz określenie wariantów emitora

Obliczenia prędkości gazów odlotowych przeprowadzono według poniższego wzoru (7.1) opracowanego na podstawie literatury [2].

$$w = \frac{\dot{V}'_{s.rz.o}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (7.1)$$

gdzie:

w – średnia prędkość gazu przepływającego przez emitor [m/s],

d – średnica wewnętrzna emitora [m],

$\dot{V}'_{s.rz.o}$ – strumień objętości gazów odlotowych oczyszczonych w warunkach rzeczywistych [m³/h].

Na podstawie wykonanych obliczeń prędkości gazów odlotowych stwierdzono, że dla wymiarów średnic zawierających się w zakresie od 2,2 m do 3 m jest spełniony warunek założonego zakresu prędkości (9 – 18 m/s). W celu ograniczenia liczby wariantów emitora przyjęto trzy warianty wymiarów średnicy oraz pięć wariantów wysokości emitora. Ustalone warianty geometryczne emitora wraz z odpowiadającymi i prędkościami gazu w przewodzie zestawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Zestawienie wariantów emitora oraz prędkości gazów odlotowych (opracowanie własne)

Warianty Emitora	h [m]	d [m]	w [m/s]
1.1	60	3	9,384
1.2	60	2,6	12,494
1.3	60	2,2	17,45
2.1	70	3	9,384
2.2	70	2,6	12,494
2.3	70	2,2	17,45
3.1	80	3	9,384
3.2	80	2,6	12,494
3.3	80	2,2	17,45
4.1	90	3	9,384

Tabela 7.1 Zestawienie wariantów emitora oraz prędkości gazów odlotowych (ciąg dalszy)

Warianty Emitora	h [m]	d [m]	w [m/s]
4.2	90	2,6	12,494
4.3	90	2,2	17,45
5.1	100	3	9,384
5.2	100	2,6	12,494
5.3	100	2,2	17,45

8. Określenie emisji substancji pyłowych i gazowych

Standardy emisyjne dla nowopowstałych instalacji spalania odpadów oraz niektórych instalacji współspalania zostały określone w załączniku nr 5 do *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji*. Standardy emisyjne zestawiono w tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Standardy emisyjne z instalacji spalania i współspalania odpadów [8]

Lp.	Nazwa substancji	Standardy emisyjne w [mg/m ³ u] (dla dioksyn i furanów [ng/m ³ u] przy 11% zawartości tlenu w gazach odlotowych)		
		Średnie dobowe	Średnie trzydziestominutowe	
			A	B
1	Pył ogółem	10	30	10
2	Substancje organiczne w postaci par gazów wyrażone jak całkowity węgiel organiczny	10	20	10
3	Chlorowodór	10	60	10
4	Fluorowodór	1	4	2
5	Dwutlenek siarki	50	200	50
6	Tlenek węgla	50	100	150 ⁶
7	Tlenek azotu i dwutlenek azotu z istniejących instalacji o zdolności przerobowej większej niż 6 Mg odpadów w ciągu godziny lub z nowych instalacji	200	400	200
	Tlenek azotu i dwutlenek azotu z istniejących instalacji o zdolności przerobowej do 6 Mg odpadów w ciągu godziny	400	-	-
8	Metale ciężkie i związki wyrażone jako metal	Średnie z próby o czasie trwania od 30 minut do 8 godzin		
	Kadm + tal	0,05		
	Rtęć	0,05		
	Antymon + arsen + ołów + chrom + kobalt + miedź + mangan + nikiel + wanad	0,5		
9	Dioksyny i furany	Średnia z próby o czasie trwania od 6 do 8 godzin 0,1 ⁷		

⁶ wartość średnia dziesięciominutowa

⁷ jako suma iloczynów stężeń dioksyn i furanów w gazach odlotowych oraz ich współczynników równoważności toksycznej

Standardy emisyjne stanowią punkt wyjścia w ocenie wielkości emisji dla nowo projektowanych instalacji spalania i współspalania odpadów, a zatem dla najbardziej niekorzystnego wariantu emisyjnego [1]. Standardy emisyjne zestawione w tabeli 8.1 zostały określone w warunkach umownych tj. w temperaturze 273 K, ciśnienie 101,3 kPa oraz w odniesieniu do 11% zawartości tlenu w spalinach [8]. W celu określenia emisji rocznej substancji emitowanych z procesu spalania odpadów komunalnych należy przeliczyć stężenia masowo-objętościowego przy standardowej zawartości tlenu ($O_2 = 11\%$) na stężenie przy rzeczywistej zawartości tlenu w spalinach suchych [4, 8]. Stężenia masowo-objętościowe przy standardowej zawartości tlenu S przeliczono na stężenie tlenu na stężenie przy rzeczywistej zawartości S_r według wzoru (5.3).

W przypadku wykonywania obliczeń emisji danego zanieczyszczenia w gazach odlotowych dla substancji posiadających określony średni 30-minutowy standard emisyjny S_{d30} , wydzielono okres emisji maksymalnej E_1 (na poziomie standardu 30 minutowego). Okres ten nie może trwać dłużej niż 3 % czasu pracy instalacji w roku kalendarzowym. Wydzielono również okres emisji średniej E_2 , trwający co najmniej przez 97 % czasu pracy instalacji w roku kalendarzowym. Wielkość emisji E_2 określono tak, aby średnia emisja roczna E_{sr} którą obliczono na podstawie ww. okresów emisji nie przekraczała średniodobowego standardu emisyjnego S_{d24} [1, 8]:

$$E_2 = \frac{E_{sr} \cdot (\tau_1 + \tau_2) - E_1 \cdot \tau_1}{\tau_2} \quad (8.1)$$

gdzie:

$$E_{sr} = S_{d24} \cdot \dot{V}_{s.u.o} \cdot 10^{-6} \quad (8.2)$$

$$E_1 = S_{d30} \cdot \dot{V}_{s.u.o} \cdot 10^{-6} \quad (8.3)$$

E_2 – Emisja standardu średniodobowego S_{d24} pomniejszona o emisję maksymalną

E_1 [kg/h],

E_{sr} – Emisja średnia (na poziomie standardu średniodobowego) [kg/h],

E_1 – Emisja maksymalna (na poziomie standardu 30-minutowego) [kg/h],

S_{d24} – średnio dobowy standard emisyjny w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [mg/m^3],

S_{d30} – średni 30-minutowy standard emisyjny w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [mg/m^3],

τ_1 – czas występowania emisji standardu 30-minutowego (3% czasu w roku),

τ_2 – czas występowania emisji standardu średniodobowego (97% czasu w roku),

$\dot{V}_{s.u.o}$ – strumień objętości spalin suchych w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [m^3/h].

Dla tlenku węgla (CO) zostały określone trzy standardy emisyjne tj.: średniodobowy S_{d24} , 30-minutowy S_{d30} , oraz 10-minutowy S_{d10} standard emisyjny. Wartości owych standardów emisyjnych zostały określone w tabeli 8.1. Standard średniodobowy uznaje się za dotrzymany, gdy jego wartość nie jest przekraczana przez 97 % wartości średniodobowych dla czasu pracy instalacji w ciągu roku kalendarzowego. Natomiast standard 30-minutowy uznaje się za dotrzymany, gdy przez maksymalnie 3 % czasu w roku nie jest on przekraczany. Natomiast standard 10-minutowy uznaje się za nieprzekroczony, gdy 95 % średnich 10-minutowych stężeń tej substancji w ciągu 24 godzin nie jest przekraczana [8].

Z uwagi na powyższy fakt, emisję średnią roczną $E_{sr.CO}$ można przyjąć na nieco wyższym poziomie niż wartość wynikającą ze standardu średniodobowego. Uwzględniając, że stężenia 10-minutowe i 30-minutowe wynoszą kolejno 150 i 100 $\mu g/m^3$, w przeciągu 30 minut dopuszczalne jest wystąpienie co najwyżej dwóch średnich 10-minutowych na poziomie maksymalnym przy założeniu, że trzecia średnia 10 minutowa będzie równa zero. Zatem dla określenia wielkości emisji rocznej dla instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, wystarczające jest uwzględnienie w obliczeniach tylko dwóch okresów emisji tj.: emisji ze standardu 30-minutowego (S_{d30}) trwające maksymalnie 3 % czasu w roku i emisji ze standardu średniodobowego (S_{d24}) trwające minimum przez 97 % czasu w roku [1].

$$E_{sr.CO} = \frac{(S_{d30} \cdot \tau_1 + S_{d24} \cdot \tau_2) \cdot \dot{V}_{s.u.o}^{11\%} \cdot 10^{-6}}{(\tau_1 + \tau_2)} \quad (8.4)$$

gdzie:

$E_{sr.CO}$ – Emisja średnia tlenku węgla [kg/h],

S_{d24} – średnio dobowy standard emisyjny w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [mg/m^3],

S_{d30} – średni 30-minutowy standard emisyjny w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [mg/m^3],

τ_1 – czas występowania emisji standardu 30-minutowego S_{d30} (3% czasu w roku),

τ_2 – czas występowania emisji standardu średniodobowego S_{d24} (97% czasu w roku),

$\dot{V}_{s.u.o}$ – strumień objętości spalin suchych w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości O_2 [m^3/h].

Z kolei w przypadku metali ciężkich oraz dioksyn i furanów istniejące standardy emisyjne (jednakowe dla krótszych i dłuższych czasów uśredniania) nie mogą być przekraczane w okresie całego roku, stąd dla najbardziej niekorzystnego wariantu emisyjnego wystarczy przyjąć emisje na poziomie danego standardu, który trwa przez cały rok [1, 8].

Wyniki obliczeń emisji, przeprowadzono według wzorów (8.1 – 8.2) oraz (5.3). Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Zestawienie wyników emisji (opracowanie własne)

Substancja	S_{d24}	S_{d30}	E_{sr}	E_1	E_2	E_{rok}
	[mg/m^3]	[mg/m^3]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[Mg/rok]
Pył ogółem	10,18	30,54	1,37	4,139	1,294	10,76
Całkowity węgiel organiczny	10,18	20,36	1,37	2,759	1,337	10,76
HCl	10,18	61,081	1,37	8,277	1,166	10,76
HF	1,018	4,072	0,138	0,552	0,125	1,076
SO ₂	50,901	203,602	6,898	27,591	6,258	53,802
CO	50,901	101,801	7,105	13,795	6,898	55,416
NO ₂	203,602	407,205	27,591	55,181	26,737	215,207
Cd+Ti	0,0509	-	0,006898	-	-	0,0538
Hg	0,0509	-	0,006898	-	-	0,0538
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	0,509	-	0,06898	-	-	0,538
Dioksyny i furany	0,0001018	-	0,0000138	-	-	0,0001076

9. Zestawienie i analiza wyników obliczeń rozprzestrzeniania substancji gazowych i pyłowych w powietrzu

Obliczenia rozprzestrzeniania zanieczyszczeń wykonano w programie EK100W. Program komputerowy wykonuje obliczenia w oparciu o referencyjną metodykę modelowania poziomów substancji w powietrzu zawartą w załączniku nr 3 do *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010r w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu*. Przyjęto siatkę obliczeniową o wymiarach 10000 x 10000 m. Emitor usytuowano w środku siatki obliczeniowej. Rozkład stężeń substancji pyłowych i gazowych obliczano w przyjętej siatce obliczeniowej w punktach receptorowych przy powierzchni terenu. W obliczeniach wykorzystano róże wiatrów dla aglomeracji krakowskiej. Za okres obliczeniowy przyjęto rok kalendarzowy.

Obliczenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wykonano dla każdego rozpatrywanego wariantu emitora i dla następujących substancji: Pył zawieszony PM10, węglowodory alifatyczne – do C₁₂, chlorowodoru, fluoru, dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, rtęci i dioksyn. Przyjęto, że obliczoną emisję pyłu ogółem i całkowitego węgla organicznego w obliczeniach rozprzestrzeniania zanieczyszczeń traktujemy jako pył zawieszony PM10 i węglowodory alifatyczne do C₁₂. Ponadto na potrzeby przeprowadzenia obliczeń rozprzestrzeniania zanieczyszczeń emisję chlorowodoru przeliczono na emisję fluoru według stosunku mas molowych chloru do chlorowodoru.

