

INNOVATIONS SUSTAINABILITY MODERNITY OPENNESS

SERIES OF MONOGRAPHS

TOM
45

ŚRODOWISKO

pod redakcją naukową
Ewy Szatyłowicz
Iwony Skoczko
Anny Justyny Werner-Juszczuk

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I NAUK O ŚRODOWISKU
POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ



POLSKIE ZRZESZENIE
TECHNIKÓW I INŻYNIERÓW
SANITARNYCH



INNOVATIONS – SUSTAINABILITY – MODERNITY – OPENNESS

ŚRODOWISKO

pod redakcją
Ewy Szatyłowicz
Iwony Skoczko
Anny Justyny Werner-Juszczuk

SERIA MONOGRAFII
TOM 45

BIAŁYSTOK 2023

Patronat



Politechnika Białostocka



**Politechnika
Śląska**

Politechnika Śląska



*Wydział Budownictwa
i Nauk o Środowisku
Politechniki Białostockiej*



*Studenckie Koło
Polskiego Zrzeszenia
Techników i Inżynierów
Sanitarnych*



*Polskie Zrzeszenie
Techników i Inżynierów
Sanitarnych*

INNOVATIONS – SUSTAINABILITY – MODERNITY – OPENNESS
ŚRODOWISKO

pod redakcją
Ewy Szatyłowicz
Iwony Skoczko
Anny Justyny Werner-Juszczuk

SERIA MONOGRAFII
TOM 45



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2023

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Marcin Dębowski
dr hab inż. Edyta Kudelek

Redaktor naukowy dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka:
dr hab. inż. Izabela Anna Tałałaj, prof. PB

Redakcja i korekta językowa:
Ewa Szatyłowicz
Iwona Skoczko
Anna Justyna Werner-Juszczuk

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów

Zdjęcie na okładce: ilyessuti
<https://pixabay.com/pl/photos/bonsai-drewno-amber-flora-makro-4634224/>

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2023

ISBN 978-83-67185-61-5 (eBook)
DOI: 10.24427/978-83-67185-61-5



Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Spis treści

Analiza jakości czekolad z zastosowaniem DSC i analizy tekstury <i>Karolina Bagińska, Piotr Tarasewicz, Magdalena Joka Yildiz</i>	6
Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego pyłem zawieszonym w miejscowości Supraśl <i>Marta Iwona Bolińska, Anna Siemieniuk</i>	24
Rozwiązania proekologiczne w budynkach uczelni wyższych <i>Bartosz Tomasz Choiński, Magdalena Joka Yildiz</i>	36
Metody badań właściwości fizyko-chemicznych węgla aktywnych <i>Remigiusz Gumiński, Łukasz Wincone, Adam Tabor, Renata Weygand</i>	69
Porównanie przydatności testów MTT i CellTiter-Glo stosowanych do oceny cytotoksyczności związków z grupy polifenoli <i>Piotr Malinowski, Klaudia Skala, Agata Jabłońska-Trypuć, Agata Koronkiewicz, Elżbieta Wołejko, Urszula Wydro, Grzegorz Świdorski, Włodzimierz Lewandowski</i>	76
Podstawy psychologii środowiskowej <i>Krzysztof Skoczko</i>	90
Analiza zanieczyszczeń powietrza z procesów przemysłowych w Polsce <i>Adam Tabor, Renata Weygand, Ewa Szatyłowicz</i>	100
Komfort pracy w biurze domowym z wentylacją mechaniczną – studium przypadku <i>Anna Justyna Werner-Juszczuk</i>	106

Analiza jakości czekolad z zastosowaniem DSC i analizy tekstury

*inż. Karolina Bagińska, inż. Piotr Tarasewicz, dr inż. Magdalena Joka Yildiz**

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

** e-mail: m.joka@pb.edu.pl*

Słowa kluczowe: DSC, analiza tekstury, czekolada, jakość żywności

Streszczenie: Badaniom poddano 16 czekolad, w tym 4 czekolady mleczne, 9 czekolad gorzkich i 3 czekolady z dodatkami. Dokonano analizy ich jakości z zastosowaniem kalorymetru skaningowego (DSC) oraz analizy tekstury przy użyciu teksturometru. Przedstawiono skład czekolady oraz opisano korelacje kakao i kwasów tłuszczowych pod względem konsystencji i właściwości produktu. Zwrócono również uwagę na stosowane przez producentów oszustwa, polegające na m.in. ograniczaniu zawartości kakao w czekoladach lub udziału kwasów, mające na celu zmniejszenie kosztów produkcji. Stwierdzono, że ilość tłuszczu oraz jego stan krystaliczny podczas produkcji wpływa na właściwości mechaniczne, reologiczne i cechy sensoryczne, oraz ma znaczenie, jeśli chodzi o stabilność przechowywania. Badania w różnicowym kalorymetrze skaningowym pokazują, że zawartość kakao oraz cukru wpływają na entalpię topnienia czekolady. Badania w teksturo-metrze wykazały brak korelacji między zawartością cukru, tłuszczu, zawartością masy kakaowej a twardością i pracą ścinania.

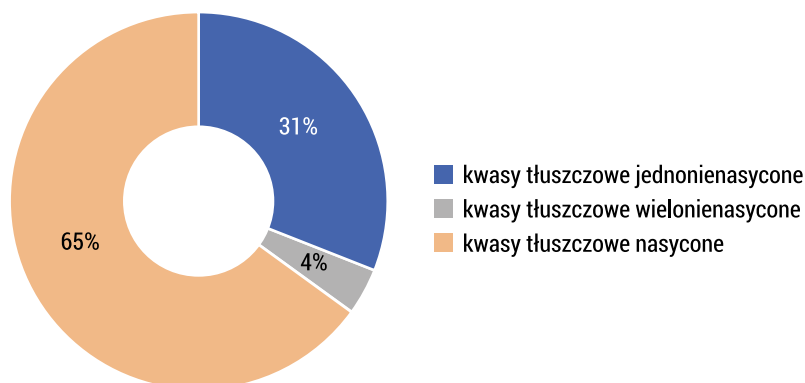
Wstęp

Główne składniki czekolad

Czekolada jest przysmakiem znanym już od 4 tysięcy lat, ciesząc się rosnącą popularnością. Wartość całkowitego rynku słodczy w całej Polsce to około 6 mld zł, z tego 5 mld zł stanowią wyroby czekoladowe, natomiast 1 mld zł cukierki. W 2017 r. oszacowano wartość polskiego rynku słodczy na 8,2 mld zł. Czekolady oraz praliny odpowiadają za prawie 40 procent rynku słodczy w Polsce.

Tłuszcz kakaowy, który nazywany jest również masłem kakaowym jest uznawany za jeden z najszlachetniejszych tłuszczów. Tłuszcz ten jest głównym składnikiem czekolady i polewy czekoladowej, który nadaje ogólny smak produktu. Największym bogactwem masła kakaowego jest wysokie stężenie składników o potężnym działaniu przeciwutleniającym, tzw. polifenoli, czyli antyoksydantów. Wiele kwasów tłuszczowych ma bardzo dobry wpływ na kondycję naszego organizmu. Masło kakaowe umożliwia zmniejszenie tzw. stresu oksydacyjnego oraz wpływa na lepszą kondycję skóry, zapobiegając powstawaniu zmarszczek, zmniejszeniu widoczności blizn i rozstępów, a także wpływa na polepszenie ogólnej kondycji skóry oraz jej wyglądu [www. 1].

Tłuszcz kakaowy (rys. 1) składa się z kwasów tłuszczowych wielonienasyconych (np. kwas linolowy), kwasów tłuszczowych jednonienasyconych (np. kwas oleinowy) oraz z nasyconych kwasów tłuszczowych (np. palmitynowy, stearynowy).



RYS. 1. Zestawienie składników tłuszczu kakaowego

ŹRÓDŁO: [2].

Miazga kakaowa to zmielone na jednolitą masę uprażone ziarna kakaowca, które zostały pozbawione łupin. Z miazgi uzyskuje się tłuszcz kakaowy i kuch kakaowy (inaczej kakao). Miazga kakaowa wraz z masłem kakaowym stanowią bazę czekolady [2].

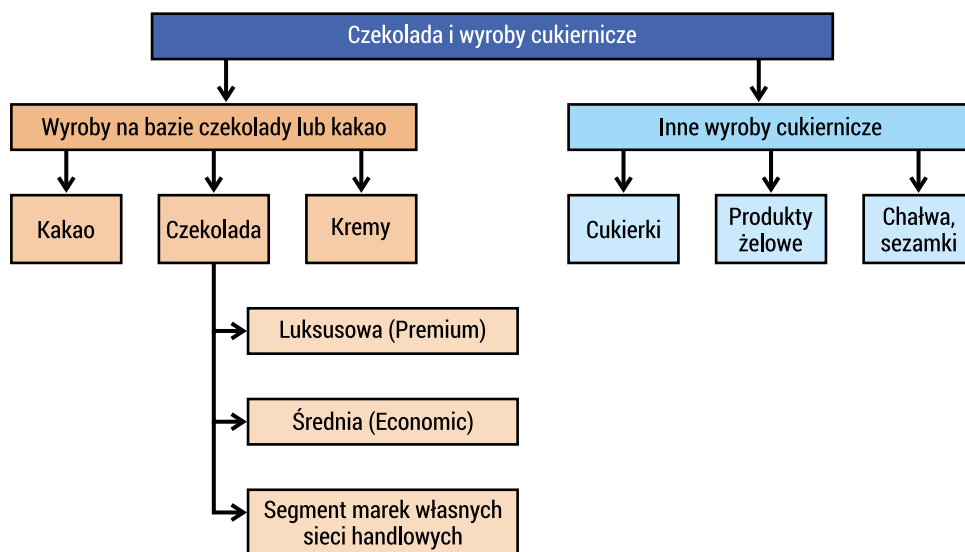
Ziarna kakaowe są to nasiona drzewa kakaowego o owalnym i wydłużonym kształcie o wymiarach: długość 10–25 cm, a szerokość 5–10 cm. W środku zawiera kilka rzędów nasion, zwykle od 5 do 8, a każde nasiono ma od 20 do 60 owoców kształtem przypominających migdały [3].

Podział czekolad dostępnych na rynku

Segment czekolady i wyrobów cukierniczych dzieli się na dwie grupy: wyroby na bazie czekolady lub kakao i inne wyroby cukiernicze (rys. 2).

Produkt premium to wizytówka producenta, co charakteryzuje zauważalnie wysoka cena, ekskluzywne opakowanie i selektywna dystrybucja. W produktach premium konkurują ze sobą najdroższe i najbardziej ekskluzywne marki, takie jak Lindt

czy Dove. Dodatkowo coraz więcej producentów średniej półki pretenduje do tego segmentu, kreując nową wizję, rozszerzając lub wzmacniając swój zasób produktów luksusowych. A co za tym idzie coraz szybciej rośnie sprzedaż wyrobów czekoladowych premium, które stanowią około 5% całkowitej sprzedaży czekolady. Czekolada economic, czyli tak zwana średnia półka, to produkty o przeciętnej cenie i dobrej jakości. Segment marek własnych sieci handlowych to wyroby o niskiej cenie i słabej jakości [5].



RYS. 2. Podział czekolad i wyrobów cukierniczych

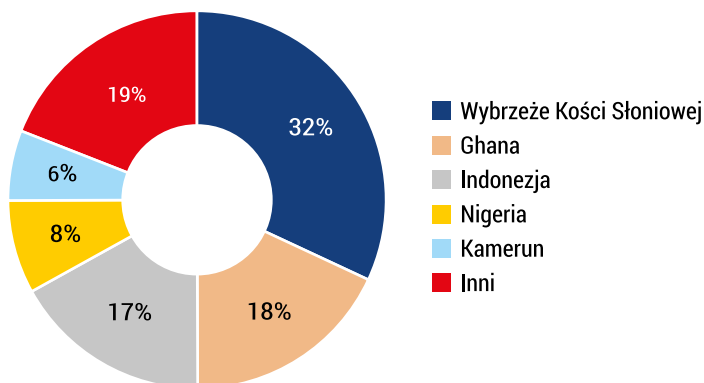
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Istnieją cztery podstawowe rodzaje czekolad:

- czekolada gorzka, która składa się z miazgi kakaowej, tłuszczu kakaowego i cukru, czasami z niewielką domieszką aromatu, np. wanilii. Ta czekolada powinna zawierać co najmniej 70% miazgi kakaowej. Ze względu na znaczną zawartość masy kakaowej i znikomą zawartość cukru (średnia zawartość cukru w czekoladzie gorzkiej jest dwukrotnie mniejsza niż w mlecznych. Czekolady o zawartości 90% kakao zawierają jedynie 7–11% cukru) gorzka czekolada przyjęta jest za najzdrowszą,
- czekolada mleczna, która obejmuje najwięcej 50% miazgi kakaowej, mimo to większość czekolad na rynku zawiera tylko 20%, ale za to jest bogata w mleko, a zawartość cukru dochodzi do 50%,
- czekolada deserowa – zawiera od 30% do 70% miazgi kakaowej, pozostałość to tłuszcz kakaowy, cukier i dodatki,
- czekolada biała – nie zawiera miazgi kakaowej, za to ma dużo tłuszczu kakaowego, cukru i mleka (niekiedy śmietanki), jak również wanilii. W najlepszych białych czekoladach jest tylko do 33% tłuszczu kakaowego [5].

Produkcja czekolady w Polsce i na świecie

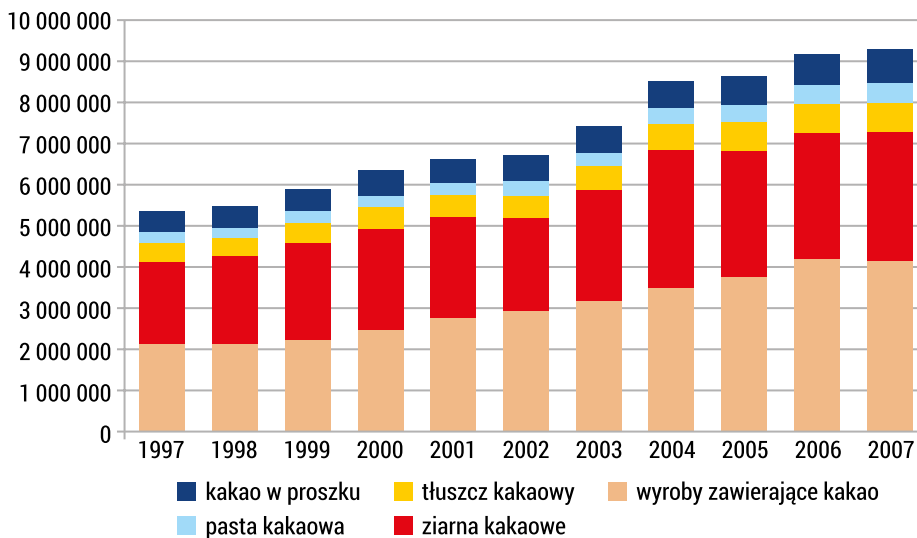
Drzewa kakaowe są obecnie uprawiane na powierzchni 8,9 mln hektarów w ponad 40 krajach na całym świecie. Najwięcej, ok. 70% plonów tego drzewa znajduje się w Afryce, około 20% w Azji, pozostałe 10% w Ameryce Południowej (rys. 3).



RYS. 3. Światowi producenci ziaren kakaowca

ŹRÓDŁO: [www. 2].

Światowy przywóz ziarna kakaowego (rys. 4), przetworzonych produktów kakaowych i wyrobów zawierających kakao osiągnął w 2007 r. poziom 9,3 mln ton, wzrastając w ciągu ostatniej dekady średnio o 6% rocznie.



RYS. 4. Światowy przywóz ziarna kakaowego, przetworzonych wyrobów kakaowych i produktów zawierających kakao, 1997–2007, w tonach

ŹRÓDŁO: [6].

Jeśli chodzi o mielenie ziarna kakaowego, to Europa jest liderem. Ponad 41% światowego przemiału odbywa się w Europie, osiągając wielkość 1,5 mln ton w roku 2008–2009. Łączna wielkość przemiału kakao w Europie w latach 2001–2006 wzrastała średnio o 7% rocznie.

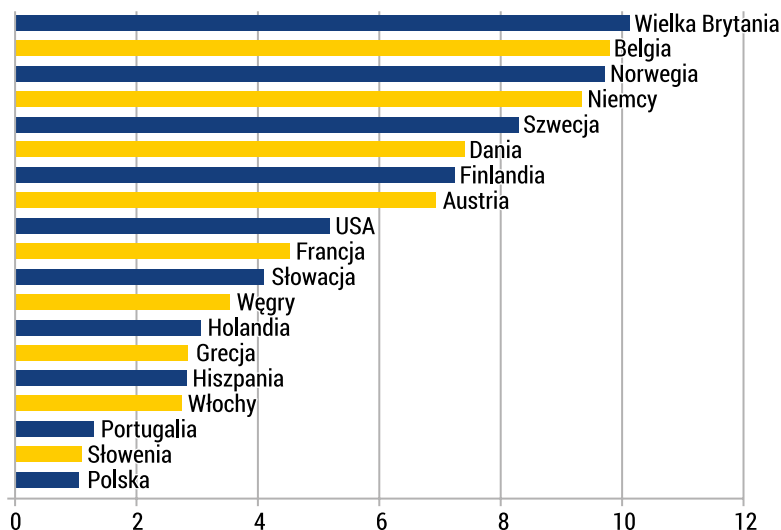
Największym w Europie i na świecie przedsiębiorstwem mielącym ziarno kakaowe jest Holandia, która w sezonie 2008–2009 zmieliła 475 000 ton ziarna, co stanowi 13% światowego przerobu. Drugie miejsce zajmują Niemcy, z przerobem wynoszącym 360 000 ton w latach 2008–2009. Na Holandię i Niemcy przypada łącznie 55% całego przemiału w Europie.