Wykonano następujące obliczenia stężeń substancji w powietrzu:

- S_m – stężenie maksymalne substancji gazowej w powietrzu w określonej sytuacji meteorologicznej wyrażone w $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- S_{mm} – najwyższe ze stężeń maksymalnych substancji w powietrzu w $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- S₁ – stężenia maksymalne uśrednione dla godziny w receptorach obliczeniowych wyrażone w $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- S_p – percentyle (99,726 dla SO₂ oraz 99,8 dla pozostałych substancji) ze stężeń maksymalnych jednogodzinnych w receptorach obliczeniowych wyrażone w $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- S_a – stężenie substancji w powietrzu uśrednione dla roku w $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

9.1 Zestawienie wyników obliczeń rozprzestrzenia zanieczyszczeń gazowych i pyłowych

Kompletne zestawienie uzyskanych wyników rozkładu stężeń substancji w powietrzu atmosferycznym przedstawiono w załączniku nr 5 do niniejszej pracy. Najważniejsze wyniki wykonanych obliczeń przedstawiono w tabelach 9.1. – 9.4., w których zestawiono wyniki najwyższych z stężeń maksymalnych substancji (S_{mm}) w powietrzu oraz maksymalne wartości stężeń S_1 (uśrednione dla jednej godziny), S_p (uśrednione dla jednej godziny) , S_a (uśrednione dla roku) obliczonych w punktach receptorowych dla rozpatrywanych wariantów emitora. Poniżej zestawiono oznaczenia wykorzystane w tabelach 9.1. – 9.4.

$S_{1,max}$ – maksymalne z maksymalnych stężeń S_1 dla danego wariantu emitora [$\mu\text{g}/\text{m}^3$],

$S_{p,max}$ – maksymalne z maksymalnych percentyli S_p dla danego wariantu emitora [$\mu\text{g}/\text{m}^3$],

$S_{a,max}$ – maksymalne z maksymalnych stężeń S_p dla danego wariantu emitora [$\mu\text{g}/\text{m}^3$],

X_{mm} – odległość od emitora wystąpienia S_{mm} [m],

H_{mm} – efektywna wysokość wyniesienia gazów odlotowych [m],

PCDD – dioksyny wyrażone w [pg/m^3],

C_{12} – węglowodory alifatyczne – do C_{12} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Tabela 9.1. Zestawienie wyników S_{mm} względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant emitora	h	d	v	S_{mm} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]									X_{mm}	H_{mm}
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	Pył	Hg	CO	C ₁₂	[m]	[m]
1.1	60	3	9,384	13,024	15,623	104,153	52,077	0,9894	3,906	0,01302	26,038	5,208	507,7	148,56
1.2	60	2,6	12,494	12,279	14,73	98,199	49,1	0,9329	3,682	0,01228	24,55	4,91	349,35	106,92
1.3	60	2,2	17,45	11,52	13,819	92,129	46,065	0,8752	3,455	0,01152	23,032	4,607	362,69	110,53
2.1	70	3	9,384	11,664	13,992	93,282	46,641	0,8861	3,498	0,01166	23,32	4,664	539,5	156,63
2.2	70	2,6	12,494	10,952	13,138	87,588	43,794	0,8321	3,285	0,01095	21,897	4,379	560,7	161,8
2.3	70	2,2	17,45	10,08	12,092	80,616	40,308	0,7658	3,023	0,01008	20,154	4,031	588,39	168,86
3.1	80	3	9,384	10,473	12,563	83,752	41,876	0,7956	3,141	0,01047	20,938	4,188	572,82	164,99
3.2	80	2,6	12,494	9,875	11,846	78,976	39,488	0,7502	2,962	0,00987	19,744	3,949	593,22	170,6
3.1	80	2,2	17,45	9,139	10,963	73,084	36,542	0,6943	2,741	0,00914	18,271	3,654	621,3	176,99
4.1	90	3	9,384	9,432	11,315	75,433	37,716	0,7166	2,829	0,00943	18,858	3,772	607,39	173,57
4.2	90	2,6	12,494	8,928	10,71	71,4	35,7	0,6783	2,678	0,00893	17,85	3,57	627,67	178,56
4.3	90	2,2	17,45	8,302	9,959	66,393	33,196	0,6307	2,490	0,0083	16,598	3,32	655,57	185,37
5.1	100	3	9,384	8,525	10,226	68,173	34,087	0,6476	2,557	0,00852	17,043	3,409	643,03	182,32
5.1	100	2,6	12,494	8,096	9,712	64,745	32,373	0,6151	2,428	0,00809	16,186	3,237	663,22	187,23
5.3	100	2,2	17,45	7,561	9,07	60,465	30,233	0,5744	2,267	0,00756	15,116	3,023	691	193,95

Tabela 9.2. Zestawienie maksymalnych z maksymalnych stężeń S_1 względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{1,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	Pył	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	13,007	15,603	104,022	52,011	0,9882	3,901	0,013	7,542	1,508
1.2	60	2,6	12,49	12,072	14,482	96,544	48,272	0,9171	3,62	0,01207	7,355	1,471
1.3	60	2,2	17,45	10,815	12,974	86,494	43,247	0,8217	3,244	0,01081	7,098	1,420
2.1	70	3	9,38	11,497	13,792	91,948	45,974	0,8735	3,448	0,01149	7,080	1,416
2.2	70	2,6	12,49	10,612	12,73	84,863	42,432	0,8062	3,182	0,01061	6,901	1,380
2.3	70	2,2	17,45	9,443	11,328	75,521	37,760	0,7174	2,832	0,00944	6,643	1,329
3.1	80	3	9,38	10,01	12,008	80,052	40,026	0,7605	3,002	0,01001	6,594	1,319
3.2	80	2,6	12,49	9,299	11,155	74,364	37,182	0,7064	2,789	0,0093	6,419	1,284
3.1	80	2,2	17,45	8,834	10,597	70,646	35,323	0,6711	2,649	0,00883	6,170	1,234
4.1	90	3	9,38	9,012	10,811	72,071	36,035	0,6846	2,703	0,00901	6,095	1,219
4.2	90	2,6	12,49	8,674	10,406	69,372	34,686	0,659	2,601	0,00867	5,925	1,185
4.3	90	2,2	17,45	8,203	9,84	65,6	32,8	0,6232	2,46	0,00820	5,681	1,136
5.1	100	3	9,38	8,363	10,032	66,883	33,442	0,6354	2,508	0,00836	5,588	1,118
5.1	100	2,6	12,49	8,022	9,624	64,158	32,079	0,6095	2,406	0,00802	5,414	1,083
5.3	100	2,2	17,45	7,544	9,05	60,333	30,167	0,5731	2,263	0,00754	5,178	1,036

Tabela 9.3. Zestawienie maksymalnych z maksymalnych percentyli S_p względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{p,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	Pył	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	11,716	5,038	46,342	11,896	0,3191	1,26	0,01171	11,955	2,317
1.2	60	2,6	12,49	11,088	4,842	44,145	11,098	0,3067	1,211	0,01108	11,241	2,207
1.3	60	2,2	17,45	9,904	4,582	40,983	10,359	0,2902	1,145	0,0099	10,409	2,049
2.1	70	3	9,38	9,906	3,899	40,881	10,344	0,2469	1,07	0,0099	10,546	2,044
2.2	70	2,6	12,49	9,465	3,591	37,618	9,547	0,2274	0,9873	0,00946	9,705	1,881
2.3	70	2,2	17,45	8,824	3,291	34,469	8,479	0,2084	0,8768	0,00882	8,892	1,723
3.1	80	3	9,38	8,798	2,903	35,449	8,397	0,1838	0,9028	0,0088	9,145	1,773
3.2	80	2,6	12,49	8,352	2,848	32,865	8,111	0,1804	0,8387	0,00835	8,479	1,643
3.1	80	2,2	17,45	7,757	2,795	31,012	7,69	0,177	0,7952	0,00776	7,905	1,551
4.1	90	3	9,38	7,783	2,61	30,579	7,643	0,1653	0,8112	0,00778	7,867	1,529
4.2	90	2,6	12,49	7,359	2,549	29,126	7,178	0,1614	0,7808	0,00736	7,514	1,456
4.3	90	2,2	17,45	6,743	2,448	26,763	6,758	0,1551	0,7376	0,00674	6,904	1,338
5.1	100	3	9,38	6,897	2,291	27,341	6,89	0,1451	0,7125	0,0069	7,053	1,367
5.1	100	2,6	12,49	6,451	2,219	26,148	6,47	0,1405	0,6835	0,00645	6,746	1,307
5.3	100	2,2	17,45	5,745	2,163	24,516	6,203	0,137	0,6415	0,00574	6,325	1,226

Tabela 9.4. Zestawienie maksymalnych z maksymalnych stężeń S_a względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{a,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	Pył	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	0,6238	0,1247	2,494	0,6236	0,01185	0,06236	0,00004	0,6423	0,1247
1.2	60	2,6	12,49	0,5867	0,1173	2,346	0,5865	0,01114	0,05865	0,00003	0,6041	0,1173
1.3	60	2,2	17,45	0,5511	0,1102	2,204	0,5509	0,01047	0,05509	0,00003	0,5675	0,1102
2.1	70	3	9,38	0,4794	0,0959	1,917	0,4793	0,00911	0,04793	0,00003	0,4936	0,09585
2.2	70	2,6	12,49	0,4642	0,0928	1,856	0,464	0,00882	0,0464	0,00003	0,4779	0,0928
2.3	70	2,2	17,45	0,4457	0,0891	1,782	0,4456	0,00847	0,04456	0,00003	0,4589	0,08911
3.1	80	3	9,38	0,4240	0,0848	1,696	0,4239	0,00805	0,04239	0,00003	0,4366	0,08478
3.2	80	2,6	12,49	0,410	0,08195	1,639	0,4097	0,00779	0,04097	0,00003	0,422	0,08195
3.1	80	2,2	17,45	0,3933	0,07864	1,573	0,3932	0,00747	0,03932	0,00003	0,405	0,07864
4.1	90	3	9,38	0,3714	0,07425	1,485	0,3712	0,00705	0,03712	0,00002	0,3824	0,07425
4.2	90	2,6	12,49	0,3584	0,07165	1,433	0,3583	0,00681	0,03583	0,00002	0,369	0,07166
4.3	90	2,2	17,45	0,3437	0,06871	1,374	0,3435	0,00653	0,03435	0,00002	0,3538	0,06871
5.1	100	3	9,38	0,322	0,06438	1,288	0,3219	0,00612	0,03219	0,00002	0,3316	0,06438
5.1	100	2,6	12,49	0,3103	0,06204	1,241	0,3102	0,00589	0,03102	0,00002	0,3195	0,06205
5.3	100	2,2	17,45	0,2973	0,05944	1,189	0,2972	0,00565	0,02972	0,00002	0,3061	0,05944