Kolejnymi największymi przedsiębiorstwami mielącymi ziarna kakaowe są Francja, Wielka Brytania, Włochy, Hiszpania oraz Belgia.

Stany Zjednoczone są drugim po Holandii producentem ziarna kakaowego na świecie, mieląc 400 000 ton ziarna kakaowego w latach 2008–2009, co stanowi 11% światowej produkcji.

Konsumpcja czekolady

Poziom konsumpcji wyrobów czekoladowych w Europie należy do najwyższych na świecie (rys. 5), a spożycie jest najwyższe w krajach Europy Północnej.



RYS. 5. Roczne spożycie czekolady na osobę w kg

ŹRÓDŁO: [6].

Powyższy rysunek pokazuje, że roczne spożycie na osobę w Wielkiej Brytanii (UK = United Kingdom), Belgii, Norwegii, Niemczech i Szwecji przekracza 8 kg, co znacznie przewyższa średnie spożycie na osobę w Stanach Zjednoczonych, wynoszące 5,18 kg.

Europa jest niezaprzeczalnie największym rynkiem ekologicznych ziaren kakaowych, przetwarzania i wytwarzania w celu uzyskania certyfikowanych wyrobów kakaowych i czekoladowych. W 2003 r. przywóz ekologicznego kakao do Europy oszacowano na 14 000 ton ziarna kakaowego. Europa przetwarza obecnie około 15–20 tysięcy ton ekologicznej czekolady rocznie.

Brytyjski rynek czekolady ekologicznej jest największy w UE, a jego sprzedaż osiągnęła 27,3 mln EUR w 2005 r., co oznacza roczny wzrost o 30% od 2002 r. Dla porównania, w tym samym okresie całkowity rynek czekolady w Wielkiej Brytanii wzrastał o zaledwie 1,5% rocznie. Według źródeł branżowych obecny rynek czekolady organicznej stanowi około 1,4% całego rynku czekolady w UK.

Wartość amerykańskiego rynku ekologicznej czekolady w 2007 r. wyniosła 70,8 mln USD, co stanowiło wzrost o 49% w porównaniu z rokiem 2006. Chociaż sprzedaż czekolady ekologicznej stanowi jedynie ułamek całego amerykańskiego rynku czekolady wartego 6 mld dolarów, w ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost popytu spowodowany rosnącą świadomością ekologiczną konsumentów. Podczas gdy rynek amerykański pozostaje mniejszy niż rynek europejski, rośnie on równie szybko lub szybciej niż rynek europejski. Sprzedaż ekologicznej czekolady wzrastała od 2002 r. o około 70% rocznie i potencjał rynku jest nadal duży. Firma Dagoba, założona w 2001 r., była pierwszym przedsiębiorstwem, które wprowadziło na rynek amerykański tabliczki czekolady ekologicznej [www. 3].

Zafałszowania czekolad

Bezpieczeństwo żywności, oszustwa żywnościowe oraz incydenty związane z obroną żywności mogą powodować fałszowanie żywności. Oszustwo żywności jest to celowe działanie w celu osiągnięcia korzyści ekonomicznych, podczas gdy incydent bezpieczeństwa żywności jest niezamierzonym działaniem z niezamierzonej szkody, a incydent obrony żywności jest celowym działaniem z celowej szkody.

Definicja zafałszowania jest określana przez Polską Federację Producentów Żywności jako „stosowanie dodatków do żywności niezgodnie z przepisami” [9].

Również definicją stosowaną w dokumentach wspólnotowych jest definicja: „termin złożony, który obejmuje zamierzone i umyślne zastąpienie, dodanie, manipulowanie lub wprowadzenie w błąd odnośnie do żywności, składników żywności lub opakowania żywności lub fałszywe, lub wprowadzające w błąd oświadczenia na temat produktu służące uzyskaniu korzyści gospodarczej” [8].

Na podstawie Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z 2002 r. czekolada powinna być otrzymywana z: wyrobów kakaowych, cukrów, których zawartość powinna wynosić nie mniej niż 35% suchej masy kakaowej, tłuszczu kakaowego, którego zawartość nie powinna być mniejsza niż 18% beztłuszczowej masy kakaowej, której zawartość nie powinna być mniejsza niż 14%.

Prawodawca zezwolił na dodanie do powyższych produktów tłuszczu roślinnego innego niż kakaowy, lecz nie może on zmniejszyć minimalnej zawartości tłuszczu

kakaowego oraz zawartości suchej masy kakaowej. W takim wypadku na opakowaniu powinno umieszczać się informacje o tym, że produkt zawiera inne tłuszcze roślinne oprócz tłuszczu kakaowego [9].

W celu sprawdzenia czy dana czekolada jest zafałszowana należy przeprowadzić analizę profilu kwasów tłuszczowych (tab. 1). Podstawą jest udział kwasów tłuszczowych w tłuszczu kakaowym, a następnie proporcja kwasu stearynowego do palmitynowego. W tłuszczu kakaowym zawartość kwasu stearynowego wynosi ok. 34%, kwasu palmitynowego zaś ok. 26%, więc wartość proporcji wynosi ok. 1,31.

TAB. 1. Zawartość podstawowych kwasów tłuszczowych w tłuszczu kakaowym izolowanym z ziarna kakaowego z różnych rejonów świata

Kraj	Kwasy tłuszczowe [%]							
	Palmitynowy		Stearynowy		Oleinowy		Linolowy	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Wybrzeże Kości Słoniowej	25,80	26,60	36,90	36,90	32,90	33,00	2,60	2,80
Ghana	25,30	25,46	36,69	37,60	32,70	32,99	2,51	2,80
Indonezja	24,10	25,13	36,88	37,30	33,06	34,30	2,50	2,70
Brazylia	25,10	27,90	33,30	33,80	34,50	36,50	3,50	3,60
Ekwador	25,20	25,60	34,62	36,00	34,60	34,91	2,60	3,04
Malezja	24,90	26,00	36,00	37,40	33,50	34,00	2,60	3,00

ŹRÓDŁO: [5].

Materiały badawcze

Do badań użyto szesnastu czekolad o różnych zawartościach kakao i tłuszczu. Poniżej przedstawiono skład każdej czekolady (100 g) wykorzystanej w badaniu, m.in. wartość energetyczną, zawartość tłuszczu, cukru, węglowodanów.

Czekolady mleczne

Tabela 2 przedstawia skład czterech czekolad mlecznych użytych do przeprowadzenia badania.

TAB. 2. Skład czekolad mlecznych

	C1	C2	C3	C4
Wartość energetyczna [kcal]	524	515	530	552
Tłuszcz [g/100 g]	29	27	30	34
Kwasy tłuszczowe nasycone [g/100 g]	18	17	19	21

	C1	C2	C3	C4
Węglowodany [g/100 g]	60	62	58	53
Cukry [g/100 g]	63	60	57	53
Białko [g/100 g]	3,39	4,4	6	6,6
Sól [g/100 g]	0,4	0,25	0,25	0,26

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Czekolady gorzkie

Tabela 3 przedstawia skład dziewięciu czekolad gorzkich użytych do przeprowadzenia badania.

TAB. 3. Skład czekolad gorzkich

	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
Wartość energetyczna [kcal]	562	501	502	551	503	558	589	558	590
Tłuszcz [g/100 g]	37	28	32	39	39	45	48	44	51
Kwasy tłuszczowe nasycone [g/100 g]	22	18	20	24	24	27	29	28	31
Węglowodany [g/100 g]	49	52	39	34	34	21	25	17	8
Cukry [g/100 g]	48	48	35	30	0,8	16	19	11	1
Białko [g/100 g]	5,8	6	8,4	10	9,7	10	8,6	15	15
Sól [g/100 g]	0,08	0,13	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,06

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Czekolady z dodatkami

Tabela 4 przedstawia skład trzech czekolad mlecznych i gorzkich zawierających dodatki w postaci orzechów bądź innych składników.

TAB. 4. Skład czekolady z dodatkami

	C14	C15	C16
Wartość energetyczna [kcal]	538	567	530
Tłuszcz [g/100 g]	31	38	35
Kwasy tłuszczowe nasycone [g/100 g]	16	21	20
Węglowodany [g/100 g]	54	45	40
Cukry [g/100 g]	51	44	29
Białko [g/100 g]	9,2	7,2	9,3
Sól [g/100 g]	0,36	0,07	0,02

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Metody badawcze

Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC)

Eksperyment wchodzący w zakres niniejszej pracy przeprowadzono z zastosowaniem różnicowego kalorymetru skaningowego DSC TA Instruments Q2000 (rys. 6). Główne parametry techniczne urządzenia zostały umieszczone w tabeli 5.



RYS. 6. Różnicowy kalorymetr skaningowy (DSC)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TAB. 5. Główne cechy techniczne DSC TA Instruments Q2000

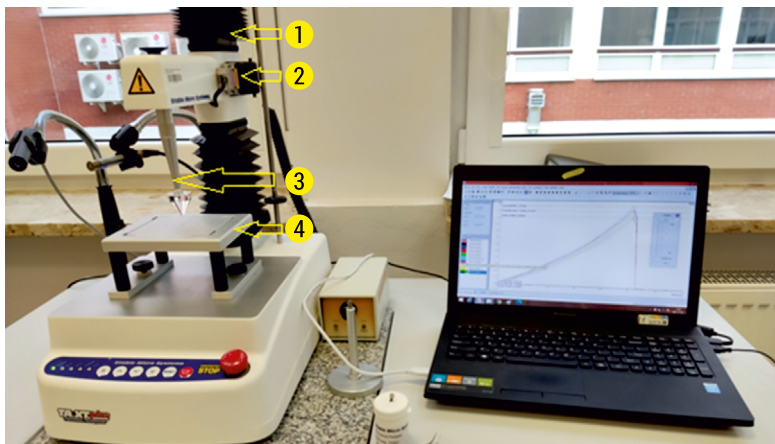
Specyfikacja urządzenia	
Zakres temperatur	-90 do 725°C
Dokładność temperaturowa	±0,1%
Wielkość próbki	5–50 mg
Szybkość ogrzewania	0,1 do 10°C/min
Krzywizna linii podstawowej	10μW
Pojemniki na próbki	aluminiowe
Atmosfera kontrolowana	azot

ŹRÓDŁO: dane producenta.

Próbka rozdrobnionej wcześniej czekolady o masie $11,5 \pm 0,1$ mg została umieszczona w specjalnym aluminiowym tyglu, który umieszcza się na dysku termoelektrycznym otoczonym piecem. Próbka była podgrzewana od temperatury 25°C do temperatury 200°C przy prędkości 10 K/min. Gdy temperatura pieca się zmieni, ciepło jest przekazywane do próbki poprzez dysk termoelektryczny.

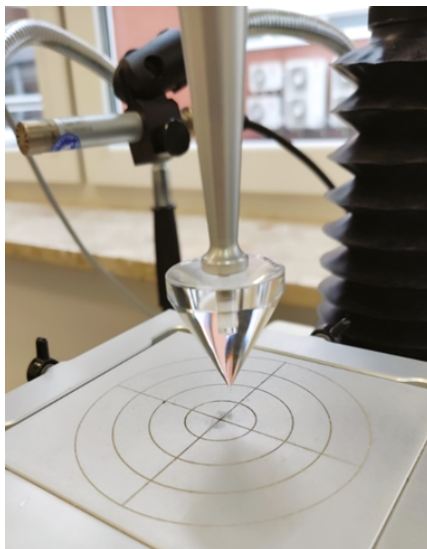
Analiza tekstury

Eksperyment wchodzący w zakres niniejszej pracy przeprowadzono z zastosowaniem Teksturometru TA.XTExpress (rys. 7). Główne parametry techniczne urządzenia zostały umieszczone w tabeli 6.



RYS. 7. Teksturometr TA.XTExpress: 1 – suwnica, 2 – ogniwo obciążnikowe, 3 – przyrząd pomiarowy (stożek ze szkła akrylowego), 4 – podstawa

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 8. Stożek ze szkła akrylowego 60°

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Oprzyrządowanie do badania smarowności TTC to zestaw precyzyjnie dobranych stożków wykonanych ze szkła akrylowego.

Po rozpoczęciu badania sonda ze stożkiem (rys. 8) zbliża się do kostki czekolady, a następnie wnika w nią i kontynuuje do głębokości 1 mm powyżej powierzchni uchwytu próbki, tj. sonda przemieszcza się na odległość 23 mm od punktu początkowego. Podczas penetracji obserwuje się wzrost siły aż do punktu maksymalnej głębokości penetracji. Ta wartość siły może być przyjęta jako „twardość” na tej określonej głębokości. Twardsza próbka wykazuje również odpowiednio większy obszar, który reprezentuje całkowitą wartość siły wymaganej do przeprowadzenia procesu ścinania. Następnie sonda wycofuje się z próbki.

TAB. 6. Główne cechy techniczne teksturometru TA.XTEExpress

Specyfikacja urządzenia	
Prędkość przed badaniem	1,00 mm/s
Prędkość badania	1,00 mm/s
Prędkość po badaniu	10,00 mm/s
Głębokość	1,00 mm
Typ wyzwalacza	Automatyczny (siłowy)
Siła wyzwalająca	5,0 g

ŹRÓDŁO: dane producenta.

Wyniki badań

Analiza termiczna DSC

W tabeli 7 przedstawiono wyniki pomiarów za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej oraz dodatkowo skład tłuszczu i cukru, który umożliwi dalszą analizę.

Pierwszy pik endotermiczny może być spowodowany topnieniem niskotopliwych triacylogliceroli (o dużej zawartości nienasyconych kwasów tłuszczowych), a drugi pik może być wynikiem zawartości tłuszczu mlecznego, który ma niższą temperaturę topnienia niż masło kakaowe [4]. Pik II osiągnięty został tylko w przypadku czterech czekolad.

W momencie zajścia reakcji bądź przemiany fazowej linia podstawowa (bazowa) termogramu przekształca się w pik. Jest to część krzywej, która odchyła się od linii podstawowej, by później do niej wrócić. Gdy temperatura badanej próbki jest niższa od wzorcowej, tworzy się wtedy pik endotermiczny, natomiast gdy temperatura próbki wzrasta powyżej temperatury próbki wzorcowej, powstaje wtedy pik egzotermiczny [7]. Tym samym metoda DSC pozwala na określenie ilości dostarczonego

lub odebranego ciepła od próbki (w stosunku do naczynia referencyjnego) w zadanym reżimie temperaturowym.

W ramach niniejszych analiz obserwowano przemiany o charakterze endotermicznym, które stanowiły topnienie poszczególnych składników czekolad (tłuszczu kakaowego, cukru oraz kakao).

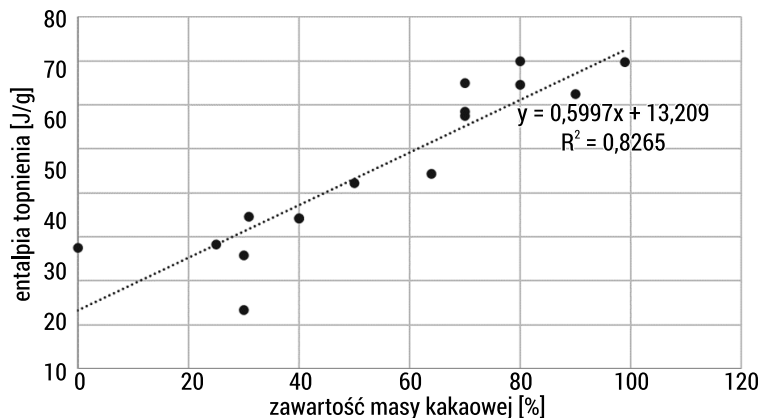
TAB. 7. Skład czekolad oraz ich wyniki badań za pomocą DSC

Próba	Zawartość masy kakaowej [%]	Zawartość tłuszczu [%]	Zawartość cukru [%]	Pik 1		Pik 2	
				Temp. max. [°C]	Entalpia [J/g]	Temp. max. [°C]	Entalpia [J/g]
C1	0	29	63	26,62	27,52	–	–
C2	25	27	60	27,44	28,21	–	–
C3	30	30	57	26,7	25,77	–	–
C4	31	34	53	31,96	34,64	144,64	62,9
C5	40	37	48	31,82	34,3	159,74	59,99
C6	50	28	48	29,15	42,16	–	–
C7	64	32	35	29,09	44,43	176,77	48,95
C8	70	39	30	34,24	58,51	176,14	39,55
C9	70	39	0,8	27,41	65,07	–	–
C10	80	45	16	27,43	69,96	–	–
C11	80	48	19	29,18	64,5	–	–
C12	90	44	11	28,2	62,49	–	–
C13	99	51	1	27,32	69,76	–	–
C14	30	31	51	31,67	13,44	–	–
C15	40	38	44	31,49	34,21	–	–
C16	70	35	29	33,61	57,48	–	–

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiono opracowane zależności liniowe właściwości termicznych czekolad w zależności od ich składu deklarowanego przez producenta.