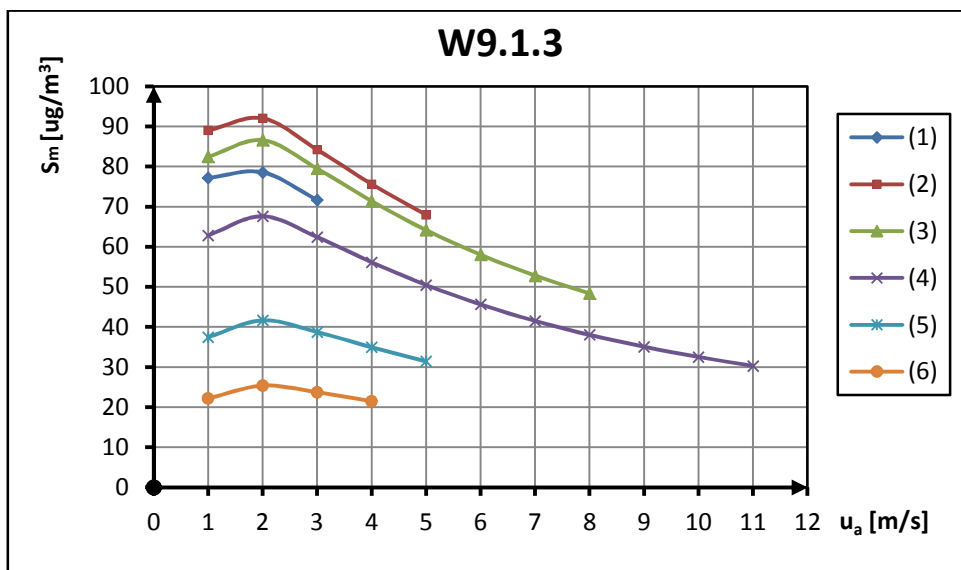
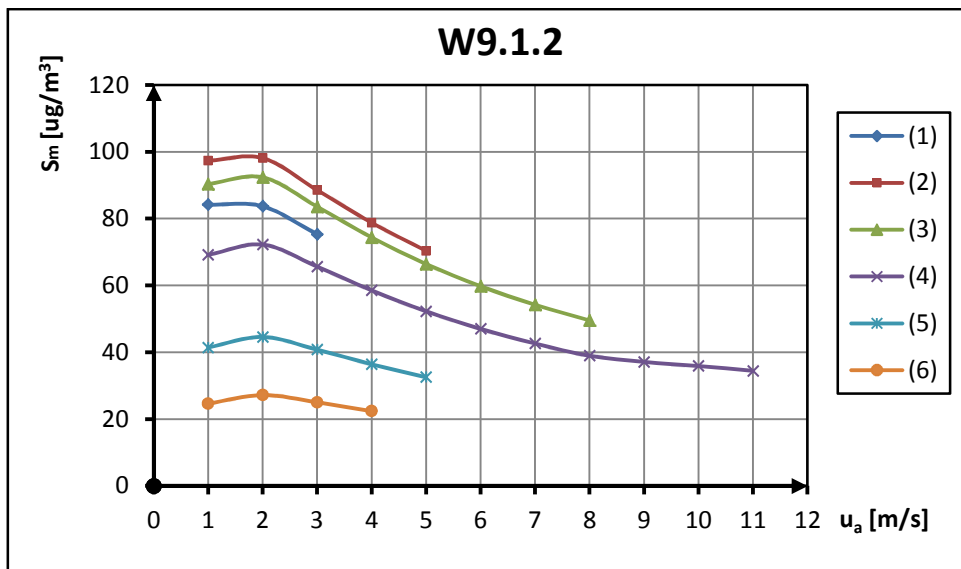
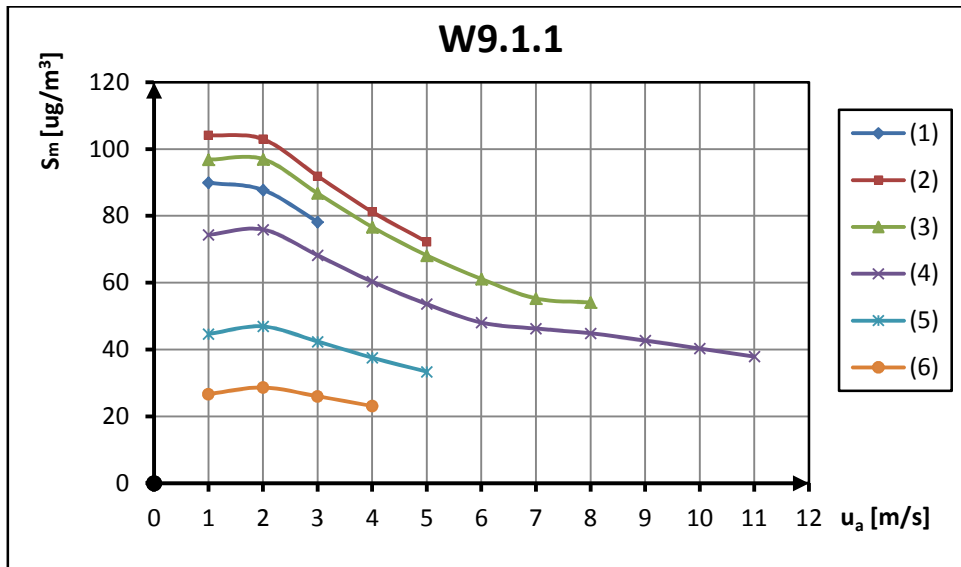
9.2 Analiza zmienności maksymalnego stężenia substancji gazowej w powietrzu w określonej sytuacji meteorologicznej

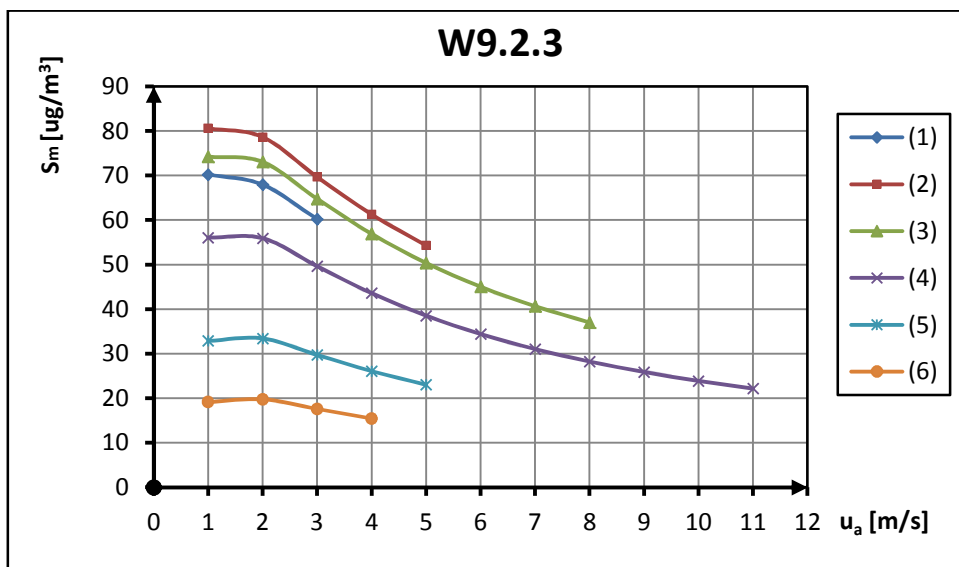
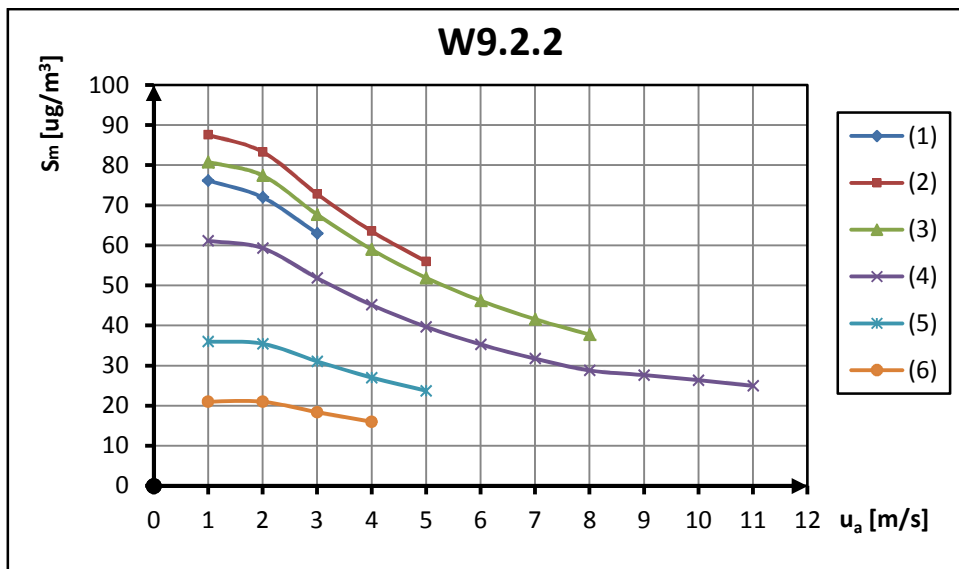
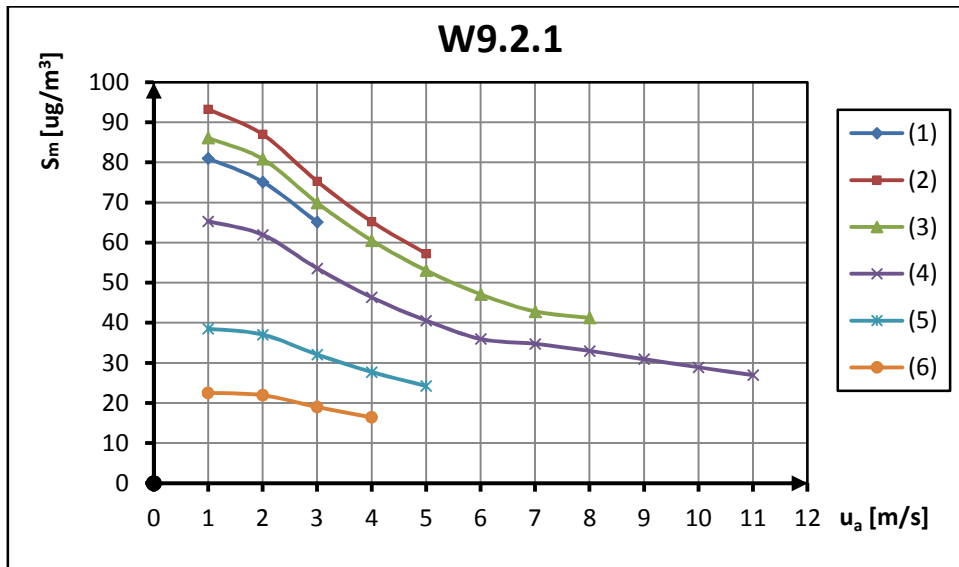
Na wykresach 9.1. – 9.15. zestawiono zależność pomiędzy maksymalnym stężeniem jednogodzinnym S_m a prędkością wiatru na wysokości anemometru dla każdego wariantu emitora z uwzględnieniem stanów równowagi atmosferycznej.

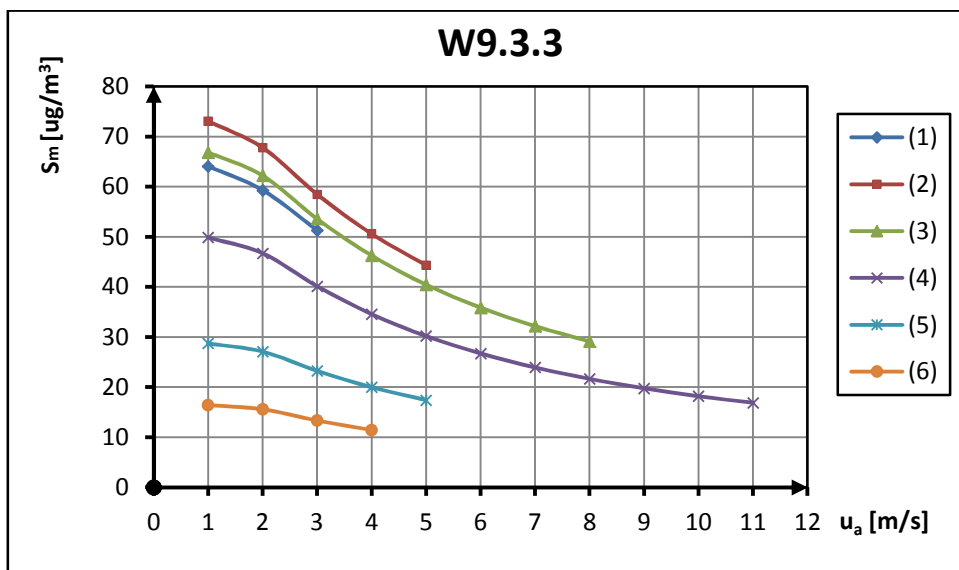
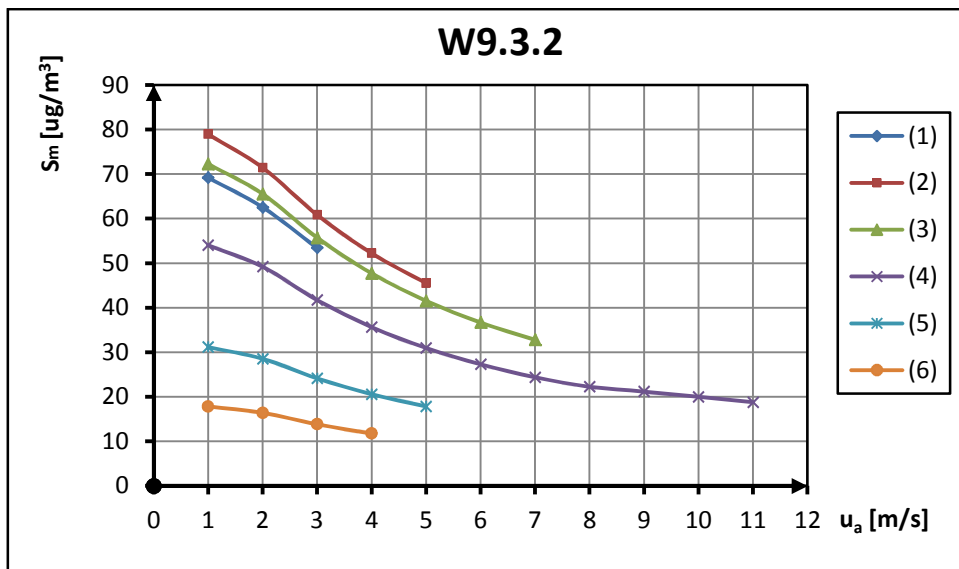
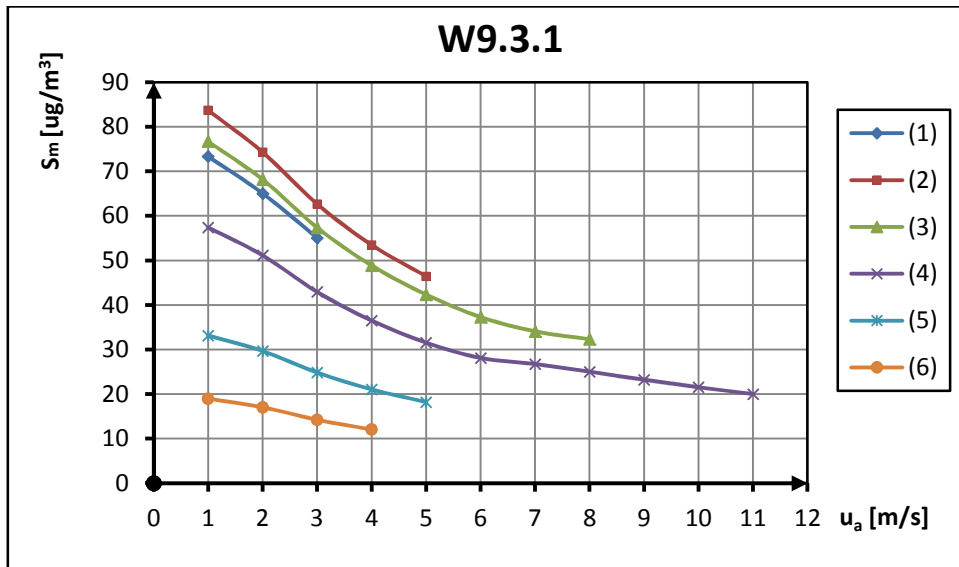
Wszystkie wykresy zostały zestawione poniżej i oznaczone w tytule numerem wykresu. Druga liczba tytułu określa wysokość emitora, natomiast trzecia średnicę wewnętrzną przewodu. Tytuły wykresów odpowiadające danemu numerowi wykresu wraz z podanymi wariantami wymiarów średnicy i wysokości zostały zestawione w tabeli 9.5. Stany równowagi atmosferycznej zostały określone numerami od (1) do (6) i oznaczone w legendzie wykresu. Zestawienie numerów, nazw stanów równowagi atmosferycznej i odpowiadające im parametry meteorologiczne zawarto w tabeli 2.2.