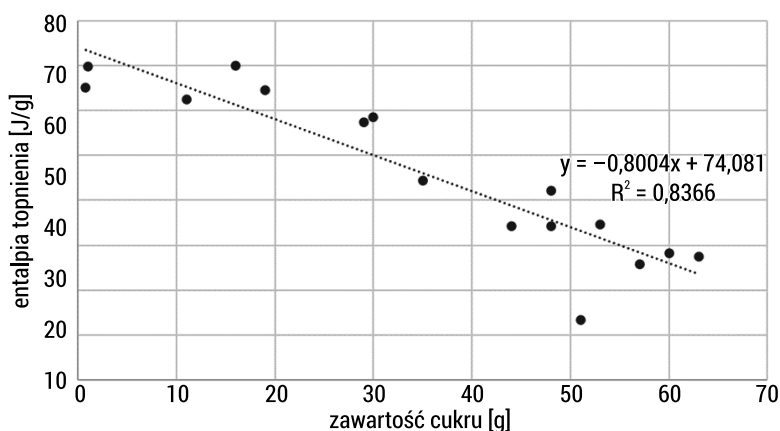
Rysunek 9 przedstawia zależność zawartości kakao od entalpii topnienia. Korelacja wynosi ok. 0,8, można więc stwierdzić, że zawartość kakao wpływa na topnienie czekolady. Patrząc na tabelę 7, w której przedstawiono skład czekolad, widzimy, że im większa zawartość masy kakaowej, tym większa zawartość tłuszczu, zatem zawartość tłuszczu może wpływać na charakterystykę topnienia wyrobu końcowego. Może to być spowodowane obecnością tłuszczu innego niż kakaowy, np. mlecznego, który ma niższą temperaturę topnienia niż masło kakaowe [4].



RYS. 9. Zależność zawartości kakao [g] do entalpii topnienia [J/g]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Rysunek 10 przedstawia zależność liniową zawartości cukru od entalpii topnienia. Cukier może występować w dwóch postaciach, amorficznej i krystalicznej, o różnych właściwościach fizyko-chemicznych, a co za tym idzie o różnej temperaturze topnienia. Cukry obecne w czekoladzie mogą absorbować nadmiar wody, co również może znacząco wpływać na właściwości topnienia czekolady [4]. Współczynnik korelacji R^2 zawartości cukru od entalpii topnienia plasuje się na wysokim poziomie ok. 0,83, jednak tendencja jest malejąca: im więcej cukru tym entalpia topnienia tłuszczu kakaowego jest niższa. Powodem zaistniałego zjawiska jest konkurencyjność zawartości cukru do tłuszczu kakaowego, tj. im mniej tłuszczu jest w składzie czekolady, tym wyższą zaobserwowano zawartość cukru.



RYS. 10. Zależność zawartości cukru [g] do entalpii topnienia [J/g]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Analiza tekstury

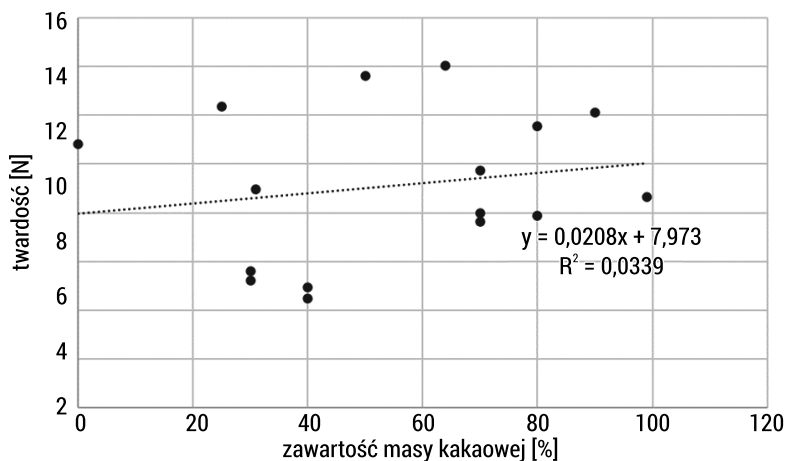
W tabeli 8 przedstawiono wyniki pomiarów twardości oraz pracy ścinania za pomocą Teksturometru TA.XT oraz dodatkowo skład tłuszczu i cukru, który umożliwi dalszą analizę.

TAB. 8. Wyniki pomiarów twardości oraz pracy ścinania za pomocą Teksturometru TA.ETExpress oraz skład tłuszczu i cukru

Czekolada	Zawartość masy kakaowej [%]	Zawartość tłuszczu [%]	Zawartość cukru [%]	Twardość [N]	Praca ścinania [N/s]
C1	0	29	63	10,81	4,82
C2	25	27	60	12,37	5,49
C3	30	30	57	5,21	2,38
C4	31	34	53	8,97	3,59
C5	40	37	48	4,48	2
C6	50	28	48	13,63	5,36
C7	64	32	35	14,05	3,68
C8	70	39	30	9,74	4,26
C9	70	39	0,8	7,65	3,32
C10	80	45	16	7,88	3,55
C11	80	48	19	11,55	3,92
C12	90	44	11	12,1	2,63
C13	99	51	1	8,65	3,91
C14	30	31	51	5,6	2,6
C15	40	38	44	4,94	2,19
C16	70	35	29	8	3,5

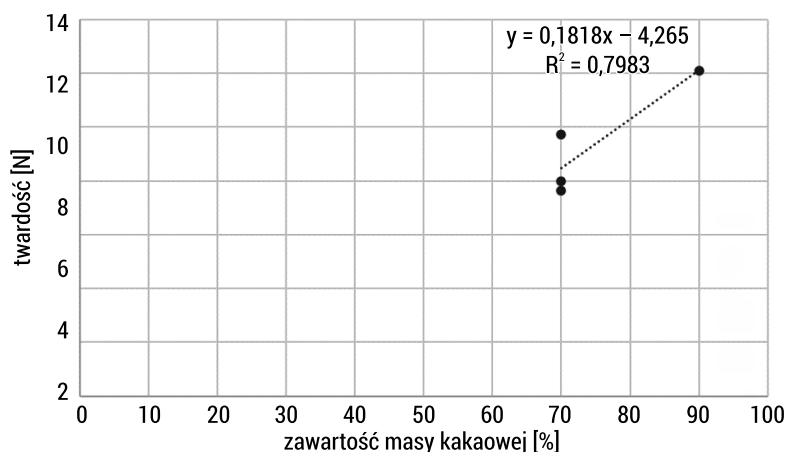
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Rysunek 11 przedstawia zależność między zawartością masy kakaowej a twardością czekolad. Rysunek ten ukazuje zależność wszystkich czekolad, natomiast rysunek 12 tylko czekolady z jednej firmy i tu uzyskano korelacje. Są to cztery następujące czekolady: C8, C9, C12, C16. Patrząc na wykres, widzimy, że im większa zawartość kakao, tym twardsza jest czekolada. Wraz z zawartością kakao rośnie zawartość białka, co może wpływać na twardość czekolady. Czekolady gorzkie mają blisko dwukrotnie większą ilość białka niż czekolady mleczne [1].



RYS. 11. Zależność zawartości masy kakaowej [%] do twardości [N]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

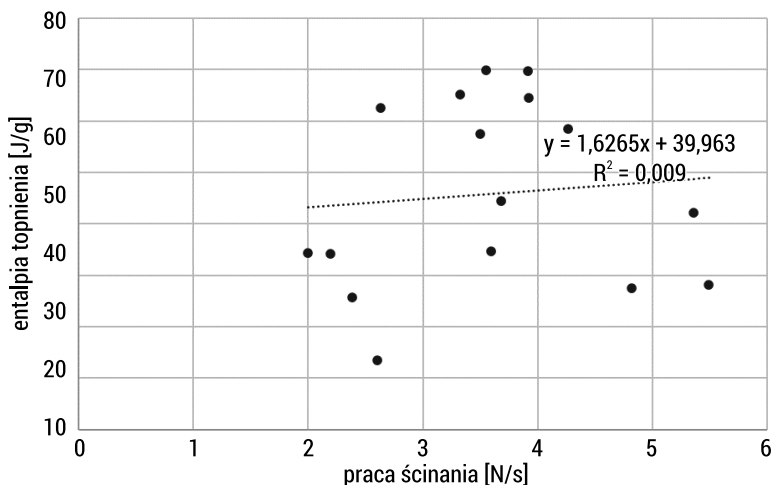


RYS. 12. Zależność zawartości masy kakaowej [g] do twardości czekolady [N]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

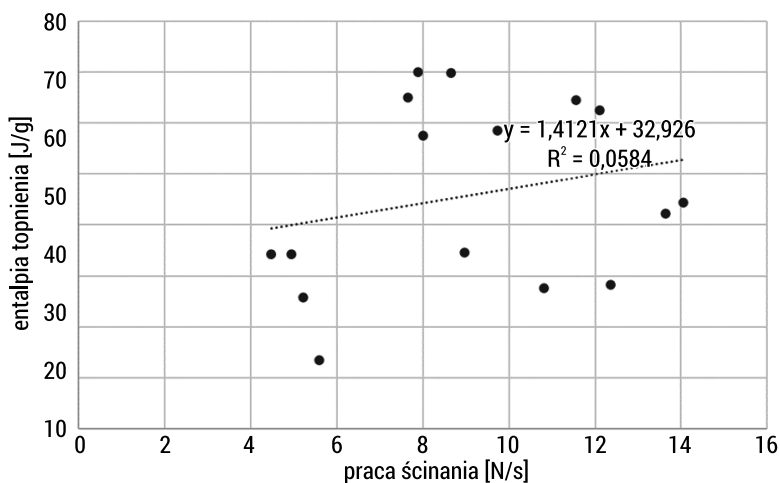
Kolejne wykresy przedstawiają zestawienie obu badań, zarówno różnicowego kalorymetru skaningowego, jak i teksturometru.

Biorąc pod uwagę wszystkie czekolady oraz czekolady z konkretnej firmy, nie uzyskano korelacji między entalpią topnienia i twardością (rys. 14) oraz między entalpią topnienia i pracą ścinania (rys. 13). Patrząc na oba wykresy, nie uzyskano korelacji. Na właściwości topnienia wpływają między innymi zawartość kwasów nasyconych i nienasyconych, zawartość cukru, tłuszczu bądź kakao.



RYS. 13. Zależność pracy ścinania [N/s] do entalpii topnienia [J/g]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 14. Zależność twardości [N] do entalpii topnienia [J/g]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Podsumowanie i wnioski

Na właściwości topnienia wpływa zawartość nasyconych i nienasyconych kwasów tłuszczowych. Ilość tłuszczu oraz jego stan krystaliczny podczas produkcji decyduje o właściwościach topnienia czekolady, wpływa to na właściwości mechaniczne,

reologiczne i cechy sensoryczne oraz ma znaczenie, jeśli chodzi o stabilność przechowywania. Nie bez znaczenia jest również dodatek emulgatorów, one także wpływają na właściwości reologiczne, zwiększają wrażliwość czekolady na temperaturę i wilgoć.

Biorąc pod uwagę skład czekolad (tab. 2, tab. 3, tab. 4), można zauważyć, że przy wzroście zawartości masy kakaowej automatycznie maleje zawartość cukru, natomiast wzrasta tłuszcz oraz białko.

Badania w różnicowym kalorymetrze skaningowym pokazują, że zawartość kakao oraz cukru wpływa na entalpię topnienia czekolady. Wraz z zawartością kakao wzrasta również zawartość tłuszczu, co może przyczynić się do topnienia wyrobu końcowego. Taki efekt może być spowodowany zawartością innego tłuszczu, np. mlecznego, który ma niższą temperaturę topnienia niż tłuszcz kakaowy. Jak zostało to sprawdzone przez [8], cukier może występować w dwóch różnych postaciach, amorficznej i krystalicznej, które mają różne właściwości fizyko-chemiczne, a co za tym idzie mają różną temperaturę topnienia.

Badania w teksturometrze wykazały brak korelacji między zawartością cukru, tłuszczu, zawartością masy kakaowej a twardością i pracą ścinania.

Literatura

- [1] Kowalska J., Małoszewska E., 2009, *Ocena towaroznawcza czekolad wysokokakaowych*, „Nauka. Przyroda. Technologie” 2009, t. 3, z. 4, #141.
- [2] Kurowska E., *Tłuszcz kakaowy*, Poznaj się na tłuszczach, 2017.
- [3] Kwiatkowska-Sienkiewicz K., *Problemy związane z kontenerowym transportem ziarna kakaowego*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” 2008, nr 1, 70–71.
- [4] Ostrowska-Ligęza E. et al., *A comparative study of thermal and textural properties of milk, white and dark chocolates*, „Thermochimica Acta” 2019, vol. 671, 60–69.
- [5] Owczarek B.M., *Analiza rynku czekolady w Polsce*, 2017.
- [6] Pay E., *The market for organic and fair-trade coco*, study prepared in the framework of FAO project GCP/RAF/404/GER „Increasing incomes and food security of small farmers in West and Central Africa through exports of organic and fair-trade tropical products”, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2009.
- [7] Schawe J., *Analiza termiczna. Interpretacja krzywej (cz. I)*, „LAB Laboratoria, Aparatura, Badania” 2016, nr 21, 38–43.
- [8] Spink J., Moyer D., *Defining the Public Health Threat of Food Fraud*, „Journal of Food Science” 2011, vol. 76, 157–163.
- [9] Suwała G., *Identyfikacja fałszowania frakcji tłuszczowej wybranych czekolad*, „Żywność. Nauka. Technologia. Jakość” 2020, nr 27, 142–155.

Strony internetowe

- [www. 1] <https://bemuke.pl/product-pol-17814-TLUSZCZ-KAKAOWY-BIO-na-wage.html> (dostęp dn.: 2.01.2022).
- [www. 2] <https://kobieco.pl/leczenie-anemii-naturalnymi-sposobami/> (dostęp dn.: 3.01.2022).
- [www. 3] <https://party.pl/porady/biala-czekolada-wlasciwosci-i-kalorie-102664-r1/> (dostęp dn.: 3.01.2022).

Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego pyłem zawieszonym w miejscowości Supraśl

inż. Marta Iwona Bolińska, dr inż. Anna Siemieniuk, prof. PB

*Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku,
Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska
e-mail: boli-boli@wp.pl, a.siemieniuk@pb.edu.pl*

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, pyły PM_{2,5}, pyły PM₁₀

Streszczenie: Działania antropogeniczne powodują zmiany klimatu, a co za tym idzie anomalie pogodowe. Zdarzały się one w ubiegłych wiekach, lecz naruszanie środowiska, zanieczyszczanie atmosfery i niszczenie naturalnych systemów ochronnych planety, takich jak warstwa ozonowa, powodują ich znaczne nasilenie i zwiększenie częstotliwości. Powodzie, susze, topnienie lodowców, podwyższenie średniej temperatury powierzchni Ziemi – na to wszystko człowiek miał i ma znaczący wpływ. Niniejsza praca przedstawia analizę zanieczyszczeń pyłowych powietrza w miejscowości Supraśl. W celu określenia skali tego zjawiska przeprowadzono badania jakości powietrza według określonej metodyki pomiarowej. Po zestawieniu wyników poszczególnych parametrów dokonano ich analizy, przeprowadzono dyskusję i wyciągnięto odpowiednie wnioski.

Wstęp

Człowiek jako element natury mający wysoką inteligencję i samoświadomość traktuje środowisko jako coś pewnego. Bardzo często nie zdaje sobie sprawy z konsekwencji swoich działań albo, co gorsza, ignoruje je i kontynuuje swoje działania, wiedząc, że wyniszcza wszystko dookoła siebie. W wyniku rozwoju technologicznego, industrializacji i przedkładania swoich potrzeb nad dobro środowiska naturalnego dewastuje je i niszczy szeroko pojęte życie. Odbiera mu możliwość samoregeneracji,

a dostosowanie się do wprowadzonych w bardzo krótkim czasie zmian jest niemal niemożliwe. Główny problem stanowi emisja zanieczyszczeń do środowiska. Zanieczyszczenia powietrza w głównej mierze są dziełem ludzkim. To nie są tylko substancje obce wprowadzone do atmosfery, lecz również jego składniki podstawowe, występujące w ilościach większych niż w warunkach naturalnych (Szklarczyk 2001). Są one emitowane podczas wielu procesów technologicznych oraz podstawowych działań człowieka warunkujących jego życie.