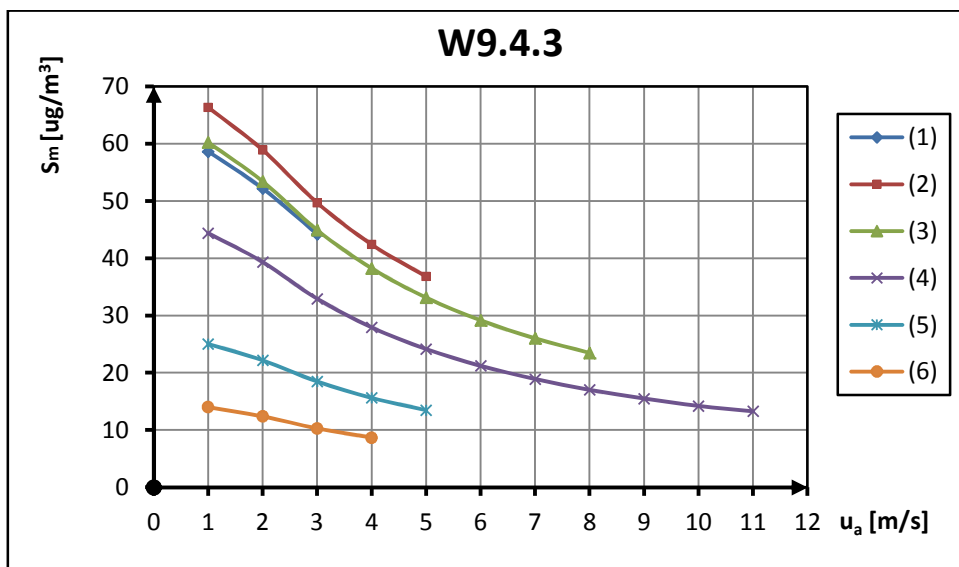
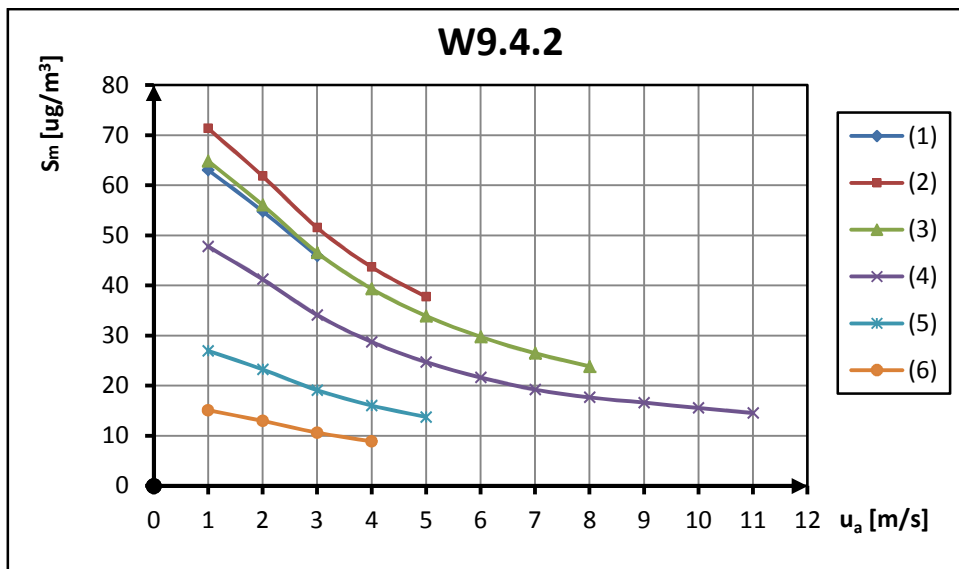
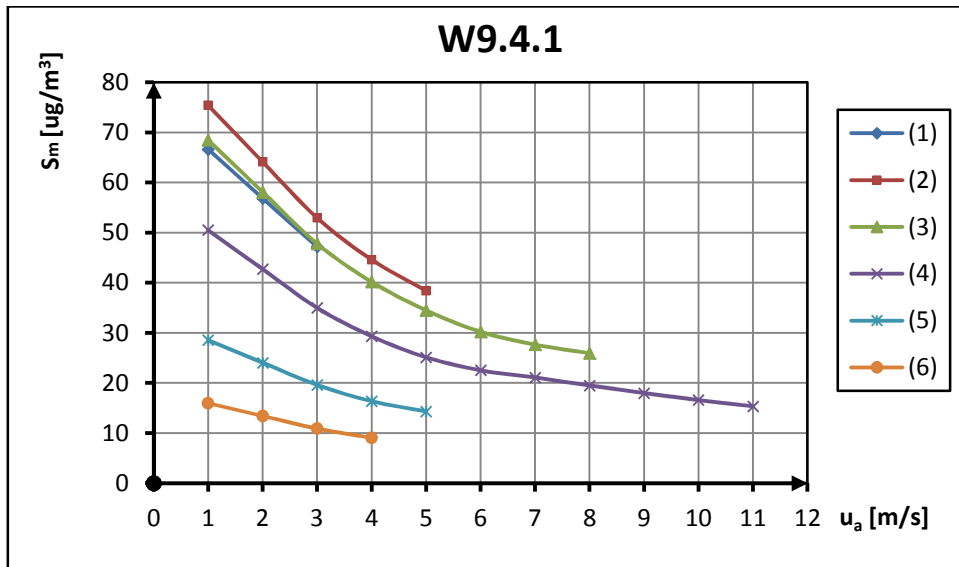
Tabela 9.5. Zestawienie wymiarów geometrycznych emitora z odpowiadającymi im numerami wykresów

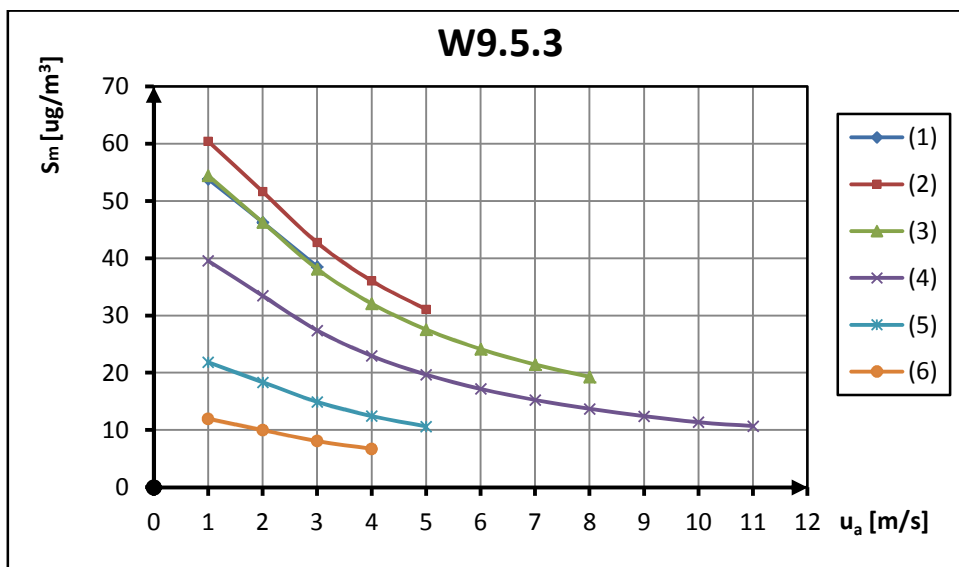
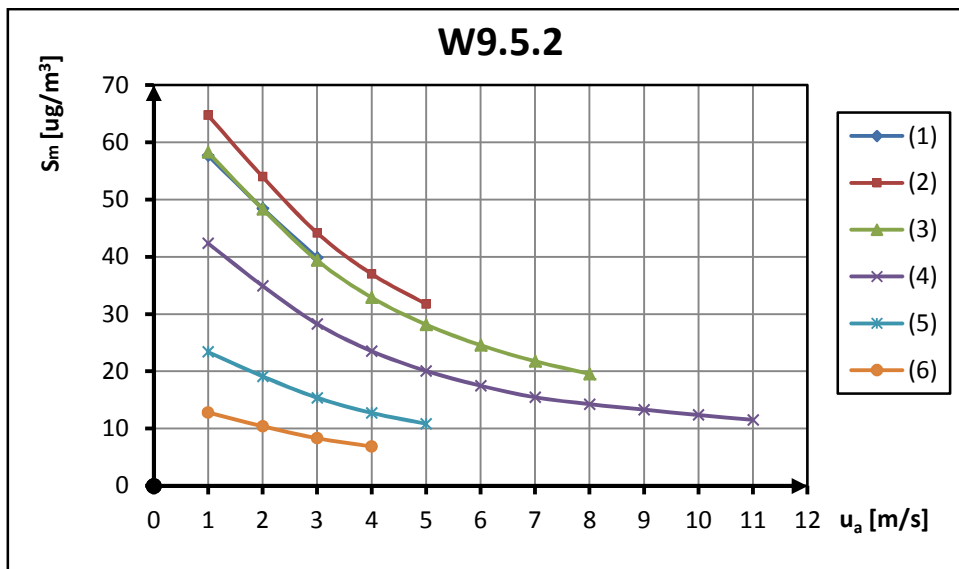
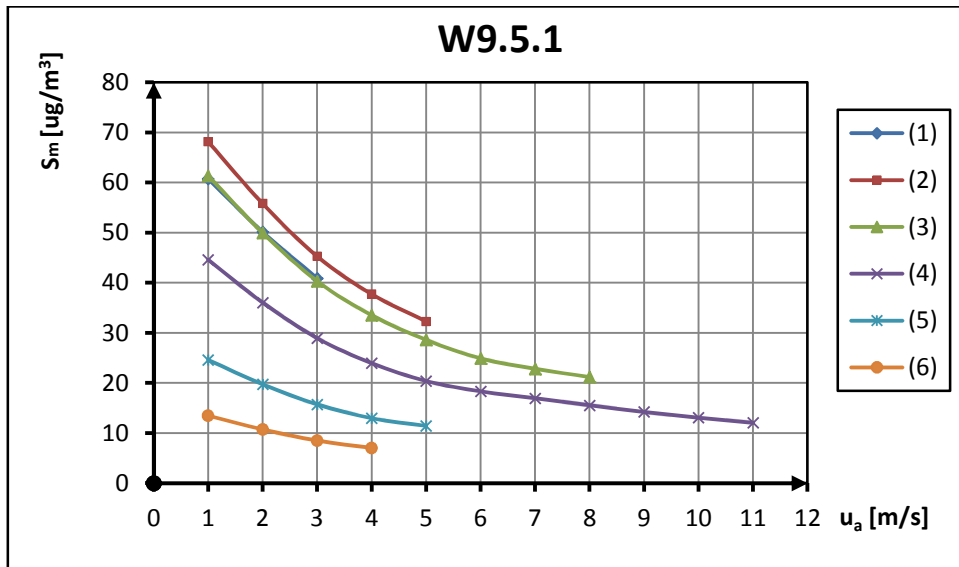
Wariant Emitora	Nr wykresu	Tytuł wykresu	h [m]	d [m]
1.1	9.1.	W9.1.1	60	3
1.2	9.2.	W9.1.2	60	2,6
1.3	9.3.	W9.1.3	60	2,2
2.1	9.4.	W9.2.1	70	3
2.2	9.5.	W9.2.2	70	2,6
2.3	9.6.	W9.2.3	70	2,2
3.1	9.7.	W9.3.1	80	3
3.2	9.8.	W9.3.2	80	2,6
3.3	9.9.	W9.3.3	80	2,2
4.1	9.10.	W9.4.1	90	3
4.2	9.11.	W9.4.2	90	2,6
4.3	9.12.	W9.4.3	90	2,2
5.1	9.13.	W9.5.1	100	3
5.2	9.14.	W9.5.2	100	2,6
5.3	9.15.	W9.5.3	100	2,2