Źródła zanieczyszczeń powietrza

Za znaczącą ilość emitowanych zanieczyszczeń do powietrza odpowiada człowiek. Wynika to z nieustającej urbanizacji, konieczności zasilania urządzeń niezbędnych do funkcjonowania społeczności, jak również samego charakteru ludzkości, której nieodzowną cechą jest konsumpcjonizm. Tym samym wśród źródeł zanieczyszczeń powietrza można wymienić (Mazurek, Badyda 2018):

- transport – zaliczają się tutaj takie formy, jak transport drogowy, szynowy, wodny śródlądowy, morski, powietrzny; emisję powoduje spalanie paliw, które służą do napędzania pojazdów, rzadziej zanieczyszczenia pochodzą z przewożonych towarów bądź przy niszczeniu części pojazdów,
- produkcja energii i jej dystrybucja do odbiorców – mowa tutaj o elektrowniach i zakładach produkujących energię na mniejszą skalę; podczas pozyskiwania energii powstają gazy i pyły, które wraz z dymem, oparami, a niekiedy podczas usuwania popiołów (jest to materiał lekki, łatwo brudzący, pyłący) trafiają do atmosfery; wynika to z faktu, że większość elektrowni opiera się na spalaniu paliw takich jak węgiel i gaz; wyjątek stanowią elektrownie opierające się na źródłach odnawialnych (tzw. elektrownie niekonwencjonalne), takich jak energia słoneczna, energia wiatru, pływów; są to CO, CO₂, tlenki azotu i siarki – podobnie jak w przypadku transportu,
- procesy technologiczne podczas produkcji – w trakcie wytwarzania różnorodnych produktów powstają odpady, ścieki i nierzadko dymy, które muszą być usuwane z hal produkcyjnych i z urządzeń; w przypadku zanieczyszczeń lotnych najczęściej są to substancje pochodzące z palenisk, pieców do wytapiania metali, opary z termicznej obróbki półproduktów i wiele innych; są to w głównej mierze lotne związki organiczne, metale ciężkie, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, pochodne dioksyn i furanów,
- ogrzewnictwo – budynki mieszkalne, jak również budowle użyteczności publicznej muszą być wyposażone w źródła ogrzewania; najczęściej stanowią je kotły do spalania paliw, takich jak węgiel, gaz ziemny, olej opałowy, drewno; w praktyce w wielu mniejszych miejscowościach, gdzie w budynkach znajdują się kotły starego typu o otwartej komorze spalania, w których spalano również śmieci,

na przykład gazety, opakowania papierowe, drobne tworzywa sztuczne – innymi słowy wszystko to, co obsługujący kocioł był w stanie podać do paleniska; mają temu zapobiegać najnowsze przepisy, między innymi ustawa antysmogowa; tutaj zbiór zanieczyszczeń może być bardzo zróżnicowany, w zależności od opału wykorzystywanego w kotłach, na pewno pojawiają się CO, CO₂, a nawet dwutlenek siarki, dioksyny i metale ciężkie (tusz z zadrukowanych gazet).

Wymienione źródła stanowią grupę zanieczyszczeń antropogenicznych (Seigneur 2019), czyli takich, których źródłem jest bezpośrednia działalność człowieka. Są to cztery grupy, których udział w emisji zanieczyszczeń jest największy.

Drugą grupę zanieczyszczeń stanowią zanieczyszczenia naturalne. Występują one w środowisku samoistnie, jako naturalne przemiany substancji organicznych, albo w wyniku anomalii i klęsk żywiołowych. Mowa tutaj o gniciu substancji organicznych, czyli o ich rozkładzie przez mikroorganizmy, pyłkach roślin, wirusach i bakteriach jako zanieczyszczeniu mikrobiologicznym, trąbach powietrznych roznoszących piaski i pyły, wybuchach wulkanów i pożarach lasów (Rutkowski 1993).

Ze względu na skalę wydzielania zanieczyszczeń do powietrza można wyróżnić (Juda-Rezler 2000, Maciak 2003):

- emisję punktową (źródła punktowe) – emisja pochodzi z konkretnych punktów, miejsc o małej powierzchni, chociażby z kominów w budynkach mieszkalnych,
- emisję powierzchniową (źródła powierzchniowe) – zanieczyszczenia są emitowane do powietrza całymi powierzchniami o znaczącej wielkości, mogą to być hałdy odpadów bądź składowany na wolnym powietrzu wydobyty węgiel, ale też duże powierzchnie płonące, na przykład lasy,
- emisję liniową (źródła liniowe) – tutaj można zaobserwować pewną trasę, na której długości emitowane są zanieczyszczenia; innymi słowy, są to chociażby drogi kolejowe, trasy międzymiastowe, autostrady – na ich długości poruszają się pojazdy, które nieprzerwanie wytwarzają spaliny.

Rodzaje zanieczyszczeń powietrza

W Polsce określa się stopień zanieczyszczenia powietrza poprzez monitoring i ocenę zawartości substancji gazowych, zanieczyszczeń pyłowych i zanieczyszczeń oznaczanych w pyłe. Należą do nich dwutlenek siarki SO₂, dwutlenek azotu NO₂, tlenek węgla CO, benzen C₂H₆, ozon O₃, pył zawieszony PM₁₀, pył zawieszony PM_{2,5}, metale ciężkie, czyli ołów, kadm, nikiel, arsen oraz benzoapiren – jeden z przedstawicieli WWA (Maciak 2003, Kleczkowski 2020). Na podstawie zbadania zawartości wymienionych wskaźników w powietrzu można dokonać kompleksowej oceny jakości powietrza.

Najczęściej dokonuje się badania pyłów zawieszonych PM₁₀ i PM_{2,5}. Ich ilość determinuje obecność pozostałych wyżej wymienionych elementów monitoringu powietrza. Stanowią frakcje pyłu zawieszonego w powietrzu atmosferycznym o średnicy do 10 µm, nazywanego pyłem drobnym, oraz pyłu o średnicy do 2,5 µm – pyłu bardzo drobnego. Stanowią dwa podstawowe badane wskaźniki w zanieczyszczeniu powietrza (Juraszka, Dąbrowski 2011, Kleczkowski 2020). W zależności od rozmiarów mogą one przenosić na swojej powierzchni inne substancje, stąd ich znacząca szkodliwość.

Pochodzą z wybuchów wulkanów, pożarów, spadających meteorytów i komet, rozbryzgów słonej wody morskiej, spalania paliw, przemysłu chemicznego, metalurgicznego, z produkcji cementu, ścierania się opon samochodowych, szeroko ujętej korozji materiałów, przemysłu wydobywczego (Maciak 2003, Kleczkowski 2020). Można stwierdzić, że większość procesów prowadzonych przez człowieka, produkcyjnych, rozbiórkowych i nie tylko, prowadzi do emisji pyłów. Jest to zjawisko powszechne i wszechobecne.

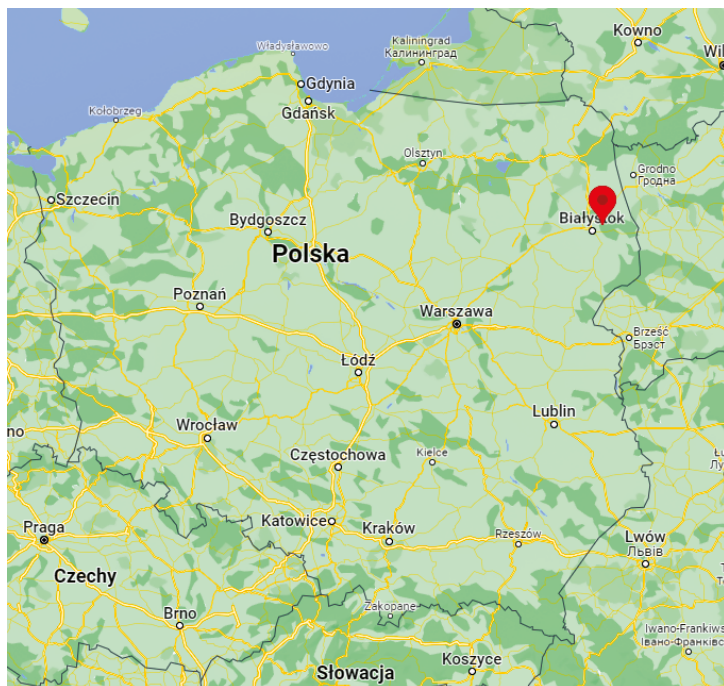
Ze względu na skład zanieczyszczeń powietrza i ich bezpośredni wpływ na organizmy ludzi, zwierząt i roślin można wydzielić kilka podstawowych grup zanieczyszczeń powietrza (Maciak 2003):

- substancje drażniące błony śluzowe dróg oddechowych i oczu,
- substancje duszące, utrudniające i uniemożliwiające,
- trucizny narkotyczne, oddziałujące na układ,
- trucizny powodujące zaburzenia odżywiania,
- substancje rakotwórcze,
- substancje wywołujące choroby,
- substancje gazowe o drażniącym zapachu.

Charakterystyka obszaru badawczego

Miasto Supraśl położone jest w województwie podlaskim, w gminie Supraśl. Znajduje się w regionie Wysoczyzny Białostockiej, a co za tym idzie na Nizinie Północnopodlaskiej (Kozłowska-Szczęśna 1995). Powierzchnia całej gminy wynosi 187,96 km², graniczy z gminami Wasilków, Czarna Białostocka i Sokółka (Centrum Doradcze Programów Pomocowych 2000). Dokładne położenie miasta przedstawiono na rysunku 1.

Z uwagi na położenie wśród złóż borowiny i charakter miasta, w którym jedynym zakładem przemysłowym jest niewielki tartak, Supraśl ma status uzdrowiska, dopełnieniem czego jest wybudowany przed laty szpital uzdrowiskowy, obecnie przyjmujący pacjentów na rehabilitację pocovidową oraz po operacjach serca.



RYS. 1. Położenie miasta Supraśl

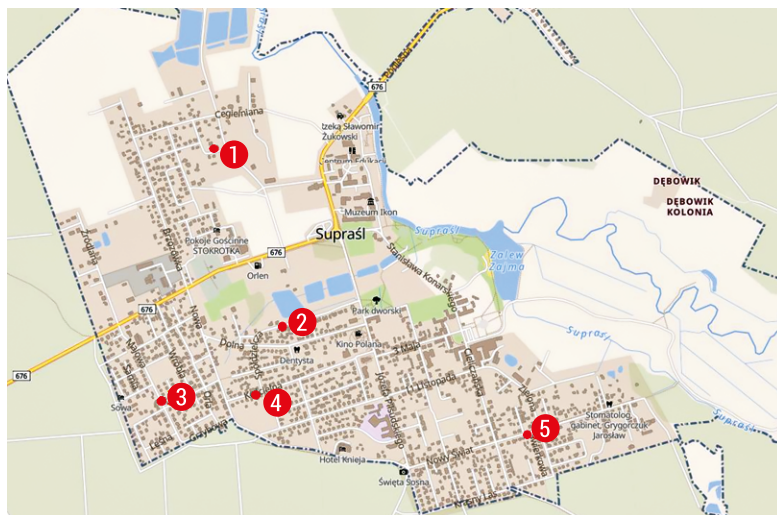
ŹRÓDŁO: www.google.pl/maps.

Metodyka pomiarowa

Podstawą do wykonania badań zanieczyszczenia powietrza w miejscowości Supraśl było ustalenie punktów pomiarowych. Wybrano 5 punktów pomiarowo-kontrolnych o następujących lokalizacjach (rys. 2):

- punkt nr 1 – znajdujący się na ul. Karola Chodkiewicza; w jego pobliżu znajduje się szpital uzdrowiskowy,
- punkt nr 2 – znajdujący się na ul. Spółdzielczej; ulica sąsiaduje z trzema stawami i łowiskiem rybnym,
- punkt nr 3 – znajdujący się u zbiegu ulic Majowej i Lewitówki, stoi tam wiele starych budynków wielorodzinnych,
- punkt nr 4 – znajdujący się na ul. Kościelnej; domy w tej okolicy były w ostatnich latach odświeżane i ocieplane,
- punkt nr 5 – znajdujący się na ul. Nowy Świat; położony w bliskim sąsiedztwie lasu.

O wyborze punktów kontrolnych decydowały obecność budynków o wieku przekraczającym 10 lat, zagęszczenie zabudowy oraz ich przewidywane źródła ogrzewania.



RYS. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowo-kontrolnych na terenie miasta Supraśl

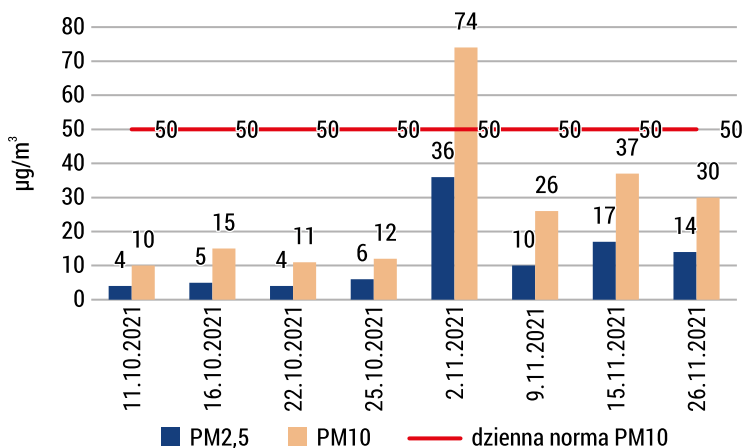
ŹRÓDŁO: suprasl.e-mapa.net (opracowanie własne).

W wymienionych punktach pomiarowych przeprowadzano pomiar zanieczyszczeń pyłowych, czyli pyłów zawieszonych PM₁₀ oraz PM_{2,5}. Pomiary wykonywano od października 2021 r. do listopada 2021 r. Miały one miejsce w następujących dniach: 11.10.2021 r., 16.10.2021 r., 22.10.2021 r., 2.11.2021 r., 9.11.2021 r., 15.11.2021 r., 26.11.2021 r. dla każdego z pięciu punktów pomiarowych. Pomiary odbywały się przy użyciu miernika pyłów zawieszonych i jakości powietrza firmy CEM model DT-96. Urządzenie to zasysało powietrze atmosferyczne na wysokości około 160 cm nad ziemią. W ciągu trzydziestu sekund dokonywało odczytu ilości pyłów zawieszonych PM₁₀ i PM_{2,5}. Zmieniające się wyniki oraz wyniki ostateczne po zakończeniu pomiaru były prezentowane na wyświetlaczu LCD, skąd następnie były spisywane do prowadzonej ewidencji wyników w celu późniejszej analizy.

Analiza uzyskanych wyników badań powietrza

Na potrzeby omówienia wyniki badań powietrza przedstawiono w formie wykresów zaprezentowanych na rysunkach 1–5. Zostały one przygotowane oddzielnie dla każdego z pięciu punktów pomiarowych. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomu niektórych substancji w powietrzu reguluje dopuszczalne dobowe stężenia pyłów PM₁₀, w przypadku pyłów PM_{2,5} określone są tylko dopuszczalne stężenia średnioroczne, dlatego na wykresach zaznaczone zostały wartości normowe jedynie dla pyłów PM₁₀.

1. Punkt pomiarowo-kontrolny nr 1 na ulicy Chodkiewicza

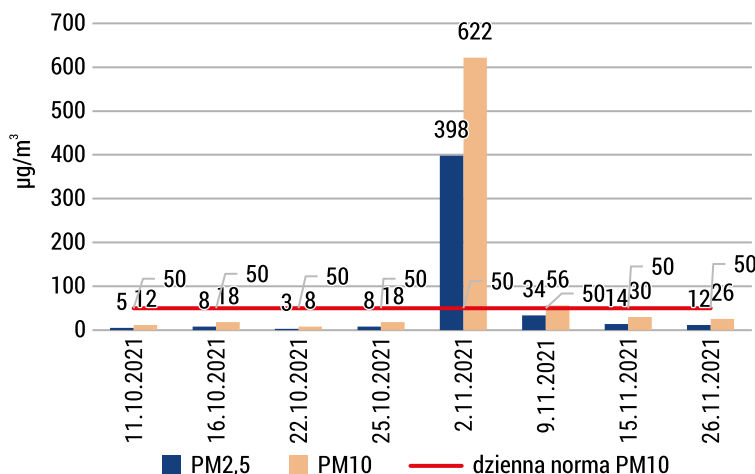


RYS. 3. Wyniki pomiarów stężenia pyłów PM2,5 i PM10 w powietrzu w punkcie pomiarowym nr 1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W pierwszym punkcie pomiarowym można zauważyć stopniowy wzrost stężenia pyłów zawieszonych. Najniższe stężenie odnotowano pierwszego dnia badań, czyli 11 października. Wynosiło ono $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM 2,5 i $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM10. Potem nastąpił wzrost stężeń do aż $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM2,5 i $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM10 w dniu 2 listopada. Jest to przekroczenie dopuszczalnego dobowego stężenia pyłów PM10. Wzrost ten tłumaczy fakt, iż pomiary wykonano półtorej godziny później niż pozostałe, czyli około godziny 18.30 – do tego czasu większość mieszkańców zdążyła wrócić do domów po pracy i miało miejsce masowe ogrzewanie budynków mieszkalnych. Dodatkowo, zgodnie z zaleceniami WHO z 2021 r. (<https://www.who.int>), wśród których wymienione są dopuszczalne stężenia średniodobowe pyłów PM2,5 równe $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz stężenia średniodobowe pyłów PM10 równe $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, zauważyć można znaczące przekroczenie stężenia pyłów zawieszonych PM2,5. Przy kolejnych pomiarach odnotowano stężenia pyłów równe $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM2,5 i $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM10 w dniu 15 listopada, proporcjonalne do spadku temperatury i wzmożonego ogrzewania budynków. Nieco mniejsze wyniki, acz świadczące o nieustępującym, rosnącym trendzie, zaobserwowano w dniu 26 listopada, kiedy stężenia pyłów PM2,5 wyniosły $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a pyłów PM10 – $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2. Punkt pomiarowo-kontrolny nr 2 na ulicy Spółdzielczej



RYS. 4. Wyniki pomiarów stężenia pyłów PM2,5 i PM10 w powietrzu w punkcie pomiarowym nr 2

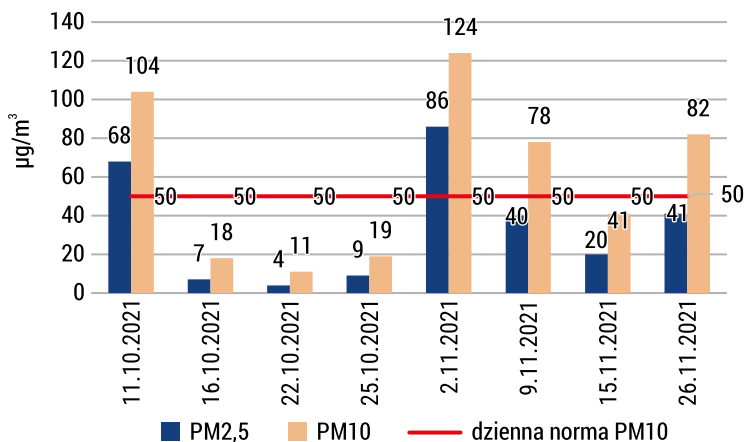
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki badań jakości powietrza w punkcie pomiarowym nr 2 były wyższe niż w poprzednim punkcie, acz regularniejsze. Również zauważyć można wzrost stężenia pyłów, zaczynając od 5 µg/m³ dla PM2,5 i 12 µg/m³ dla PM10 w dniu 11 października. W następnych dniach zaczęły się utrzymywać podwyższone stężenia pyłów zawieszonych, osiągając bardzo wysokie stężenia w dniu 2 listopada, równe 398 µg/m³ dla PM2,5 i 622 µg/m³ dla PM10. Są to znaczące przekroczenia wszelkich zaleceń WHO i polskich norm jakości powietrza. Wyniki w kolejnych dniach pomiarów stopniowo malały przez 34 µg/m³ dla PM2,5 i 56 µg/m³ dla PM10 (lekkie przekroczenie wartości dopuszczalnych PM10) w dniu 9 listopada do 12 µg/m³ dla PM2,5 i 26 µg/m³ dla PM10 w ostatnim dniu pomiarów.

3. Punkt pomiarowo-kontrolny nr 3 na ulicy Lewitówka

W punkcie nr 3 zauważyć można regularne przekroczenia norm jakości powietrza i podwyższone stężenia pyłów. Pierwszy raz miało to miejsce 11 października, a stężenia równe były 68 µg/m³ dla PM2,5 i 104 µg/m³ dla PM10. Następnie miał miejsce spadek stężeń, osiągając minimum w dniu 22 października w wysokości 4 µg/m³ dla PM2,5 i 11 µg/m³ dla PM10. Kolejny wzrost miał miejsce 2 listopada, tak jak w poprzednich dwóch punktach pomiarowych. Zanotowano stężenia pyłów równe 86 µg/m³ dla PM2,5 i 124 µg/m³ dla PM10. Podczas pomiarów powietrza wyczuwalny był ostry, nieco kwaśny zapach dymu z kominów okolicznych budynków. W następnych dniach stężenie pyłów nieco spadło, lecz nadal utrzymywało się na wysokich poziomach równych w ostatnim dniu pomiarów 41 µg/m³ dla PM2,5 i 82 µg/m³ dla PM10. Zapach dymu odczuwalny był przy większości pomiarów w tym punkcie

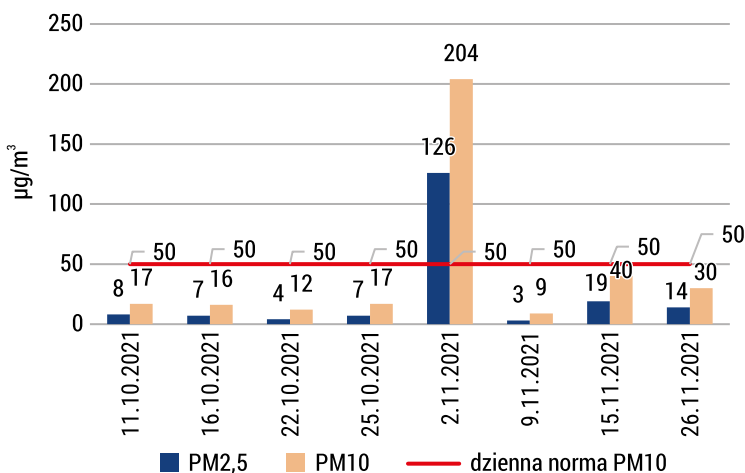
pomiarowym, co świadczy o występowaniu w tym miejscu dużej liczby budynków z kotłami na paliwo stałe, które mogło mieć niską jakość i czystość. Dodatkowo mogły być spalane odpady papierowe, co tłumaczyłoby gryzący zapach.



RYS. 5. Wyniki pomiarów stężenia pyłów PM2,5 i PM10 w powietrzu w punkcie pomiarowym nr 3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4. Punkt pomiarowo-kontrolny nr 4 na ulicy Kościelnej



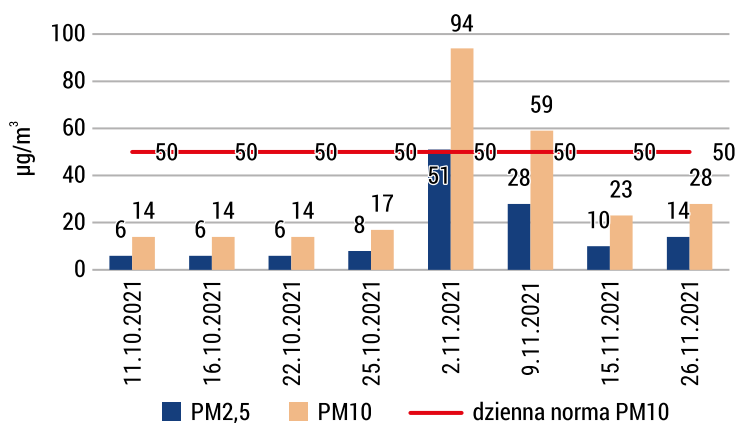
RYS. 6. Wyniki pomiarów stężenia pyłów PM2,5 i PM10 w powietrzu w punkcie pomiarowym nr 4

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki z czwartego punktu pomiarowego są zdecydowanie niższe niż w poprzednich punktach oraz są regularne. Utrzymywały się na poziomie zbliżonym do 8 µg/m³ dla PM2,5 i 17 µg/m³ dla PM10, zaobserwowanym 11 października.

Najniższe zanotowane stężenie pyłów zawieszonych było w dniu 9 listopada, wyniosło ono $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} . Później, wraz ze spadkiem temperatury, nastąpił wzrost do $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} w dniu 2 listopada 2011 r., co jest przekroczeniem stężenia pyłów o mniejszej średnicy według wspomnianych wcześniej nowych zaleceń WHO i pyłów PM_{10} według rozporządzenia. Jest to jednocześnie największa odnotowana wartość w tym punkcie pomiarowym. W ostatnim dniu badań stężenia pyłów nieco zmaleły, wynosząc $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} , jednak wskazywały one na coraz intensywniejsze ogrzewanie domów, związane z nadchodzącą zimą.

5. Punkt pomiarowo-kontrolny nr 5 na ulicy Nowy Świat



RYS. 7. Wyniki pomiarów stężenia pyłów $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} w powietrzu w punkcie pomiarowym nr 5

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W ostatnim, piątym punkcie pomiarowym najniższe stężenie pyłów zawieszonych wynosiło $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} , które utrzymywało się przez pierwsze trzy serie pomiarów, czyli od 11 do 22 października. 2 listopada nastąpił gwałtowny wzrost stężeń pyłów do $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} , co stanowi przekroczenie norm dla pyłów PM_{10} według rozporządzenia oraz pyłów $\text{PM}_{2,5}$ według zaleceń WHO. Było to największe zanotowane stężenie pyłów. 9 listopada również miało miejsce przekroczenie norm, jednak było ono stosunkowo niewielkie – $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} . W następnych dniach wyniki zmalały, osiągając wartość $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2,5}$ i $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10} 26 listopada 2011 r., posiadając lekką tendencję rosnącą związaną ze spadkami temperatur.

Podsumowanie

Powyższa analiza wyników badań ukazuje, iż najczęstsze przekroczenia norm jakości powietrza mają miejsce w okolicach ulicy Lewitówka. Jest tam dużo starych, nieocieplonych domów, których ogrzanie wymaga większej ilości paliwa stałego. Odczuwalna przy pomiarach woń dymu może być uciążliwa dla okolicznych mieszkańców, ale należy brać pod uwagę fakt, iż do takich intensywnych zapachów organizm ludzki jest w stanie się przyzwyczaić i je „ignorować”. Dość niskie wyniki w pozostałych punktach świadczą o czystości stosowanego paliwa i korzystaniu z nowoczesnych kotłów CO. Jedynie w punkcie nr 2 na ulicy Spółdzielczej miało miejsce bardzo duże, jednak jednorazowe stężenie pyłów zawieszonych. Istnieje możliwość, że w momencie pomiaru w okolicznym budynku miało miejsce zanieczyszczenie przewodu kominiowego, które ustąpiło po nocy ogrzewania budynku, co potwierdzałyby późniejsze, akceptowalne wyniki badań. Innym powodem takiego skoku stężeń pyłów mógł być jednorazowy wilgotny i zanieczyszczony wsad do kotła CO.

Całościowo można stwierdzić, iż powietrze w Supraślu jest w miarę dobrym stanie w sezonie grzewczym, tym bardziej porównując wyniki do tych w dużych miastach. Powodem tego jest mały ruch pojazdów, brak zakładów produkcyjnych, nie tak gęsta zabudowa oraz otoczenie miasteczka przez lasy i Puszcę Knyszyńską, jednak ze względu na uzdrowiskowy charakter miejscowości konieczne są działania edukacyjne i informacyjne, które wpłyną na poprawę jakości powietrza atmosferycznego.

Literatura

- [1] Centrum Doradcze Programów Pomocowych, *Strategia rozwoju miasta i gminy Supraśl na lata 2016–2022*. Załącznik do uchwały nr XXIX/184/2000 Rady Miejskiej w Supraślu z dnia 28.12.2000 r.
- [2] Juda-Rezler K., *Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [3] Juraszka B., Dąbrowski T., *Podstawy ochrony atmosfery*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011.
- [4] Kleczkowski P., *Smog w Polsce: przyczyny, skutki, przeciwdziałanie*, PWN, Warszawa 2020.
- [5] Kozłowska-Szczęsna T., Krawczyk B., Błażejczyk K., *Warunki bioklimatyczne Supraśla*, Polska Akademia Nauk Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Warszawa 1995 („Zeszyty Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania”, nr 33).
- [6] Maciak F., *Ochrona i rekultywacja środowiska*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
- [7] Mazurek H., Badyda A. (red.), *Smog. Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczeń powietrza*, PZWL, Warszawa 2018.
- [8] Rutkowski J.D., *Źródła zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1993.

- [9] Seigneur Ch., *Air Pollution. Concepts, Theory, and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge 2019.
- [10] Sewastianik B., Sewastianik M., *Supraśl – uzdrowisko za mało znane*, „Acta Balneologica” 2016, t. 58, nr 4(146), 284–290.
- [11] Szklarczyk M., *Ochrona atmosfery*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn 2001.

Rozwiązania proekologiczne w budynkach uczelni wyższych

*mgr inż. Bartosz Tomasz Choiński, dr inż. Magdalena Joka Yildiz**

*Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Katedra Inżynierii Rolno-Spożywczej i Kształtowania Środowiska
e-mail: * m.joka@pb.edu.pl*

Słowa kluczowe: budownictwo ekologiczne, energooszczędność, instalacje proekologiczne

Streszczenie: W pierwszym rozdziale niniejszej pracy omówiono problem zanieczyszczenia środowiska naturalnego, który wpłynął również na działania instytucji publicznych. Podjęto działania mające na celu przeciwdziałanie dalszemu zanieczyszczeniu środowiska: wdraża się rozwiązania mające na celu ochronę klimatu, technologie ograniczające wydobycie surowców naturalnych. Podejmowane starania przynoszą efekty, na przestrzeni lat można zauważyć tendencję spadkową emisji głównych zanieczyszczeń powietrza, takich jak SO_2 i NO_x . W celu zastąpienia nośników energii takich jak węgiel kamienny lub brunatny wprowadza się alternatywne odnawialne źródła energii. Do zielonych źródeł energii można zaliczyć energię wiatru, słońca, energię wnętrza ziemi, wody czy też surowce biodegradowalne (biomasa) takie jak drewno czy słoma.

Opisane w drugim rozdziale pracy nośniki, metody pozyskiwania energii z źródeł odnawialnych mają na celu przybliżyć pozytywne aspekty wyżej wymienionych rozwiązań. Stosując ekologiczne materiały, takie jak kompozyt wapienno-konopny, w budownictwie ogranicza się emisję gazów cieplarnianych emitowanych podczas produkcji materiałów sztucznych takich jak płyta warstwowa czy też styropian, wykorzystywanych do budowy budynków. Wyposażając budynek w źródła energii elektrycznej i ciepłej takie jak panele fotowoltaiczne lub pompa ciepła można otrzymać samowystarczalność energetyczną, ponadto dobrze dobrana instalacja może się zwrócić finansowo w stosunkowo krótkim okresie czasu i przynosić zyski, tak więc korzyści nie są tylko środowiskowe, ale i także ekonomiczne.

Podsumowując, rozwiązania proekologiczne oprócz aspektu środowiskowego przynoszą korzyści ekonomiczne, wykorzystanie ich przyczynia się do ochrony środowiska nie tylko lokalnie, ale i globalnie.

Przyczyny zanieczyszczania środowiska

Wieloletnie zaniedbania w zakresie ochrony środowiska, degradacja środowiska naturalnego doprowadziły do obserwowanych i odczuwanych obecnie zmian klimatu. Istotny wpływ na zachodzące zmiany ma działalność człowieka, wydobywanie i eksploatacja surowców naturalnych, czego skutkiem jest emisja gazów cieplarnianych do atmosfery, gospodarka ta prowadzi do niekorzystnych zmian, takich jak degradacja gleby, zanieczyszczenia wód oraz powietrza, które odbijają się na środowisku naturalnym, co przekłada się na jakość życia i zdrowia człowieka. Ekspozycje na emitowane pyły i gazy mogą przyczyniać się do m.in. chorób układu oddechowego, krwionośnego, mogą wpływać na zwiększoną zachorowalność na choroby nowotworowe. W przypadku Polski system energetyczny opiera się głównie na produkcji energii cieplnej oraz elektrycznej poprzez spalanie paliw kopalnych (węgiel kamienny, brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny, torf), a także surowców pochodzenia roślinnego (drewno, biomasa). Należy zaznaczyć, że zdecydowana większość wytworzonej energii pochodzi z elektrowni opalanych węglem kamiennym, ze względu na stosunkowo duże zasoby tego surowca w naszym kraju, spalanie tego paliwa generuje duże ilości zanieczyszczeń przedostających się do atmosfery. Potrzeby mieszkaniowe zużywają w przybliżeniu 34% wyprodukowanej energii, przy czym ok. 71% jest przeznaczona na ogrzewanie mieszkań [9]. Rosnące zapotrzebowanie na energię przekłada się na zwiększenie produkcji tej energii, co skutkuje zwiększeniem emisji zanieczyszczeń. Wbrew pozorom instalacje energetyki zawodowej nie są głównymi emiterami, ze względu na zastosowane nowoczesne technologie oczyszczania (filtry, instalacje odsiarczania), a cały proces spalania jest wysokoefektywny. Natomiast głównym źródłem są instalacje prosumenckie, w budownictwie mieszkaniowym, jednorodzinnym w celach grzewczych w dużym stopniu stosuje się przestarzałe technologicznie wysokoemisyjne piece głównie zasilane węglem kamiennym, emitujące do atmosfery duże ilości zanieczyszczeń (pyły, kwaśne tlenki, WWA) powstałych w trakcie spalania paliwa. Jednym ze skutków tego procesu jest widoczny w sezonie grzewczym na ulicach wielu polskich miast tzw. smog. Smog jest zanieczyszczeniem, unoszącym się w powietrzu (w postaci chmury bądź mgły), które można podzielić na dwa rodzaje ze względu na skład chemiczny oraz miejsce występowania. Smog „londyński” składa się głównie ze szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu (NO_x), dwutlenek siarki (SO_2), tlenek węgla (CO), pyły (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) i sadza, najczęściej występuje w okresie jesienno-zimowym. Smog „typu Los Angeles” powstaje w okresie letnim w ciepłym klimacie, w którym dochodzi do reakcji tlenków węgla, azotu oraz węglowodorów, z czego powstają azotany nadtlenu acetyleny,

aldehydy czy też ozon. Dlatego też ważna jest wymiana pieców na nowoczesne, nisko-emisyjne źródła energii, poszukiwanie innych źródeł pozyskiwania ciepła, a także termoizolacja obiektów, dzięki czemu można ograniczyć straty energii. Działalność w zakresie budownictwa, eksploatacji obiektów oraz produkcji materiałów budowlanych jest jednym z większych czynników składających się na zachodzące niekorzystne zjawiska. W celu ograniczenia postępujących przemian poszukuje się nowoczesnych, proekologicznych rozwiązań mające na celu redukcję wytwarzanych zanieczyszczeń, zużywanej energii oraz ponownym jej wykorzystaniu, które w swoim użytkowaniu będą ekologiczne i efektywne. Dlatego ważna jest analiza obecnego wpływu działalności człowieka na środowisko, przeciwdziałanie skutkom oraz poszukiwanie ekologicznych rozwiązań, podjęta praca ma na celu poszukiwanie rozwiązań wyżej wymienionych problemów.