Na wyżej zestawionych wykresach zaobserwowano, że dla każdego wariantu emitora maksymalne stężenia S_m występują przy silnie chwiejnym (2) stanie równowagi atmosferycznej, a najniższe wartość stężenia S_m dla stałej równowagi atmosferycznej. Stwierdzono, że stężenie S_m maleje względem stanów równowagi atmosferycznej maleje w kolejności: (2) - chwiejna, (3) – lekko chwiejna, (1) – silnie chwiejna, (4) – obojętna, (5) – lekko stała, (6) – stała. Należy podkreślić, że wraz ze wzrostem wysokości emitora różnica pomiędzy stężeniami stanów równowagi atmosferycznej (1) i (3) ulega znacznemu zmniejszeniu. Natomiast, gdy wysokości emitora $h = 100$ m (W5.1, W5.2, W5.3) w zakresie prędkości wiatru od 2 do 3 m/s wartości stężenia S_m dla stanu równowagi (1) przyjmują wartości większe od stężeń przy stanie równowagi atmosferycznej (3).

W zakresie wariantów od W2.1 do W5.3 zauważono, że wraz z wzrostem wysokości emitora i prędkości wiatru na wysokości anemometru stężenia dla wszystkich stanów równowagi atmosferycznej ulegają znacznemu zmniejszeniu. W przypadku zmniejszenia wymiarów średnicy dla wyżej wymienionych wariantów stwierdzono, że stężenia w obrębie wszystkich stanów równowagi dla zakresu prędkości od 2 do 11 m/s ulegają wzrostowi względem stężenia dla prędkości wiatru na wysokości anemometru równej 1 m/s. W przypadku wariantów W1.1 – W1.3 zaobserwowano, że najwyższe stężenia S_m w obrębie stanów równowagi atmosferycznej, występują dla prędkości równej 2 m/s. Ponadto wartości stężeń dla prędkości 2 m/s ulegają znacznemu wzrostowi wraz zwiększeniem średnicy wewnętrznej emitora.

Zależność przedstawiona na wykresach 9.1. – 9.15. wykazała, że wraz z zmniejszeniem średnicy oraz wzrostem wysokości emitora maleją stężenia maksymalne substancji gazowej w powietrzu w określonej sytuacji meteorologicznej. Natomiast w przypadku emitatorów wyższych niż 70 m stężenia maksymalne każdego stanu równowagi atmosferycznej ulegają spadkowi wraz z wzrostem prędkości wiatru na wysokości anemometru.

9.3 Analiza uzyskanych wyników obliczeń rozprzestrzeniania zanieczyszczeń substancji pyłowych i gazowych w powietrzu

Wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu zostały określone w załączniku nr 3 do *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010r w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu*. W tabeli 9.6. zostały zestawione wartości odniesienia D_1 (uśrednione dla jednej godziny) i D_a

(uśrednione dla roku) rozpatrywanych zanieczyszczeń. W tabeli zestawiono kryteria, na podstawie których przeprowadzono dobór optymalnego wariantu emitora.

Tabela 9.6. Zestawienie wartości odniesienia rozpatrywanych substancji gazowych i pyłowych w powietrzu (opracowanie własne na podstawie [9])

Nazwa substancji	D ₁ [µg/m ³]	D _a [µg/m ³]	40%D ₁ [µg/m ³]	20%D ₁ [µg/m ³]	10%D _a [µg/m ³]
Chlorowódor	200	25	80	40	2,5
Dwutlenek azotu	200	40	80	40	4
Dwutlenek Siarki	350	20	140	70	2
Fluor	30	2	12	6	0,2
Pył zawieszony PM10	280	40	112	56	4
Rtęć	0,7	0,04	0,28	0,14	0,004
Tlenek węgla	30 000	-	12000	6000	-
Węglowodory alifatyczne – do C₁₂	3000	1000	1200	600	100

Wyniki najwyższych ze stężeń maksymalnych S_{mm}, (uśrednione dla jednej godziny) dla rozpatrywanych wariantów emitatorów wykazały, że przekroczenie założonej wartości odniesienia 40% D₁ wystąpiły tylko dla dwutlenku azotu w obrębie wariantów od W1.1 do W3.1. Dla pozostałych substancji nie odnotowano przekroczeń założonej wartości odniesienia w całym zakresie wariantów emitatora. Zestawienie stężeń S_{mm} wyrażone w procentach wartości odniesienia 40%D₁ przedstawiono w tabeli 9.7. Zaobserwowano, że dla wszystkich substancji poza NO₂, SO₂ i HCl wartość stężenia S_{mm} wyrażona w procentach 40%D₁ nie przekracza 10% założonego kryterium. Oznacza to, że ich wpływ na jakość powietrza można uznać za pomijalny.

W tabeli 9.8. zestawiono wyniki najwyższych ze stężeń maksymalnych S₁ (uśrednione dla jednej godziny) wyrażone w procentach wartości odniesienia 40%D₁. Zaprezentowane wyniki ukazują, że przekroczenia wartości odniesienia 40%D₁ wystąpiły dla wariantów w od W1.1 do W3.1. z wyjątkiem wariantu W2.3 dla dwutlenku azotu. Maksymalne wartości z stężeń S₁ obliczone w receptorach obliczeniowych wykazały duże powinowactwo względem stężeń S_{mm}.

W przypadku wyników obliczeń percentyli (99,726 dla dwutlenku siarki oraz 99,8 dla pozostałych substancji) ze stężeń maksymalnych jednogodzinnych S₁ stwierdzono, że określone kryterium w wysokości 20%D₁ zostało przekroczone dla dwutlenku azotu w wariantach od W1.1 do W2.1. Dla pozostałych substancji

Tabela 9.7. Zestawienie wyników stężenia S_{mm} wyrażonego w procentach wartości odniesienia $40\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	S_{mm} (wyrażone w [%] wartości odniesienia $40\%D_1$)								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	PM 10	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	-	19,5%	130,2%	37,2%	8,2%	3,5%	4,7%	0,22%	0,43%
1.2	60	2,6	12,49	-	18,4%	122,7%	35,1%	7,8%	3,3%	4,4%	0,20%	0,41%
1.3	60	2,2	17,45	-	17,3%	115,2%	32,9%	7,3%	3,1%	4,1%	0,19%	0,38%
2.1	70	3	9,38	-	17,5%	116,6%	33,3%	7,4%	3,1%	4,2%	0,19%	0,39%
2.2	70	2,6	12,49	-	16,4%	109,5%	31,3%	6,9%	2,9%	3,9%	0,18%	0,36%
2.3	70	2,2	17,45	-	15,1%	100,8%	28,8%	6,4%	2,7%	3,6%	0,17%	0,34%
3.1	80	3	9,38	-	15,7%	104,7%	29,9%	6,6%	2,8%	3,7%	0,17%	0,35%
3.2	80	2,6	12,49	-	14,8%	98,7%	28,2%	6,3%	2,6%	3,5%	0,16%	0,33%
3.1	80	2,2	17,45	-	13,7%	91,4%	26,1%	5,8%	2,4%	3,3%	0,15%	0,30%
4.1	90	3	9,38	-	14,1%	94,3%	26,9%	6,0%	2,5%	3,4%	0,16%	0,31%
4.2	90	2,6	12,49	-	13,4%	89,2%	25,5%	5,7%	2,4%	3,2%	0,15%	0,30%
4.3	90	2,2	17,45	-	12,4%	83,0%	23,7%	5,3%	2,2%	3,0%	0,14%	0,28%
5.1	100	3	9,38	-	12,8%	85,2%	24,3%	5,4%	2,3%	3,0%	0,14%	0,28%
5.1	100	2,6	12,49	-	12,1%	80,9%	23,1%	5,1%	2,2%	2,9%	0,13%	0,27%
5.3	100	2,2	17,45	-	11,3%	75,6%	21,6%	4,8%	2,0%	2,7%	0,13%	0,25%
D₁ [µg/m³]				-	200	200	350	30	280	0,7	30000	3000
40%D₁ [µg/m³]				-	80	80	140	12	112	0,28	12000	1200

Tabela 9.8. Zestawienie wyników stężenia $S_{1,max}$ wyrażonego w procentach wartości odniesienia $40\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{1,max}$ (wyrażone w [%] wartości odniesienia $40\%D_1$)								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	PM 10	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	-	19,5%	130,0%	37,2%	8,2%	3,5%	4,6%	0,063%	0,13%
1.2	60	2,6	12,49	-	18,1%	120,7%	34,5%	7,6%	3,2%	4,3%	0,061%	0,12%
1.3	60	2,2	17,45	-	16,2%	108,1%	30,9%	6,8%	2,9%	3,9%	0,059%	0,12%
2.1	70	3	9,38	-	17,2%	114,9%	32,8%	7,3%	3,1%	4,1%	0,059%	0,12%
2.2	70	2,6	12,49	-	15,9%	106,1%	30,3%	6,7%	2,8%	3,8%	0,058%	0,12%
2.3	70	2,2	17,45	-	14,2%	94,4%	27,0%	6,0%	2,5%	3,4%	0,055%	0,11%
3.1	80	3	9,38	-	15,0%	100,1%	28,6%	6,3%	2,7%	3,6%	0,055%	0,11%
3.2	80	2,6	12,49	-	13,9%	93,0%	26,6%	5,9%	2,5%	3,3%	0,053%	0,11%
3.1	80	2,2	17,45	-	13,2%	88,3%	25,2%	5,6%	2,4%	3,2%	0,051%	0,10%
4.1	90	3	9,38	-	13,5%	90,1%	25,7%	5,7%	2,4%	3,2%	0,051%	0,10%
4.2	90	2,6	12,49	-	13,0%	86,7%	24,8%	5,5%	2,3%	3,1%	0,049%	0,10%
4.3	90	2,2	17,45	-	12,3%	82,0%	23,4%	5,2%	2,2%	2,9%	0,047%	0,09%
5.1	100	3	9,38	-	12,5%	83,6%	23,9%	5,3%	2,2%	3,0%	0,047%	0,09%
5.1	100	2,6	12,49	-	12,0%	80,2%	22,9%	5,1%	2,1%	2,9%	0,045%	0,09%
5.3	100	2,2	17,45	-	11,3%	75,4%	21,5%	4,8%	2,0%	2,7%	0,043%	0,08%
D₁ [µg/m³]				-	200	200	350	30	280	0,7	30000	3000
40%D₁ [µg/m³]				-	80	80	140	12	112	0,28	12000	1200

Tabela 9.9. Zestawienie wyników stężenia $S_{p,max}$ wyrażonego w procentach wartości odniesienia $20\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{p,max}$ (wyrażone w [%] wartości odniesienia $20\%D_1$)								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	PM 10	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	-	12,6%	115,9%	17,0%	5,3%	2,2%	8,4%	0,20%	0,39%
1.2	60	2,6	12,49	-	12,1%	110,4%	15,9%	5,1%	2,2%	7,9%	0,19%	0,37%
1.3	60	2,2	17,45	-	11,5%	102,5%	14,8%	4,8%	2,0%	7,1%	0,17%	0,34%
2.1	70	3	9,38	-	9,7%	102,2%	14,8%	4,1%	1,9%	7,1%	0,18%	0,34%
2.2	70	2,6	12,49	-	9,0%	94,0%	13,6%	3,8%	1,8%	6,8%	0,16%	0,31%
2.3	70	2,2	17,45	-	8,2%	86,2%	12,1%	3,5%	1,6%	6,3%	0,15%	0,29%
3.1	80	3	9,38	-	7,3%	88,6%	12,0%	3,1%	1,6%	6,3%	0,15%	0,30%
3.2	80	2,6	12,49	-	7,1%	82,2%	11,6%	3,0%	1,5%	6,0%	0,14%	0,27%
3.1	80	2,2	17,45	-	7,0%	77,5%	11,0%	3,0%	1,4%	5,5%	0,13%	0,26%
4.1	90	3	9,38	-	6,5%	76,4%	10,9%	2,8%	1,4%	5,6%	0,13%	0,25%
4.2	90	2,6	12,49	-	6,4%	72,8%	10,3%	2,7%	1,4%	5,3%	0,13%	0,24%
4.3	90	2,2	17,45	-	6,1%	66,9%	9,7%	2,6%	1,3%	4,8%	0,12%	0,22%
5.1	100	3	9,38	-	5,7%	68,4%	9,8%	2,4%	1,3%	4,9%	0,12%	0,23%
5.1	100	2,6	12,49	-	5,5%	65,4%	9,2%	2,3%	1,2%	4,6%	0,11%	0,22%
5.3	100	2,2	17,45	-	5,4%	61,3%	8,9%	2,3%	1,1%	4,1%	0,11%	0,20%
D₁ [µg/m³]				-	200	200	350	30	280	0,7	30000	3000
20%D₁ [µg/m³]				-	40	40	70	6	56	0,14	6000	600

Tabela 9.10. Zestawienie wyników stężenia $S_{a,max}$ wyrażonego w procentach wartości odniesienia $10\%D_a$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Wariant	h	d	v	$S_{a,max}$ (wyrażone w [%] wartości odniesienia $20\%D_a$)								
	[m]	[m]	[m/s]	PCDD	HCl	NO ₂	SO ₂	F	PM 10	Hg	CO	C ₁₂
1.1	60	3	9,38	-	5,0%	62,4%	31,2%	5,9%	1,6%	1,00%	-	15,6%
1.2	60	2,6	12,49	-	4,7%	58,7%	29,3%	5,6%	1,5%	0,75%	-	14,7%
1.3	60	2,2	17,45	-	4,4%	55,1%	27,5%	5,2%	1,4%	0,75%	-	13,8%
2.1	70	3	9,38	-	3,8%	47,9%	24,0%	4,6%	1,2%	0,75%	-	12,0%
2.2	70	2,6	12,49	-	3,7%	46,4%	23,2%	4,4%	1,2%	0,75%	-	11,6%
2.3	70	2,2	17,45	-	3,6%	44,6%	22,3%	4,2%	1,1%	0,75%	-	11,1%
3.1	80	3	9,38	-	3,4%	42,4%	21,2%	4,0%	1,1%	0,75%	-	10,6%
3.2	80	2,6	12,49	-	3,3%	41,0%	20,5%	3,9%	1,0%	0,75%	-	10,2%
3.1	80	2,2	17,45	-	3,1%	39,3%	19,7%	3,7%	1,0%	0,75%	-	9,8%
4.1	90	3	9,38	-	3,0%	37,1%	18,6%	3,5%	0,9%	0,50%	-	9,3%
4.2	90	2,6	12,49	-	2,9%	35,8%	17,9%	3,4%	0,9%	0,50%	-	9,0%
4.3	90	2,2	17,45	-	2,7%	34,4%	17,2%	3,3%	0,8%	0,50%	-	8,6%
5.1	100	3	9,38	-	2,6%	32,2%	16,1%	3,1%	0,8%	0,50%	-	8,0%
5.1	100	2,6	12,49	-	2,5%	31,0%	15,5%	2,9%	0,7%	0,50%	-	7,8%
5.3	100	2,2	17,45	-	2,4%	29,7%	14,9%	2,8%	0,7%	0,50%	-	7,4%
D_a [µg/m³]				-	25	40	20	2	40	0,04	-	8
10%D_a [µg/m³]				-	2,5	4	2	0,2	4	0,004	-	0,8

nie odnotowano wystąpienia przekroczenia, założonej wartości odniesienia.

Uzyskane wyniki dla najwyższych z maksymalnych stężeń S_a (uśrednionych dla roku) wykazały, że dla żadnej substancji w zakresie rozpatrywanych wariantów emitora nie wystąpiły przekroczenia, 10 % wartości odniesienia D_a . Wyniki stężenia $S_{a,max}$ wyrażone w procentach wartości odniesienia $10\%D_a$ zostały zestawione w tabeli 9.10. Przedstawione wyniki ukazują, że w najgorszym przypadku maksymalne stężenie $S_{a,max}$ stanowi 60% założonej wartości odniesienia $10\%D_a$ dla dwutlenku azotu. W przypadku dwutlenku siarki stężenia $S_{a,max}$ stanowią maksymalnie 31 % określonego kryterium. Dla pozostałych substancji stężenia S_a nie przekraczają 6 % wartości $10\%D_a$. Oznacza to, że ich wpływ na jakość powietrza jest pomijalny.

Rozkład stężeń uzyskanych wyników w siatce obliczeniowej wykazuje, że wraz z wzrostem odległości od emitora stężenia substancji przy powierzchni terenu ulegają znaczącym wzrostowi do osiągnięcia swojego maksimum. Po osiągnięciu swojego maksimum wraz z wzrostem odległości od emitora stężenia substancji ulegają znacznemu spadkowi. W załączniku nr 2-4 ukazano graficzne przedstawienie rozkładu stężeń S_1 , S_p i S_a dla dwutlenku azotu wariantu emitora W3.2. Znaczącą rolę w obrazie rozkładu stężeń w siatce obliczeniowej, odgrywa częstość występowania sytuacji meteorologicznych. Na przykładzie stężeń średniorocznych S_a objawia się to wystąpieniem najwyższych stężeń, w obszarach zgodnych z najczęściej występującymi kierunkami wiatru.

10. Wyznaczenie liniowych strat ciśnienia dla wybranych wariantów emitora

10.1 Metodyka obliczania liniowych strat hydraulicznych

Obliczenia strat hydraulicznych przy przepływie i wypływie gazu z emitora wykonano w oparciu o metodykę, opracowaną na potrzeby niniejszej pracy na podstawie literatury [2, 3].

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{h}{d} + 1 \right) \frac{w^2}{2} \rho_g \quad (8.1)$$

gdzie:

h, d – wysokość i średnica wewnętrzna przewodu [m] (dla uproszczenia można przyjąć, że h to wysokość emitora),

w – średnia prędkość gazu przepływającego przez przewód (prędkość wylotowa) [m/s],

ρ_g – średnia gęstość gazu przepływającego przez przewód w warunkach rzeczywistych [kg/m³],

λ – współczynnik oporów liniowych (zależny od liczby Reynoldsa); dla przepływu burzliwego ($Re > 3000$) można obliczyć ze wzoru Blasiusa:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (8.2)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho_g}{\eta_g} \quad (8.3)$$

η_g – współczynnik lepkości dynamicznej gazu [Pa·s]:

$$\eta_g = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \eta_i \sqrt{M_i T_k}}{\sum_{i=1}^n y_i \sqrt{M_i T_k}} \quad (8.4)$$

gdzie:

y_i – ułamek molowy i -tego składnika gazu [kmol/kmol],

$\sqrt{M_i T_{ki}}$ – pierwiastek z iloczynu masy molowej oraz temperatury krytycznej i -tego składnika gazu (przyjmowany zgodnie z tabelą 8.1),

η_i – dynamiczny współczynnik lepkości i -tego składnika gazu [Pa·s]:

$$\eta_i = \eta_{io} \frac{273 + C_i}{T + C_i} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (8.5)$$

gdzie:

η_{io} – dynamiczny współczynnik lepkości i -tego składnika gazu w temperaturze 273 K i pod ciśnieniem 0,1 MPa (przyjmowany w Pa·s zgodnie z tabelą 8.1),

C_i – stała Sutherlanda i -tego składnika gazu (przyjmowana w K zgodnie z tabelą 8.1),

T – temperatura gazu [K].

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (8.6)$$

gdzie:

y_i – ułamek molowy i -tego składnika gazu,

n – suma moli wszystkich składników mieszaniny gazów w warunkach umownych [kmol],

n_i – liczba moli i -tego składnika gazu w warunkach umownych [kmol]:

$$n_i = \frac{V_{i.u.o.}}{V_u} \quad (8.7)$$

gdzie:

$V_{i.u.o.}$ – objętość i -tego składnika spalin oczyszczonych w warunkach umownych [m^3/kg paliwa],

V_u – objętość molowa gazu w warunkach umownych [$m^3/kmol$].

$$\rho_g = \frac{\sum m_i}{V'_{s.rz.o}} \quad (8.8)$$

gdzie:

ρ_g – średnia gęstość gazu przepływającego przez przewód w warunkach rzeczywistych [kg/m³],

$V'_{s.rz.o}$ – Objętość spalin oczyszczonych w warunkach rzeczywistych [m³],

m_i – masa i-tego składnika gazu [kg]:

$$m_i = n_i \cdot M_i \quad (8.9)$$

gdzie:

n_i – liczba moli i-tego składnika gazu w warunkach umownych [kmol],

M_i – Masa molowa i – tego składnika gazu [kg/kmol].

Tabela 10.1. Wybrane parametry rozpatrywanych składników gazów (opracowanie własne na podstawie [3])

Parametr	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	HCl
Stała C [K]	254	416	650	104	125	362
$\sqrt{M_i T_{ki}}$	115,5	166	108	59,5	70,2	108,8
$\eta_{io} \cdot 10^{-5}$ [Pa·s]	1,39	1,17	0,9	1,7	1,89	2,85

10.2 Wyniki obliczeń oraz analiza strat ciśnienia rozpatrywanych wariantów

Uzyskane wyniki obliczeń ukazują, że największe straty ciśnienia wystąpiły w wariantcie 5.1, tj. dla najwyższego emitora (h = 100m) oraz najmniejszej średnicy (d = 2,2 m) i wynoszą one 181,07 Pa. Natomiast najmniejsze liniowe straty ciśnienia wystąpiły dla wariantu 1.3 (h = 60 m, d = 3 m) i wynoszą one 44,47 Pa. Wykonane obliczenia wykazały, że wraz z spadkiem wysokości nieznacznie maleją straty ciśnienia. Natomiast zaobserwowano, że wraz z wzrostem wartości średnic wewnętrznej d emitora, następuje znaczący spadek liniowych strat ciśnienia. Wyniki liniowych strat ciśnienia zostały zestawione w tabeli 10.4. Natomiast w tabeli 10.2. przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika lepkości dynamicznej gazu, a w tabeli 10.3. zestawiono wyniki obliczeń gęstości gazu w warunkach rzeczywistych.