Skutki zanieczyszczenia środowiska

Protokół Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) z Kioto z 1997 roku był jednym z najważniejszych dokumentów mających znaczenie dla ochrony środowiska w odniesieniu do obniżenia energochłonności gospodarki. Określał on redukcję emisji gazów cieplarnianych (dwutlenku węgla (CO_2), NO_x , metanu) o 5% do 2012 roku. Obecnie dominują liczne trendy mające na celu ograniczenie zużycia energii, są wprowadzane liczne akty prawne, ograniczające emisję zanieczyszczeń, jednym z takich dokumentów jest obowiązująca na terenie Unii Europejskiej (UE) dyrektywa Parlamentu Europejskiego 2016/2284 dotycząca redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych. Natomiast porozumienie paryskie z 2015 roku jest pierwszym w historii prawnie wiążącym porozumieniem z dziedziny klimatu, mającym na celu przeciwdziałanie zmianom klimatu. W wyniku podjętych na terenie UE od ponad 20 lat działań w zakresie antropogenicznych emisji do powietrza na przełomie lat 1990–2010 udało się ograniczyć emisję wielu zanieczyszczeń, takich jak SO_2 o ponad 82%, NO_x o 47%, a emisję lotnych organicznych związków niemetalu udało się ograniczyć o 56%. Jednak mimo tych starań nadal są odczuwalne negatywne skutki emisji zanieczyszczeń do powietrza, zagrażające zarówno ludzkiemu zdrowiu, jak i środowisku. Podejmowane działania są skierowane w obszar sektorów gospodarki, które emitują największą ilość zanieczyszczeń, chodzi tutaj głównie o przemysł, transport oraz rolnictwo [19].

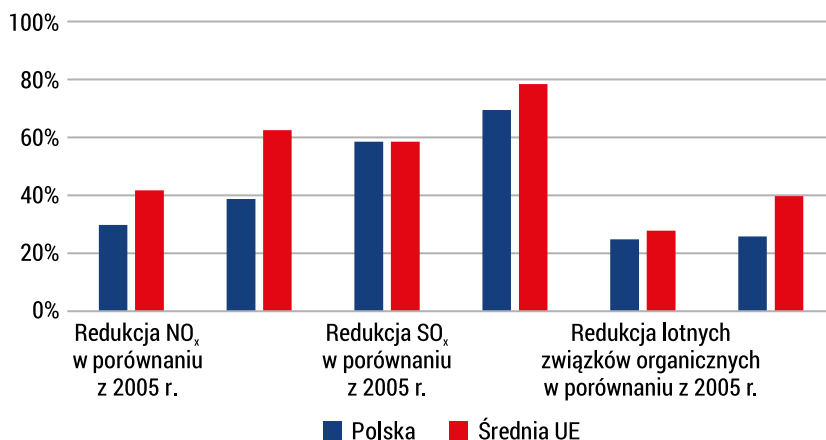
Wyżej wymieniony akt prawny obliguje państwa członkowskie UE do podjęcia działań redukujących krajowe roczne emisje związków zanieczyszczających atmosferę na lata 2020–2040. Ponadto istnieje wiele instrumentów, funduszy unijnych takich jak program LIFE (jest poświęcony współfinansowaniu projektów z dziedziny ochrony środowiska i klimatu), wspierających działania w zakresie ochrony środowiska i klimatu. Organem monitorującym powyższe działania na terenie Europy jest Europejska

Agencja Środowiska (EAŚ, ang. European Environment Agency – EEA), analizująca i oceniająca postępy działań krajów. W Polsce organem rządowym nadzorującym stan zanieczyszczeń jest Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ). Jak wynika z raportu wdrażania polityki ochrony środowiska z 2019 roku dla Polski [20], jakość powietrza jest niedostateczna, według szacunków Europejskiej Agencji Środowiska w 2015 roku wysokie stężenie pyłu drobnego w powietrzu mogło być przyczyną przedwczesnej śmierci ok. 391 000 osób na terenie państw członkowskich UE, z czego 44 500 osób w Polsce. Biorąc pod uwagę okres od 1990 do 2016 roku na terenie Polski odnotowano spadek związków takich jak NO_x , SO_x , amoniaku (NH_3) do poziomu nieprzekraczającego normy emisji tych gazów. Natomiast pomiędzy 2014 a 2016 rokiem wzrosła emisja pyłu drobnego $\text{PM}_{2,5}$ o 3,83%, a także NO_x o 0,05%, jednak pomimo tego wg EAŚ w 2015 roku narażenie ludności na wysokie stężenie NO_2 spowodowało przedwczesną śmierć 79 000 osób we wszystkich krajach europejskich.

TAB. 1. Krajowe zobowiązania w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń na lata 2020–2040 dyrektywy UE 166/2284

Kraj	Redukcja NO_x w porównaniu z 2005 r.		Redukcja SO_x w porównaniu z 2005 r.		Redukcja lotnych związków organicznych w porównaniu z 2005 r.	
	każdy rok od 2020 r. do 2029 r.	każdy rok od 2030 r.	każdy rok od 2020 r. do 2029 r.	każdy rok od 2030 r.	każdy rok od 2020 r. do 2029 r.	każdy rok od 2030 r.
Polska	30%	39%	59%	70%	25%	26%
Średnia UE	42%	63%	59%	79%	28%	40%

ŹRÓDŁO: [18].



RYS. 1. Krajowe zobowiązania w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń na lata 2020–2040

ŹRÓDŁO: [18].

Na lata 2020–2040 przyjęto nowe zobowiązania (rys. 1; rys. 2; tab. 1; tab. 2) dla krajów członkowskich UE w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza. Zobowiązania każdego kraju członkowskiego są uzależnione od emitowanych ilości zanieczyszczeń, a także na podstawie struktury gospodarki oraz potencjału ekonomicznego państwa dotyczącego możliwości wdrażania proekologicznych rozwiązań. Polska na tle innych krajów członkowskich nie ma narzuconych wygórowanych zobowiązań, m.in. ze względu na technologię pozyskiwania energii głównie ze spalania paliw kopalnych oraz braku wystarczającej produktywności energetycznej alternatywnych źródeł energii mogących zaspokoić zapotrzebowania krajowe.

TAB. 2. Krajowe zobowiązania w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń na lata 2020–2040 dyrektywy UE 2016/2284

Kraj	Redukcja NH ₃ w porównaniu z 2005 r.		Redukcja PM _{2,5} w porównaniu z 2005 r.	
	każdy rok od 2020 r. do 2029 r.	każdy rok od 2030 r.	każdy rok od 2020 r. do 2029 r.	każdy rok od 2030 r.
Polska	1%	17%	16%	58%
Średnia UE	6%	19%	22%	49%

ŹRÓDŁO: [18].

Aby zobrazować sytuację dotyczącą zagrożenia dla życia ludzi i środowiska, można porównać obecne normy emisji zanieczyszczeń powietrza w UE z wytycznymi WHO AQG (World Health Organization Air Quality Guidelines) oraz z liczbą dopuszczalnych przekroczeń norm w ciągu roku z emisją szkodliwych substancji do atmosfery.

TAB. 3. Dopuszczalne normy emisji zanieczyszczeń powietrza w UE wraz z wytycznymi WHO AQG

Substancja	Przedział czasu	Wytyczne WHO AQG (µg/m ³)	Dopuszczalne wartości w dyrektywie UE w sprawie jakości powietrza (µg/m ³)	Liczba przypadków w roku, kiedy można przekroczyć unijne normy
NO ₂	1 rok	40	40	–
	1 godzina	200	200	nie więcej niż 18 godzin w roku
PM _{2,5}	1 rok	10	20	–
	1 dzień	25	–	3 dni w roku
PM ₁₀	1 rok	20	40	–
	1 dzień	50	50	nie więcej niż 3 razy w ciągu roku

Substancja	Przedział czasu	Wytyczne WHO AQG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Dopuszczalne wartości w dyrektywie UE w sprawie jakości powietrza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Liczba przypadków w roku, kiedy można przekroczyć unijne normy
SO_2	1 dzień	20	125	nie więcej niż 3 dni w roku
	1 godzina	–	350	nie więcej niż 24 godziny w roku
	okres zimowy	–	20	od 1 października do 31 marca
O_3	8 godzin	100	120	nie więcej niż 25 dni/rok, średnio na 3 lata
	1 godzina	–	180	–
BaP	1 rok	0,12	1	mierzone jako zawartość w PM10
NO_x	1 rok	–	30	–
CO	8 godzin	10 mg/m^3	10 mg/m^3	–
	1 godzina	30 mg/m^3	–	–

ŹRÓDŁO: [20].

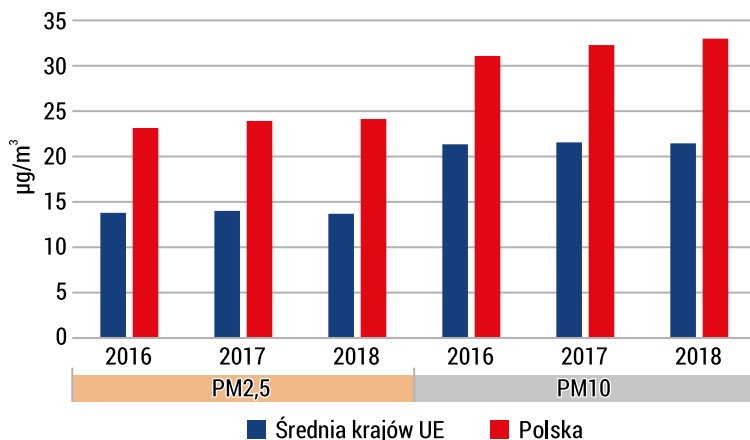
Pomiędzy normami unijnymi a wytycznymi WHO (tab. 3) występują pewne rozbieżności, dopuszczalne wartości zanieczyszczeń powietrza UE są mniej restrykcyjne od wartości zalecanych przez WHO, dopuszczają niemal dwukrotnie większe roczne stężenie zanieczyszczeń pyłów zawieszonych, takich jak PM2,5 oraz PM10, a także substancji takich jak SO_2 , ozon (O_3), benzo[a]piren (BaP) i CO.

Jak można zauważyć (rys. 2; tab. 4), społeczeństwo w Polsce w latach 2016–2018 było narażone na zanieczyszczenia powietrza cząstkami stałymi bardziej niż ludność w innych krajach UE.

TAB. 4. Dane Eurostatu na temat narażenia ludności na zanieczyszczenie powietrza cząstkami stałymi z lat 2016–2018

Kraj	PM2,5			PM10		
	µg/m³					
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Średnia krajów UE	13,9	14,1	13,8	21,5	21,7	21,6
Polska	23,3	24,1	24,3	31,3	32,5	33,2

ŹRÓDŁO: [19].



RYS. 2. Narażenie ludności na zanieczyszczenie powietrza cząstkami stałymi w latach 2016–2018

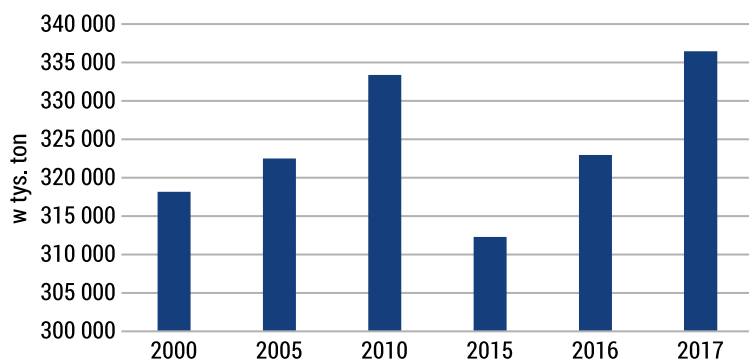
ŹRÓDŁO: [20].

Z danych Instytutu Ochrony Środowiska (IOŚ) – tab. 5, rys. 3.1, 3.2 – wynika, że największy udział w emisji zanieczyszczeń do powietrza ma dwutlenek węgla, stanowi to przeważającą większość emisji. Natomiast zauważalna jest tendencja spadkowa emisji SO_2 oraz NO_x , emisja pozostałych zanieczyszczeń utrzymuje się na podobnym stałym poziomie.

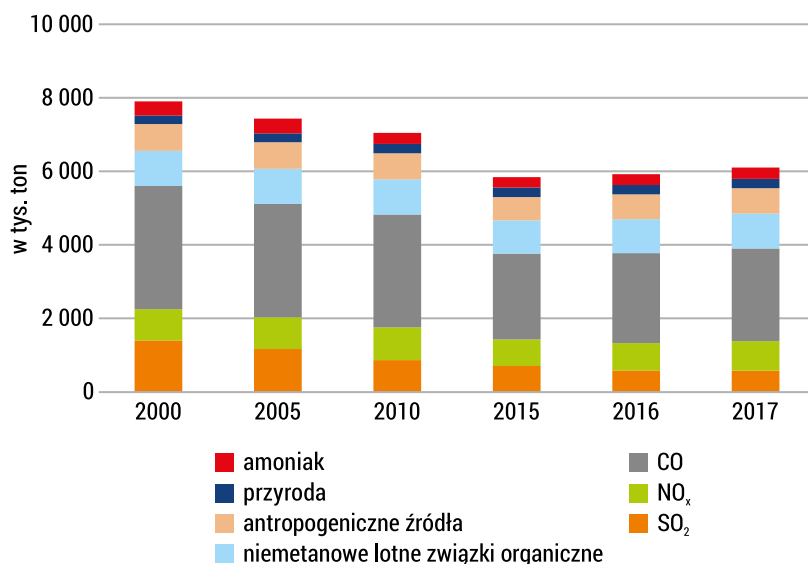
TAB. 5. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce w latach 2000–2017

Zanieczyszczenie/Rok	2000	2005	2010	2015	2016	2017
	w tysiącach ton					
SO_2	1 411	1 172	875	712	591	583
NO_x	852	869	888	725	742	804
CO_2	318 209	322 546	333 457	312 321	323 022	336 557
CO	3 356	3 089	3 077	2 343	2 456	2 534
Niemetalowe lotne związki organiczne	963	962	963	900	930	948
Antropogeniczne źródła	732	721	712	641	674	691
Przyroda (jako źródło)	231	241	251	259	256	257
Amoniak	331	324	303	285	292	308
Pyły	386	406	390	327	335	341

ŹRÓDŁO: [56].

RYS. 3.1. Całkowita emisja CO₂ do powietrza w Polsce w latach 2000–2017

ŹRÓDŁO: [56].

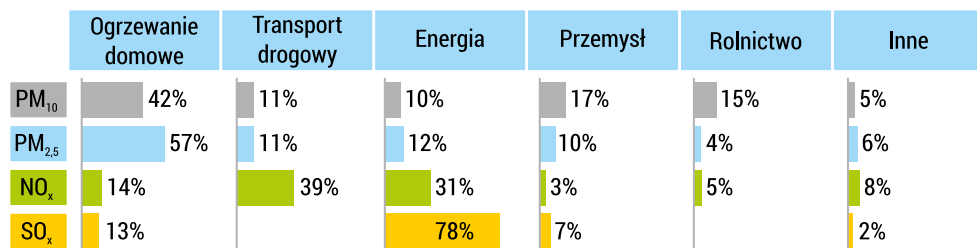


RYS. 3.2. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce w latach 2000–2017

ŹRÓDŁO: [56].

Według WHO pyły PM_{2,5} są uznane za najbardziej szkodzące zdrowiu (przenikają do pęcherzyków płucnych, trafiają do krwiobiegu), dlatego też obowiązujące wartości norm dla tych pyłów zawieszonych nie obowiązują przez dłuższy okres czasu i są systematycznie aktualizowane. Porównując te dane do statystyk emisji zanieczyszczeń z rys. 4, można zauważyć, że większość z tych szkodliwych związków powstaje w wyniku produkcji energii cieplnej, elektrycznej oraz produkcji przemysłowej. Pył zawieszony w powietrzu pochodzi głównie z procesów spalania, natomiast w mniejszej mierze z transportu, z procesów takich jak ścieranie się klocków hamulcowych, opon, powierzchni dróg. Stężenie niebezpiecznych pyłów zawieszonych

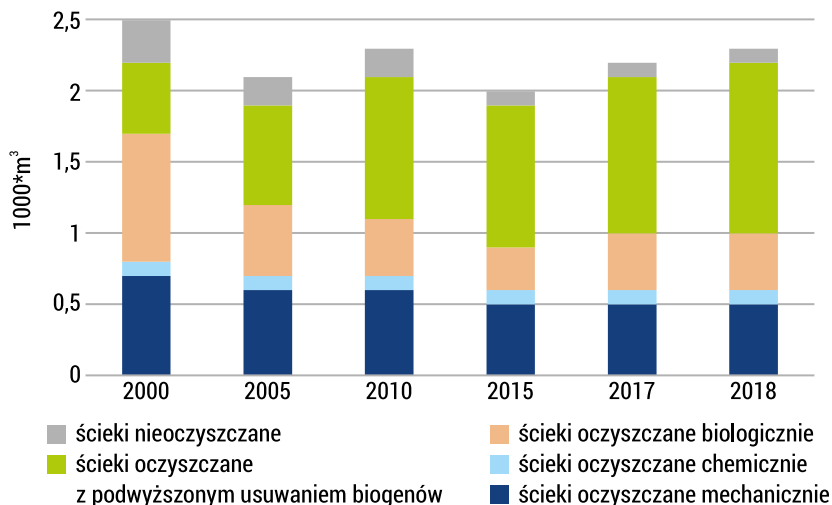
w powietrzu w Polsce jest przekroczone, unijna norma wynosi dla $PM_{2,5}$ $20 \mu g/m^3$, a w 2018 roku w naszym kraju odnotowano stężenie tego pyłu na poziomie $24,3 \mu g/m^3$, natomiast dla pyłów PM_{10} nie została przekroczona unijna norma, odnotowano stężenie $33,2 \mu g/m^3$ w stosunku do dopuszczalnej wartości $40 \mu g/m^3$, jednak jest to wynik przekraczający zalecaną przez WHO dopuszczalną wartość stężenia $20 \mu g/m^3$.



RYS. 4. Zanieczyszczenia powietrza dla poszczególnych sektorów gospodarki w 2017 roku

ŹRÓDŁO: [20].

Innym istotnym czynnikiem oddziałującym na środowisko, zwłaszcza na glebę oraz wodę, jest nieustanny proces rozwijania się infrastruktury, proces urbanizacji miast, dróg lądowych oraz morskich, rolnictwa intensywnego oraz produkcji przemysłowej. Wszystkie działania związane z rozwojem działalności człowieka wiążą się ze zmianą środowiska naturalnego, zostaje naruszony ekosystem. Produkcja przemysłowa wiąże się nie tylko z emisją zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych do atmosfery, ale także ma bezpośredni lub pośredni wpływ na wodę i glebę. Do bezpośrednich działań można zaliczyć produkcję niebiodegradowalnych tworzyw takich jak PET, trafiających do wód oraz gleby, inne tworzywa sztuczne, związki chemiczne (w tym metale ciężkie) trafiające do środowiska wraz ze ściekami przemysłowymi lub komunalnymi, odpadami, a także wiele innych produktów antropogenicznych. Pośrednio taka działalność może szkodzić planecie poprzez emisję zanieczyszczeń do atmosfery, skąd trafiają one później wraz z tzw. kwaśnymi deszczami do wód oraz gleby. Intensyfikacja rolnictwa prowadzi do degradacji gleb, zjawisk takich jak erozja, wietrzenie gleb. Do rzek następuje migracja nawozów sztucznych i mineralnych, natomiast nieracjonalne wycinanie obszarów leśnych na dużą skalę prowadzi do wyniszczania siedlisk wielu gatunków roślin oraz zwierząt. Dlatego też obecna europejska strategia ochrony różnorodności biologicznej (bioróżnorodność) zakłada utrzymanie obecnych, jak i odbudowę zniszczonych o co najmniej 15% ekosystemów do 2020 roku poprzez włączenie zielonej architektury w planowanie przestrzenne. Taka polityka jest obecnie promowana przez władze unijne, jak i krajowe, projekty te realizuje się za pośrednictwem programów takich jak Program ochrony i zrównoważonego użytkowania różnorodności biologicznej z planem działania na lata 2015–2020 [19].



RYS. 5. Ścieki przemysłowe i komunalne wymagające oczyszczenia odprowadzone do wód lub do ziemi na terenie Polski w latach 2000–2018

ŹRÓDŁO: [21].

Ilość odprowadzanych ścieków do wód lub ziemi (rys. 5) w wyżej wymienionych latach zmalała, można zauważyć ponaddwukrotny wzrost oczyszczania metodami mechanicznymi, które są wysokoefektywne w oczyszczaniu wód ze związków takich jak azotowe i fosforowe.

TAB. 6. Ścieki przemysłowe oczyszczone i nieoczyszczone odprowadzane przez poszczególne sektory gospodarki Polski w 2018 roku

Wyszczególnienie	Ścieki odprowadzone	Ścieki wymagające oczyszczenia odprowadzane bezpośrednio do wód lub ziemi		
		razem	oczyszczone	nieoczyszczone
		hm ³		
Ogółem	6 972,7	861,3	756,6	104,7
Górnictwo i wydobywanie	296,9	294,3	232,3	62,0
Przetwórstwo przemysłowe	713,3	422,7	398,1	24,6
Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę	5 872,5	73,6	66,1	7,5
Dostawa wody, gospodarowanie ściekami i odpadami	52,6	52,3	52,3	0,0

Wyszczególnienie	Ścieki odprowadzone	Ścieki wymagające oczyszczenia odprowadzane bezpośrednio do wód lub ziemi		
		razem	oczyszczane	nieoczyszczane
	hm ³			
Handel, naprawa pojazdów samochodowych	10,6	9,9	0,4	9,6
Opieka zdrowotna i pomoc społeczna	10,3	1,3	1,2	0,1
Pozostałe sekcje	12,5	5,7	4,9	0,8

ŹRÓDŁO: [21].

Wytwarzanie energii, przetwórstwo przemysłowe generują zdecydowaną większość odprowadzanych zanieczyszczeń (tab. 6), maleje ogólna ilość odprowadzanych do środowiska ścieków nieoczyszczonych. Jest to zasługa rozwijania systemu gospodarki wodno-ściekowej, są otwierane nowe oczyszczalnie ścieków, a istniejące są modernizowane. Opracowywane i wdrażane nowe technologie filtrowania ścieków prowadzą do coraz mniejszej ilości szkodliwych substancji trafiających do wód i gleby oraz zastępują przestarzałe i nieefektywne instalacje. Coraz częściej tradycyjne zbiorniki na ścieki (tzw. szamba) zastępuje się przez przydomowe oczyszczalnie ścieków, które mają nie tylko walory ekologiczne (ograniczają emisję zanieczyszczeń do środowiska), ale także są rozwiązaniem bardziej komfortowym niż szamba i w stosunkowo krótkim czasie koszty instalacji mogą się zwracać. Wpływ na mniejsze zanieczyszczenie gleb i wód ma także w rolnictwie zakaz stosowania od połowy października do początku marca nawozów azotowych oraz gnojówki.

Możliwości ograniczenia emisji zanieczyszczeń

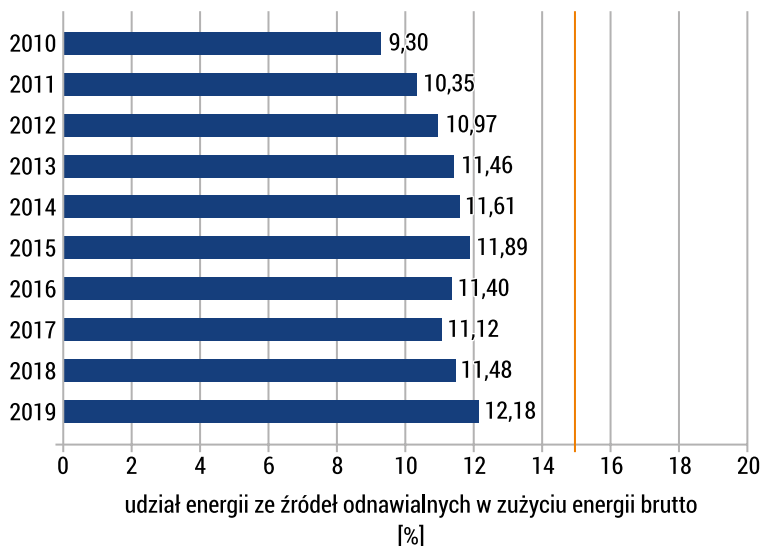
Opisane w rozdziale 1 wstępu literaturowego skutki działalności człowieka stały się przyczyną działań mających na celu ochronę środowiska i klimatu. Podjęte starania nie są tylko próbą wyhamowania zachodzących zmian, ale także mają wiele innych pozytywnych aspektów. Jednym z działań jest modernizacja budynków do stanu energooszczędnego poprzez ich termoizolację, wymianę urządzeń zasilających w energię ciepłą oraz elektryczną na bardziej efektywne energetycznie i przy tym mające mniejszą emisję pyłów, zanieczyszczeń, tj. rozwiązań korzystających z odnawialnych źródeł energii (OZE), takich jak energetyka słoneczna, geotermalna, wodna, wiatrowa, wykorzystanie odpadów komunalnych, stosowanie turbin gazowych, a także energia pozyskiwana z biomasy. Budynkiem energooszczędnym można określić taki, którego zapotrzebowanie do ogrzania 1 m² powierzchni jest mniejsze niż 50 kWh/m²/rok. Budynek pasywny jest jednym z typów takich budynków, jego zapotrzebowanie na energię

grzewczą nie przekracza 15 kWh/m²/rok. Natomiast podczas budowy nowych obiektów wykorzystuje się surowce ekologiczne, które nie oddziałują na środowisko w procesie obróbki, są biodegradowalne (słoma, drewno, konopie lniane itp.) oraz mogą ulec ponownemu wykorzystaniu. Dodatkowo do budowy można wykorzystać produkty recyklingu (tworzywa sztuczne), materiały z wełny, bawełny oraz lnu [9].

Oprócz opracowywania mniej szkodliwych i bardziej efektywnych technologii i rozwiązań można wyróżnić pozytywy takie jak aspekt ekonomiczny – zastosowanie energooszczędnych rozwiązań wpływa pozytywnie na ogólne koszty utrzymania budynków, poprzez zastosowanie zielonych źródeł energii maleją koszty paliwa, materiały termoizolacyjne pozwalają na ograniczenie strat ciepła, nowoczesne, wysoko przeszklone konstrukcje dostarczające dużej ilości naturalnego światła pozwalają ograniczyć zużycie energii elektrycznej na potrzeby oświetlenia. Jak wskazuje [12], zastosowanie ogniw fotowoltaicznych jest bezpieczniejsze niż np. wykorzystanie elektrowni wiatrowych, ogniwa mogą zostać zamontowane prawie na wszystkich powierzchniach, ze względu na modułową budowę można dobrać wielkość instalacji w zależności od potrzeb, a także w razie konieczności cała instalacja może być rozbudowana. Natomiast poniesione nakłady finansowe dla takiej instalacji mogą się zwracać w zależności od wielkości instalacji, wielkości produkcji energii oraz także od tego, czy wyprodukowana energia jest przeznaczana na potrzeby własne, czy też jest odsprzedawana, jednak w większości przypadków taka inwestycja przynosi zyski w stosunkowo szybkim okresie od początku użytkowania ogniw. Oprócz aspektu ekonomicznego przez zastosowanie zielonego budownictwa otoczenie zyskuje nowoczesne obiekty o walorach architektonicznych, wykonane z materiałów niezagrażających środowisku oraz zdrowiu człowieka, a także podlegających ponownemu wykorzystaniu. Budynki z „zielonymi dachami” są kolejnym przykładem zielonej architektury, z wieloma pozytywnymi aspektami: przede wszystkim ekologicznym, ekonomicznym oraz społecznym. Zielen na dachach nie tylko może oczyszczać powietrze w centrach miast, gromadzić zapasy wody deszczowej, regulować temperaturę w budynkach, ale także może wpływać pozytywnie na samopoczucie przebywających w ich otoczeniu ludzi, pracujących na co dzień we wszechobecnym betonowym otoczeniu. To tylko kilka z wielu pozytywów, które niesie zastosowanie takiego rozwiązania, które powinny przemówić za częstszym korzystaniem z tego typu budynków [22].

Akty prawne ograniczające emisję zanieczyszczeń do atmosfery nie są jedynymi instrumentami Unii Europejskiej do przeciwdziałania zmianom klimatu. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE zobowiązuje państwa członkowskie do zapewnienia wyznaczonego udziału energii z OZE w zużyciu końcowym energii brutto do końca 2020 roku. Dyrektywa ta ma na celu promowanie korzystania z odnawialnych źródeł energii. Większy udział produkowanej energii ze źródeł odnawialnych to ograniczenie zużycia paliw kopalnych, a co za tym idzie, ograniczenie emisji szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery, które to w większości powstają w wyniku spalania tych surowców. Cała Wspólnota ma uzyskać pozyskanie zużywanej energii na poziomie 20%, dla Polski zostało to określone na 15%.

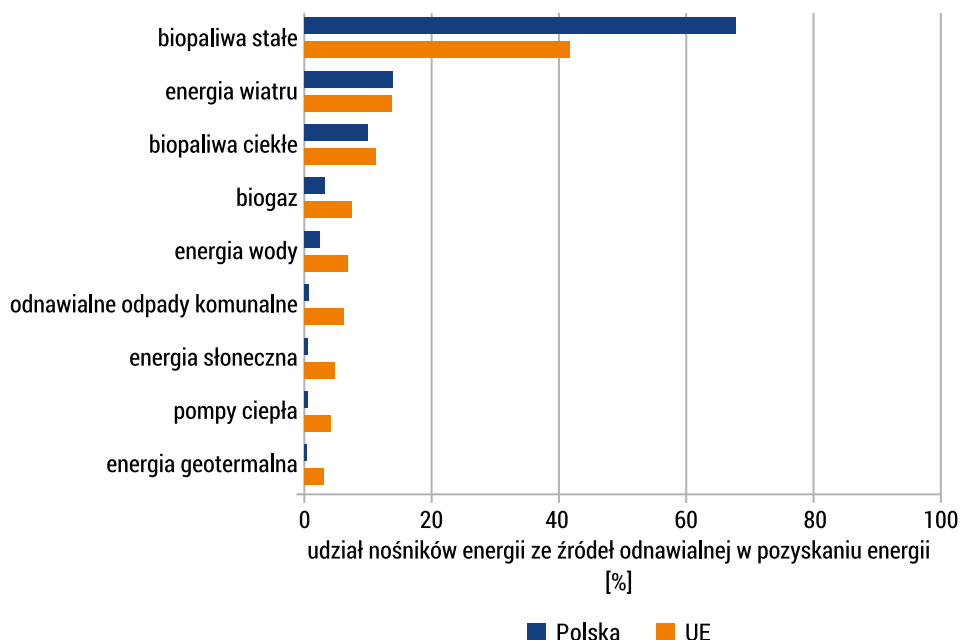
Jednak jak wynika z najnowszych danych Głównego Urzędu Statystycznego (rys. 6), cel ten nie zostanie osiągnięty, w 2019 roku udział ten wyniósł 12,18%, tempo przemian energetycznych w Polsce jest zbyt wolne, aby osiągać cele wspólnoty UE. Jest to podyktowane głównie przyczynami ekonomicznymi, obecna struktura sektora energetycznego w większości opiera się na energetyce zawodowej spalającej węgiel kamienny oraz brunatny, produkcja energii z innych źródeł jest stosunkowo droga, ze względu na koszty technologii i instalacji, a także dość długi okres zwrotu inwestycji. W ostatnich latach udział energii z OZE nieznacznie wzrósł, może to być podyktowane malejącymi kosztami takich technologii, co sprawia, że instalacje są bardziej dostępne, innym czynnikiem zachęcającym inwestorów do stawiania na inne źródła energii, takie jak energia słoneczna, wiatrowa czy też geotermalna, są programy dofinansowania instalacji proekologicznych.



RYS. 6. Udział energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii brutto w Polsce na lata 2010–2019

ŹRÓDŁO: [21].

Z opublikowanych danych raportu Głównego Urzędu Statystycznego z roku 2017 (rys. 7) wynika, że najwyższym udziałem w produkcji energii ze źródeł odnawialnych w Polsce i średniej państw UE wyróżniają się biopaliwa stałe, jest to niemal 68% ogólnej produkcji z OZE w naszym kraju, natomiast w UE jest to 42%. W Polsce w 2019 roku udział OZE w końcowym zużyciu energii brutto w elektroenergetyce wyniósł 14,33%, natomiast w ciepłownictwie i chłodnictwie wyniósł 15,98%. Cała struktura pozyskania zielonej energii może świadczyć o większym udziale odbiorców końcowych w wykorzystaniu takich surowców (biopaliwa są popularnym paliwem na cele ciepłownicze), a nośniki ekologiczne są mniej wykorzystywane przez energetykę zawodową, przemysłową.



RYS. 7. Pozyskanie energii ze źródeł odnawialnych wg nośników w 2017 roku

ŹRÓDŁO: [21].