Tabela 10.2. Zestawienie wyników obliczeń dynamicznego współczynnika lepkości gazu (opracowanie własne)

Rodzaj spalin	$V_{i,u.o}$ [m ³ /kg paliwa]	n_i [kmol]	y_i	$\eta_i \cdot 10^{-5}$ [Pa·s]	$\eta_g \cdot 10^{-5}$ [Pa·s]
CO ₂	0,3678	0,0164	0,06317	1,973	2,018
SO ₂	0,00008565	0,00000382	0,00001471	1,739	
HCL	0,0000301	0,000001342	0,000005169	4,181	
O ₂	0,5198	0,02319	0,08929	2,527	
H ₂ O	1,018	0,04538	0,1748	1,391	
N ₂	3,917	0,1747	0,6728	2,243	
suma	4,805	0,2433	1	-	-

Tabela 10.3. Zestawienie wyników obliczeń gęstości gazu w warunkach rzeczywistych (opracowanie własne)

Rodzaj spalin	m_i [kg]	$\sum m_i$ [kg]	$V'_{s.r.z.o}$ [m ³ /kg paliwa]	ρ_g [kg/m ³]
CO ₂	0,7219	7,176	8,466	0,8476
SO ₂	0,0002447			
HCL	0,00004895			
O ₂	0,742			
H ₂ O	0,8176			
N ₂	4,8945			

Tabela 10.4. Zestawienie wyników obliczeń liniowych strat ciśnienia rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

Warianty emitora	h [m]	d [m]	w [m/s]	Re	$\lambda \cdot 10^{-3}$	Δp [Pa]
1.1	60	3	9,384	1182006	9,584	44,475
1.2	60	2,6	12,494	1363853	9,247	80,269
1.3	60	2,2	17,45	1611826	8,869	160,261
2.1	70	3	9,384	1182006	9,584	45,667
2.2	70	2,6	12,494	1363853	9,247	82,622
2.3	70	2,2	17,45	1611826	8,869	165,463
3.1	80	3	9,384	1182006	9,584	46,859
3.2	80	2,6	12,494	1363853	9,247	84,974
3.3	80	2,2	17,45	1611826	8,869	170,665
4.1	90	3	9,384	1182006	9,584	48,051
4.2	90	2,6	12,494	1363853	9,247	87,327
4.3	90	2,2	17,45	1611826	8,869	175,867
5.1	100	3	9,384	1182006	9,584	49,244
5.2	100	2,6	12,494	1363853	9,247	89,68
5.3	100	2,2	17,45	1611826	8,869	181,069

11. Podsumowanie

Podsumowując uzyskane wyniki obliczeń w niniejszej pracy, stwierdzono, że w przypadku określenia optymalnych wymiarów geometrycznych emitora dla instalacji termicznego przekształcania odpadów ze względu na jego wpływ na jakość powietrza wystarczające jest rozpatrywanie wyników stężeń substancji w powietrzu wyłącznie dla dwutlenku azotu. Ponieważ uzyskane wyniki przeprowadzonych obliczeń stężeń S_{mm} , S_1 , S_p i S_a wykazały, że najbardziej niekorzystnie wpływającą substancją na jakość powietrza jest dwutlenek azotu, gdyż tylko dla stężeń tej substancji w rozpatrywanych wariantach emitora wystąpiły przekroczenia założonych wartości odniesienia. Ponadto można stwierdzić, że wpływ na jakość powietrza pozostałych substancji jest znikomy, a w niektórych przypadkach nawet pomijalny. W tabeli 11.1. Zestawiono wyniki obliczeń maksymalnych stężeń dwutlenku azotu i liniowych strat ciśnienia względem rozpatrywanych wariantów emitora.

Tabela 11.1. Zestawienie wyników obliczonych stężeń dwutlenku azotu i liniowych strat ciśnienia (opracowanie własne)

Warianty Emitora	h [m]	d [m]	Δp [Pa]	S_{mm} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$S_{1,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$S_{p,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$S_{a,max}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1.1	60	3	44,475	104,153	104,022	46,342	2,494
1.2	60	2,6	80,269	98,199	96,544	44,145	2,346
1.3	60	2,2	160,261	92,129	86,494	40,983	2,204
2.1	70	3	45,667	93,282	91,948	40,881	1,917
2.2	70	2,6	82,622	87,588	84,864	37,619	1,856
2.3	70	2,2	165,463	80,616	75,521	34,469	1,782
3.1	80	3	46,859	83,752	80,052	35,449	1,696
3.2	80	2,6	84,974	78,977	74,364	32,865	1,639
3.3	80	2,2	170,665	73,084	70,646	31,012	1,573
4.1	90	3	48,051	75,433	72,071	30,579	1,485
4.2	90	2,6	87,327	71,4	69,372	29,126	1,433
4.3	90	2,2	175,867	66,393	65,6	26,763	1,374
5.1	100	3	49,244	68,173	66,883	27,341	1,288
5.2	100	2,6	89,68	64,746	64,158	26,148	1,241
5.3	100	2,2	181,069	60,465	60,334	24,516	1,189
40%D₁ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				80	80	-	-
20%D₁ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				-	-	40	-
10%D_a [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				-	-	-	4

Wyniku uzyskany obliczeń rozprzestrzenia się zanieczyszczeń ukazują, że wartości stężeń substancji maleją wraz z wzrostem wysokości oraz z zmniejszeniem średnicy emitora.

Najwyższe z stężeń maksymalnych S_{mm} w rozpatrywanych wariantach emitora występują przy prędkością wiatru na wysokości anemometru równych 1 m/s i 2 m/s tylko dla chwiejnego stanu równowagi atmosferycznej. Częste występowanie wymienionej sytuacji meteorologicznej na danym obszarze powoduje pogorszeniem jakości powietrza.

Stwierdzono że, wraz z wzrostem odległości od emitora stężenia substancji w powietrzu ulegają wzrostowi do momentu osiągnięcia swojego maksimum. Stężenia po osiągnięciu swojego maksimum ulegają stopniowemu zmniejszeniu wraz z zwiększeniem odległości od emitora.

Przestrzenny rozkład maksymalnych stężeń średniorocznych ukazuje, że najwyższe wartości stężeni usytuowane, są zgodnie z częstością występowania danych kierunków i prędkości wiatru.

Liniowe starty ciśnienia maleją wraz z wzrostem średnicy emitora, oraz rosną wraz z zwiększeniem wysokości emitora.

Na podstawie powyższych wniosków, oraz wyników przeprowadzonych obliczeń stwierdzam, że najbardziej optymalne wymiary wysokości i średnicy emitora dla rozpatrywanego przypadku wynoszą odpowiednio 80 m i 2,6 m. Ponieważ dla wariantów o niższej wysokości i większej średnicy nie zostały spełnione założone warunki wartości odniesienia substancji w powietrzu. Wybranie wariantu o wyższej wysokości i większej średnicy skutkowałoby, znacznym podniesieniem kosztów inwestycyjnych. Natomiast wybranie wariantu o tej samej wysokości i mniejszej średnicy zaowocowałoby zmniejszeniem kosztów inwestycyjnych. Jednak wyższe straty ciśnienia w przewodzie emitora, spowodują nadmierne podniesienie kosztów eksploatacyjnych. Ponadto, w przypadku zmniejszenia średnicy wzrasta prędkość gazów odlotowych w świetle emitora, a wyniku wzrasta uciążliwość obiektu, z względu na hałas.

Literatura:

- [1] III Konferencja z cyklu *Instrumenty Zarządzania Ochroną Środowiska* na temat *Oceny oddziaływania na środowisko na szczeblu krajowym i regionalnym*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo – Dydaktyczne, Kraków 2005, str. 327 – 336.
- [2] Kuropka J., *Oczyszczanie gazów odlotowych z zanieczyszczeń gazowych: obliczenia, tabele, materiały pomocnicze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [3] Kuropka J., *Oczyszczanie gazów odlotowych z zanieczyszczeń gazowych; Procesy podstawowe*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.
- [4] Mazur M., *Systemy ochrony powietrza*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2004.
- [5] *Plan Gospodarki Odpadami, Program Ochrony Środowiska i Stanowięcy Jego Element Plan Gospodarki Odpadami Dla Miasta Krakowa (plan na lata 2005 – 2007 z uwzględnieniem zadań na lata 2008 – 2011)*, tom II, Załącznik do Uchwały Nr LXXV/737/05, Rada Miasta Krakowa z dnia 13.04. 2005 r.
- [6] *Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko dla Przedsięwzięcia „Budowa zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów przy ul. Giedroycia w Krakowie” jako element projektu „Program gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie”*, Warszawa, październik 2009.
- [7] Rosik – Dulewska Cz., *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [8] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji*, Dz. U. z 2011 r. Nr 95, poz. 558.
- [9] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu*, Dz. U. z 2010 r. Nr 16, poz. 87.
- [10] Słupek S., Nocoń J., Buczek A., *Technika Ciepłna*, skrypt AGH nr 1646, Kraków 2002.

Programy komputerowe:

1. AUTO CAD 2011
2. EK100W firmy ATMOTERN S.A
3. Surfer firmy GOLDEN SOFTWARE

Spis wykresów

- Wykres 2.1. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i emisją ciepła z emitora ($h = 120\text{m}$, $v = 10\text{ m/s}$, $C_p = 1,3\text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$, $d = 4\text{ m}$, $T = 100^\circ\text{C}$)
- Wykres 2.2. Zależność pomiędzy wyniesieniem gazów odlotowych i prędkością wylotową gazów ($h = 120\text{ m}$, $d = 4\text{ m}$, $C_p = 1,3\text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$, $T = 150^\circ\text{C}$, $m = 0,08$)
- Wykres 9.1.–9.15. Zestawienie zależności pomiędzy stężeniem S_m , a prędkością wiatru na wysokości anemometru dla każdego wariantu emitora (W1.1 – W5.3)

Spis tabel

- Tabela 2.1. Zestawienie wzorów, na podstawie których wykonuje się obliczenia wysokości wyniesienia gazów odlotowych ponad wylot z emitora (opracowanie własne na podstawie [9]).
- Tabela 2.2. Zestawienie stanów równowagi atmosferycznej z odpowiadającymi im stałymi meteorologicznymi oraz zakresami prędkości wiatru [9]
- Tabela 3.1. Charakterystyka właściwości chemicznych odpadów komunalnych (opracowanie własne na podstawie [6, 7])
- Tabela 3.2. Masy molowe pierwiastków, związków chemicznych wykorzystanych w obliczeniach (opracowanie własne)
- Tabela 4.1. Zestawienie wyników obliczeń objętości spalin (opracowanie własne)
- Tabela 4.2. Zestawienie wyników pośrednich obliczeń objętości spalin (opracowanie własne)
- Tabela 5.1. Zestawienie wyników obliczeń stopnia redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych (opracowanie własne)
- Tabela 5.2. Zestawienie wyników obliczeń objętości spalin oczyszczonych (opracowanie własne)
- Tabela 6.1. Zestawienie wyników obliczeń rzeczywistego strumienia objętości spalin (opracowanie własne)
- Tabela 6.2. Zestawienie wyników obliczeń strumienia objętości spalin w warunkach umownych przy rzeczywistej zawartości tlenu (opracowanie własne)
- Tabela 7.1. Zestawienie wariantów emitora oraz prędkości gazów odlotowych (opracowanie własne)
- Tabela 8.1. Standardy emisyjne z instalacji spalania i współspalania odpadów [8]
- Tabela 8.2. Zestawienie wyników emisji (opracowanie własne)
- Tabela 9.1. Zestawienie wyników S_{mm} względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.2. Zestawienie wyników maksymalnych z maksymalnych stężeń S_1 względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)

- Tabela 9.3. Zestawienie wyników maksymalnych z maksymalnych percentyli S_p względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.4. Zestawienie wyników maksymalnych z maksymalnych stężeń S_a względem rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.5. Zestawienie wymiarów geometrycznych emitora z odpowiadającymi im numerami wykresów (opracowanie własne)
- Tabela 9.6. Zestawienie wartości odniesienia rozpatrywanych substancji gazowych i pyłowych w powietrzu (opracowanie własne na podstawie [9])
- Tabela 9.7. Zestawienie wyników stężenia S_{mm} wyrażonego w procentach wartości odniesienia $40\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.8. Zestawienie wyników stężenia S_1 wyrażonego w procentach wartości odniesienia $40\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.9. Zestawienie wyników stężenia S_p wyrażonego w procentach wartości odniesienia $20\%D_1$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 9.10. Zestawienie wyników stężenia S_a wyrażonego w procentach wartości odniesienia $10\%D_a$ dla rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 10.1. Wybrane parametry rozpatrywanych składników gazów (opracowanie własne na podstawie [3])
- Tabela 10.2. Zestawienie wyników obliczeń dynamicznego współczynnika lepkości gazu (opracowanie własne)
- Tabela 10.3. Zestawienie wyników obliczeń gęstości gazu w warunkach rzeczywistych (opracowanie własne)
- Tabela 10.4. Zestawienie wyników obliczeń liniowych strat ciśnienia rozpatrywanych wariantów emitora (opracowanie własne)
- Tabela 11.1. Zestawienie wyników obliczonych stężeń dwutlenku węgla i liniowych strat ciśnienia (opracowanie własne)

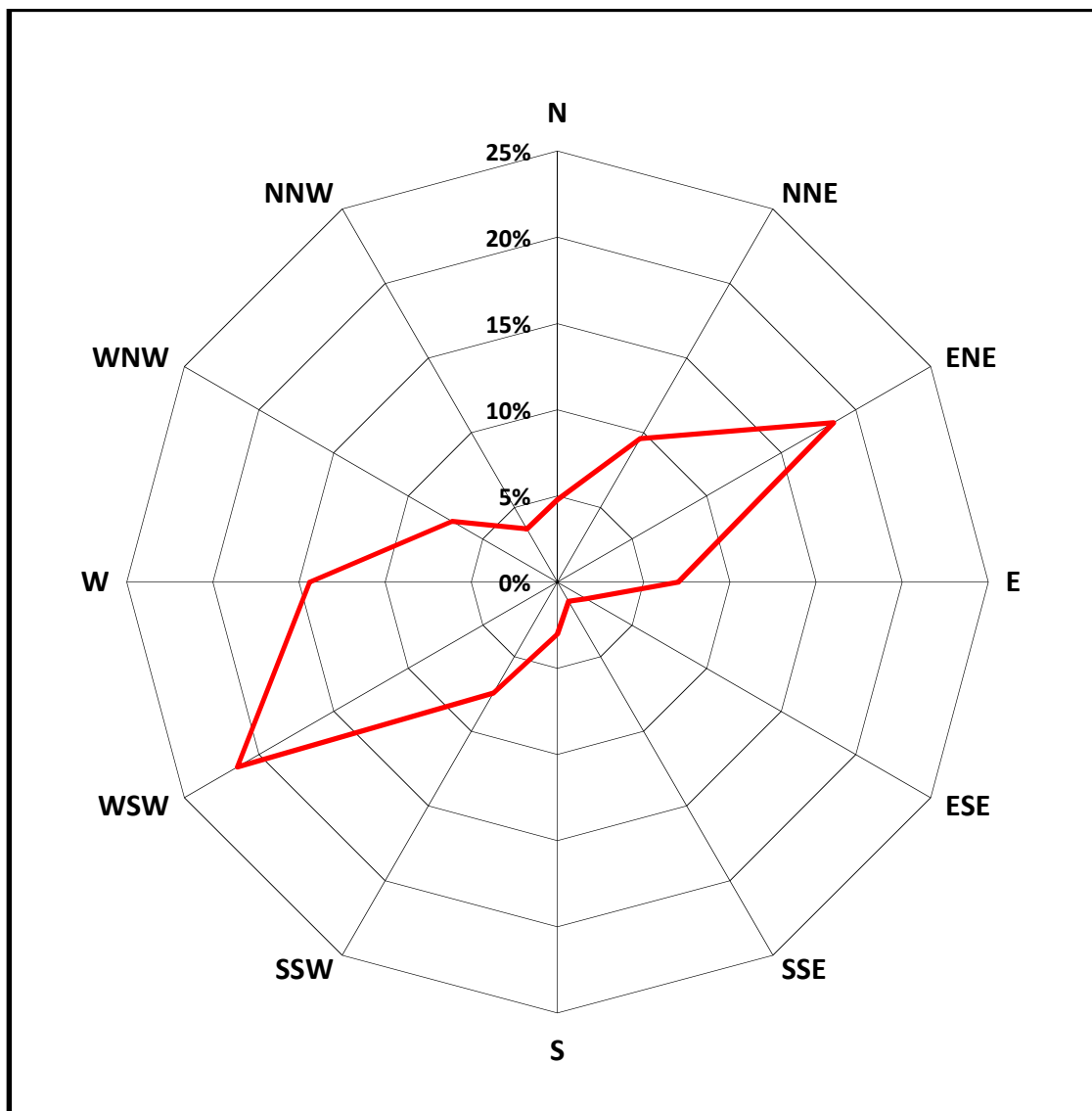
Załączniki:

- Załącznik 1** Roczna róża wiatru dla rejonu Krakowa
- Załącznik 2** Przestrzenny rozkład stężeń maksymalnych 1-jednogodzinnych NO₂ [μg/m³] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny D₁ = 200 μg/m³)
- Załącznik 3** Przestrzenny rozkład stężeń NO₂ na poziomie 99,8% percentyla ze stężeń 1-godzinnych NO₂ [μg/m³] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny D₁ = 200 μg/m³)
- Załącznik 4** Przestrzenny rozkład stężeń średniorocznych NO₂ [μg/m³] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny D_a = 40 μg/m³)
- Załącznik 5** Dołączony do pracy w formie elektronicznej

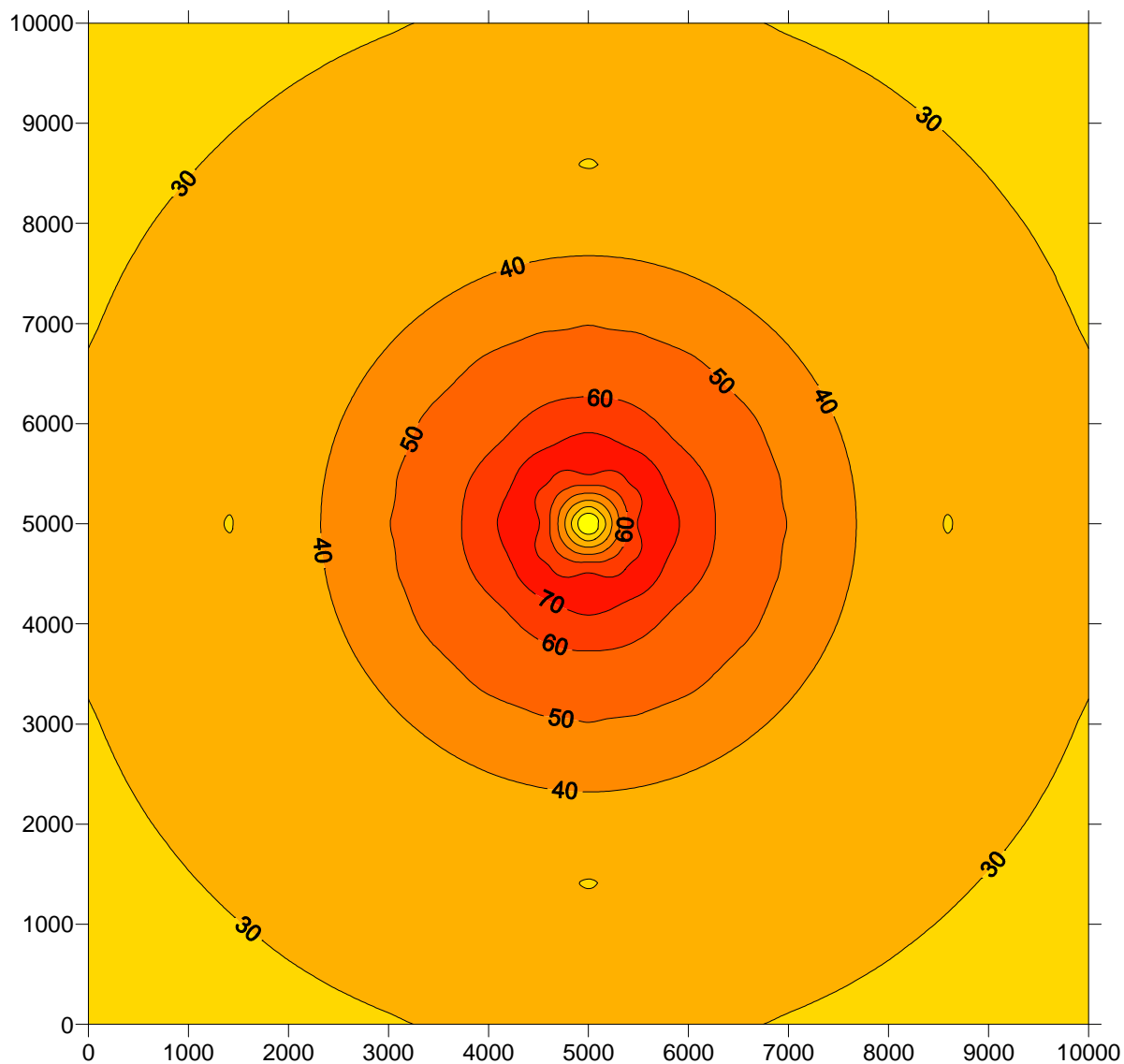
Spis zawartości załącznika 5

- 6.1 Wyniki obliczeń stężeń (S_m) substancji gazowej w powietrzu w wszystkich sytuacjach meteorologicznych dla rozpatrywanych wariantów emitora – plik Sm.ods
- 5.2 Wyniki Obliczeń stężeń substancji S₁ (uśrednione dla godziny), S_a (uśrednione dla roku), percentyli S_p (uśrednione dla godziny) w receptorach obliczeniowych dla wszystkich rozpatrywanych wariantów emitora – plik Zestawienie_wyników.ods

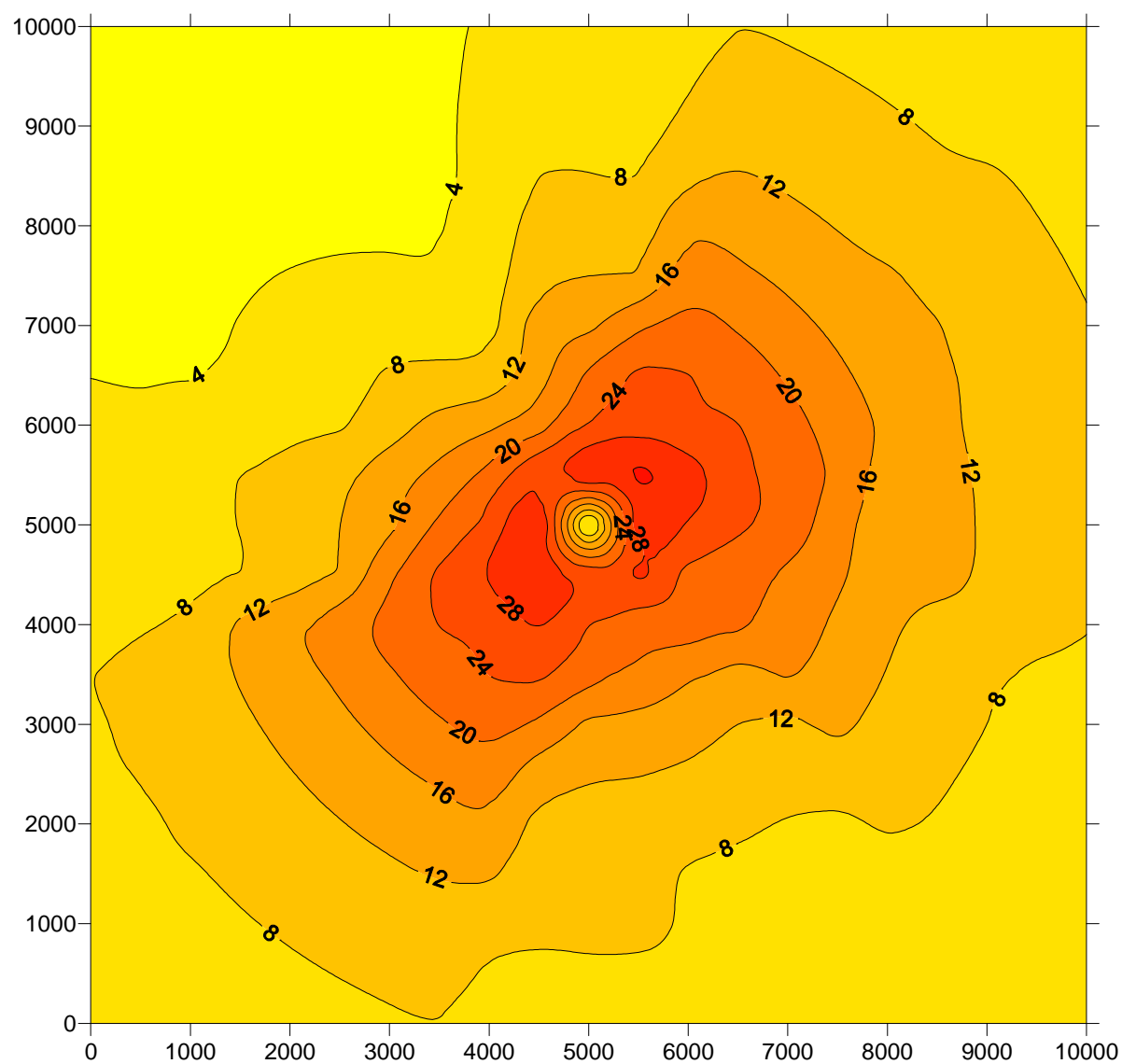
Załącznik 1 Roczna róża wiatrów dla rejonu Krakowa



Załącznik 2 Przewstrzenny rozkład stężeń maksymalnych 1-jednogodzinnych dwutlenku azotu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny $D_1 = 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)



Załącznik 3 Przewzrzeny rozkład stężeń NO₂ na poziomie 99,8% percentyla ze stężeń 1-godzinnych NO₂ [µg/m³] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny D₁ = 200 µg/m³)



Załącznik 4 Przewstrzenny rozkład stężeń średniorocznych NO₂ [μg/m³] na powierzchni terenu dla wariantu emitora W3.2 (poziom dopuszczalny D₁ = 40 μg/m³)