Rozwiązania proekologiczne

Proekologiczne budynki powinny cechować się wysoką izolacyjnością przegród budowlanych, zastosowaniem w nich nowoczesnych, energooszczędnych systemów instalacyjnych, takich jak np. systemy rekuperacji. Ponadto korzystanie ze źródeł odnawialnych jest opłacalne także ekonomicznie, gdyż wysokie koszty instalacji maszyn i urządzeń rekompensują mniejsze koszty utrzymania w stosunku do korzystania z urządzeń bazujących na paliwach kopalnych. Do urządzeń, rozwiązań korzystających z odnawialnych źródeł energii można zaliczyć panele fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, kotły zasilane biomasą, pompy ciepła. Możliwość otrzymania dofinansowania do takich instalacji przez fundusze na rzecz ochrony środowiska powinna zachęcać do korzystania z rozwiązań proekologicznych. Ekologiczne rozwiązania to nie tylko maszyny i urządzenia, ale także rozwiązania konstrukcyjne budynku, takie jak zwarte bryły budynków, wielowarstwowe płyty, liczne przeszklenia ścian zewnętrznych oraz drzwi, stosowanie materiałów izolacyjnych, a także możliwie jak największa ilość materiałów budowlanych pochodzenia naturalnego, dzięki czemu otrzymujemy zieloną architekturę o wysokich walorach wizualnych.

Energia słoneczna

Jest ona jednym z najważniejszych źródeł energii odnawialnej, a możliwość jej wykorzystania zależy w dużym stopniu od położenia geograficznego i warunków klimatycznych. Energię solarną można wykorzystać na potrzeby produkcji energii elektrycznej i ciepłej. Należy tutaj dokonać zasadniczego podziału na dwie główne technologie, które wykorzystują ten rodzaj energii:

- panele fotowoltaiczne,
- kolektory słoneczne.

W ostatnich latach widoczny jest trend wzrostu udziałów w rynku energetycznym paneli fotowoltaicznych. Jest to spowodowane nie tylko bardziej dostępną technologią i aspektami finansowymi – jest to najtańsze i najbardziej ergonomiczne rozwiązanie, ale także dzięki wzrostowi świadomości społeczeństwa odnośnie do zmian klimatu. W 2019 roku produkcja energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych wyniosła 710,67 GWh przy mocy zainstalowanej 1539,26 MW [21].

Cały bezpośredni proces przemiany energii słonecznej na elektryczną odbywa się za pomocą ogniw fotowoltaicznych, które są urządzeniami półprzewodnikowymi (półprzewodnikiem najczęściej jest krzem) zawierającymi w swej strukturze złącze p-n (złącze dwóch półprzewodników niesamoistnych o przewodnictwie p – positive, dodatnim, i n – negative, ujemnym). Każdy moduł fotowoltaiczny można opisać parametrami, które mówią o ich jakości, są to m.in. współczynnik sprawności, prąd zwarcia (I_{sc}), napięcie ogniwa rozwartego (U_{oc}) czy też punkt mocy maksymalnej (P_{MPP}). Ponadto istotnym parametrem mającym wpływ na uzyskiwaną energię jest temperatura pracy ogniw. Jak podaje [15], producenci zazwyczaj podają dane znamionowe dla temperatury 25°C i gęstości promieniowania wynoszącej 1000 W/m², poniżej 25°C spadki temperatury wpływają na wzrost mocy maksymalnej, natomiast powyżej 25°C przyrost temperatury ma negatywny wpływ na ogniwa, powoduje spadek mocy maksymalnej. W instalacjach fotowoltaicznych moduły łączy się ze sobą równolegle lub szeregowo, w zależności od zapotrzebowania wartości napięcia i prądu instalacji. W połączeniu równoległym paneli prąd wzrasta proporcjonalnie do ilości modułów. Podczas montażu elementy łączone w łańcuch powinny mieć takie same parametry, degradacja prądowa jednego z elementów może wpływać na cały łańcuch. Z racji tego, że moduły dostarczają prąd stały, w całej instalacji niezbędne jest wykorzystanie falownika. Do zadań falownika należy także monitorowanie parametrów sieci (częstotliwość, napięcie, reakcja na zmiany lub odłączanie od sieci). Urządzenie te charakteryzują parametry, takie jak zakres napięć pracy, moc, minimalne i maksymalne napięcie wejściowe, napięcie startu oraz ilość wejść mocy. Wyróżnia się trzy rodzaje włączania falowników: w sposób szeregowy, centralny oraz jako mikroinwerter wbudowany w moduł. Od energii wytworzonej przez ten rodzaj instalacji wprowadzonej do sieci wymaga się wielu parametrów jakości: kształtu przebiegu napięcia i prądu.

Technologia wytwarzania energii elektrycznej za pomocą paneli fotowoltaicznych w obecnym czasie zyskała dużo na popularności, zarówno w dużej, jak i małej skali produkcji energii. Instalacje fotowoltaiczne stosuje się w następujących segmentach rynku:

- mikroinstalacjach (PV) do 10 kW na budynkach mieszkalnych,
- małe i średnie systemy PV (10–100 kW) instalowane na budynkach przemysłowych,
- duże systemy naziemne powyżej 100 kW.

Systemy fotowoltaiczne mają duży potencjał pod względem zasilania urządzeń na obszarach pozbawionych sieci elektroenergetycznej jak gospodarstw domowych, ze względu na możliwość pokrycia własnego zapotrzebowania na energię elektryczną, a podłączenie takich instalacji do sieci elektroenergetycznych i sprzedaż nadprodukcji energii może w długofalowej perspektywie prowadzić do zmniejszenia zużycia energii pochodzącej z instalacji energetyki zawodowej, a w konsekwencji tego do redukcji zużycia paliw kopalnych. Moduły fotowoltaiczne z reguły są montowane na dachach budynków, w zależności od typu jego dachu, na płaskich dachach budynków użyteczności publicznej, tak jak jest to przedstawione na rys. 8, są one montowane na mocowaniach, które zapewniają odpowiedni kąt padania promieni słonecznych na ogniwa. Coraz częściej są zintegrowane z fasadą budynku, moduły mogą zastąpić szyby w fasadach, dzięki czemu można zmniejszyć koszty ich instalacji, budynek zyskuje nietypowy, ciekawy wygląd. Na rys. 9 jest przedstawione zintegrowanie takiej instalacji z fasadą budynku na przykładzie gmachu Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, natomiast na domach jednorodzinnych najczęściej instalacje solarne są montowane zazwyczaj na dachach budynków [4].



RYŚ. 8. Instalacja fotowoltaiczna zamontowana na płaskim dachu

ŹRÓDŁO: [23].



RYS. 9. Ognia fotowoltaiczne na fasadzie budynku

ŹRÓDŁO: [24].

W Polsce wykorzystanie kolektorów słonecznych jest dość popularnym rozwiązaniem, polega głównie na pozyskiwaniu ciepła na cele użytkowe: ogrzewanie budynków lub wykorzystanie ogrzanej wody jak c.w.u. (ciepła woda użytkowa). Kolektory solarne są traktowane jako wymienniki ciepła, energia promieniowania słonecznego jest w nich przetwarzana w ciepło za pośrednictwem medium takiego jak woda, powietrze lub innego niezamarzającego płynu. Budowa kolektorów składa się z powłoki szklanej jedno- lub dwuwarstwowej, absorbera metalowego (najczęściej jest z miedzi) z zamocowanym od spodu układem kanałowym przyległym do izolacji z wełny oraz do obudowy, a także składa się z przestrzeni dylatacyjnej. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje kolektorów: płaskie oraz próżniowe. Podobnie jak moduły fotowoltaiczne, mogą być instalowane na dachach budynków (mogą być zamontowane jako element poszycia bądź umieszczone na statywie) oraz na ziemi na wolnostojących konstrukcjach, natomiast nie należy ich montować w miejscach zacienionych. Ważnym czynnikiem przy podejmowaniu decyzji o instalacji kolektorów słonecznych jest dobór właściwego systemu o dobrej sprawności, o wysokim współczynniku absorpcji krótkofalowego promieniowania słonecznego, a jak najmniejszym współczynniku emisji w przypadku zakresu długich fal. Wykorzystanie kolektorów solarnych do ogrzewania budynków w warunkach Polski w ujęciu całorocznym jest dość kosztowne. Mogą one w polskich warunkach dostarczyć w ciągu roku średnio 450–600 kWh/m², co wystarczy do ogrzania 1,5 m² słabo zaizolowanego budynku lub do 6 m² dobrze zaizolowanego budynku. Problematiczne jest zmagazynowanie pozyskanej energii cieplnej na przestrzeni czasu, potrzebny byłby zbiornik pozwalający zgromadzić ogromną ilość czynnika do zmagazynowania ciepła. Przy nierentowności wykorzystania kolektorów na potrzeby ogrzewania budynków taki rodzaj instalacji może z powodzeniem być wykorzystywany do produkcji ciepłej wody użytkowej. Stosuje się tu głównie kolektory płaskie (rys. 10), np. 3–5 m² powierzchni kolektora zaspokaja potrzeby 4-osobowej rodziny, wszystko zależy

od zapotrzebowania na ciepłą wodę. Takie rozwiązanie z powodzeniem może znaleźć zastosowanie zarówno w domach jednorodzinnych, jak i innych obiektach, takich jak budynki użyteczności publicznej [4].



RYS. 10. Kolektor słoneczny płaski, aluminiowy

ŹRÓDŁO: [25].

Energię słoneczną w budownictwie można także wykorzystać w sposób pasywny. W pomieszczeniach, gdzie niezbędne jest wysokie natężenie światła w celu zastąpienia światła sztucznego można doprowadzić maksymalną ilość światła w pierwotnej postaci. Taką możliwość dają np. przeszklenia oraz świetliki rurowe.

Stosując liczne przeszklenia, tak jak na rys. 11, nie tylko zyskujemy dużą ilość naturalnego światła, otrzymujemy także odbiornik energii cieplnej, ale pod warunkiem, że uzyska on maksymalne jej ilości przy minimalnych stratach. Dlatego przy projektowaniu należy zwrócić uwagę na czynniki takie jak usytuowanie względem stron świata, ewentualne zacienienia, materiał użyty do konstrukcji oraz – aby zminimalizować ewentualne straty ciepła – rodzaj zastosowanej izolacji. Z rozwiązań konstrukcyjnych podwójne oszklenie zmniejsza straty ciepła w okresie zimowym, natomiast klejone szkło refleksyjne pozwala na wprowadzenie większej ilości światła. Najczęściej konstrukcja jest oparta na aluminiowym lub stalowym szkieletcie, ale także drewno może być dobrym materiałem ze względu na dobre właściwości izolacyjne. Budynki z licznymi przeszkleniami są postrzegane jako nowoczesne, wyróżniają się spośród zabudowy, ponadto wpływają na przebywających w nich ludzi pozytywnie, podczas zimy zapobiegają tzw. depresji zimowej, dzięki temu takie rozwiązanie konstrukcyjne znajduje zastosowanie w budynkach użyteczności publicznej.



RYS. 11. Budynek użyteczności publicznej z licznymi przeszkleniami

ŹRÓDŁO: [26].

Świetliki rurowe Sun Tunnel (rys. 12) są rozwiązaniem dostarczającym naturalnego światła do pomieszczeń, gdzie nie ma możliwości zastosowania tradycyjnych okien. Składają się z kopuły zbierającej światło, która jest umieszczona zazwyczaj na dachu, giętkiej rury światłonośnej (jest nią transportowane światło) oraz rozpraszacza pryzmatycznego, który oświetla pomieszczenie. Do korzyści takich instalacji można zaliczyć pozytywny wpływ na ludzi dzięki naturalnemu światłu, nowoczesny i elegancki wygląd oraz oszczędność zużycia sztucznego światła [4].



RYS. 12. Zastosowanie świetlików rurowych w budynku publicznym (bibliotece)

ŹRÓDŁO: [27].

Energia wiatrowa

Różnica ciśnień atmosferycznych jest przyczyną powstawania innego, naturalnego źródła energii, chodzi tutaj o masy powietrza (potocznie nazywane wiatrem) wykonujące ruch (pracę) poziomo nad powierzchnią ziemi w wyniku różnicy ciśnień dwóch ośrodków atmosferycznych. Energia ta nie jest nowym źródłem, od setek lat służyła do żeglugi, melioracji bądź jako siła napędowa w młynach. Obecnie znalazła szerokie zastosowanie w produkcji energii elektrycznej za pomocą różnego rodzaju turbin, gdzie jest siłą napędową ich działania. Wiatr trafiający na opór, czyli turbinę, wprawia ją w ruch poprzez energię kinetyczną, która jest przekształcana na energię mechaniczną poprzez ruch obrotowy wirnika, skąd energia jest przenoszona do generatora energii elektrycznej za pomocą wału i przekładni. Aby wirniki wykonały pracę, zazwyczaj potrzebny jest wiatr o prędkości 7 km/h. Jest to „czysta” energia, gdyż należy do źródeł odnawialnych i jest w większości na ogół dostępna (jest to uzależnione od lokalnych warunków, a produkowana z niej energia jest w pełni ekologiczna, czego skutkiem jest rosnący udział w ogólnej produkcji energii odnawialnej) [52]. Rozwój technologiczny, spadek kosztów takich inwestycji napędzają rozwój energetyki wiatrowej. Jak wynika z danych Polskich Sieci Energetycznych (PSE) z listopada 2020 roku, farmy wiatrowe zainstalowane w Polsce posiadają moc 6430,285 MW [57], co stanowi do 65% ogólnej mocy zainstalowanych odnawialnych źródeł energii elektrycznej w naszym kraju i na II kwartał 2019 roku wyprodukowały ok. 84,5% ogólnej energii elektrycznej z OZE (Urząd Regulacji Energii – URE). Jest to więc najpopularniejsza metoda przetwarzania „zielonej energii” na energię elektryczną, przy czym takie instalacje nie znajdują zastosowania w produkcji energii cieplnej. Można wyróżnić rodzaje elektrowni wiatrowych ze względu na oś obrotu wirnika – poziomą lub pionową, a także ze względu na moc znamionową – mikro, małe i duże instalacje.

- Turbiny o pionowej osi obrotu (z ang. VAWT – Vertical Axis Wind Turbines) przedstawione na rys. 13 są obiecującym kierunkiem pod względem produkcji energii z wiatru. W przeciwieństwie do turbin o poziomej osi obrotu pracują niezależnie od kierunku wiatru, montaż turbin nie wymaga wysokich konstrukcji, mogą być montowane na dachach, innych istniejących konstrukcjach, są odporne na duże prędkości wiatru, ponadto wyróżnia je cicha praca oraz niższy koszt inwestycji w porównaniu z turbinami poziomymi.
- Turbina o poziomej osi obrotu (z ang. HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines) przedstawiona na rys. 14 charakteryzuje się większą sprawnością niż turbina pionowa, jednak wymaga mechanizmów, które zmieniają usytuowanie wirnika względem kierunku wiatru (zawietrznie bądź nawietrznie), emituje większy poziom hałasu, do wad można zaliczyć mechanizm ograniczający obroty turbiny przy silnym wietrze [52].



RYS. 13. Turbina o pionowej osi obrotu typu helix

ŹRÓDŁO: [28].



RYS. 14. Turbina wiatrowa pozioma trzyłopatowa

ŹRÓDŁO: [29].

Obecnie większość montowanych turbin ma poziomą oś obrotu wirnika i trzy łopaty wirnika – jest to najbardziej optymalna liczba. Można wyróżnić: jednopłatowe, dwupłatowe, trzyłopatowe z wielopłatowymi silnikami, z dyfuzorem oraz wykorzystujące efekt Magnusa – zamiast łopat są obrotowe wirniki, które obracając się, wytwarzają siłę nośną – powstaje siła prostopadła do kierunku ruchu, działająca na obracający się walec bądź inną bryłę obrotową, która porusza się względem płynu (cieczy).

Natomiast turbiny o pionowej osi obrotu znajdują zastosowanie w zurbanizowanych obszarach, mogą zasilać urządzenia pomiarowe, lampy, banery, domy jednorodzinne oraz domki letniskowe, ogółem tam, gdzie standardowa sieć energetyczna jest trudno dostępna.

Mikroelektrownie wiatrowe posiadają moc do 100 W i służą głównie do zasilania akumulatorów, które służą najczęściej do oświetlania części domów. Małe wiatrowe elektrownie mają moc w zakresie od 100 W do 50 kW i są wykorzystywane głównie przez gospodarstwa domowe, pozwalają zasilać oświetlenie, urządzenia i sprzęt

oraz układy pomp. Największe duże elektrownie wykorzystujące wiatr mają moc większą niż 100 kW i stosuje się je głównie do produkcji energii elektrycznej, która jest dostarczana do sieci elektroenergetycznych [30, 31].

Nie jest to jedyna z korzyści płynących z tej technologii pozyskiwania energii. Oprócz tego, że nie generuje zanieczyszczeń do atmosfery, nie wpływa na degradację gleby oraz wód, jest konkurencyjna ekonomicznie (w porównaniu ze źródłami konwencjonalnymi na cenę nie wpływają zmiany wartości surowca), nie wymaga dużych powierzchni, stwarza możliwość zagospodarowania nieużytków, generuje dochody bez znacznych nakładów pracy.

Niestety turbiny wiatrowe nie są pozbawione wad, do których można zaliczyć: negatywny wpływ oddziaływania na człowieka oraz otoczenie, osoby mieszkające w odległości do 4 km od turbiny odczuwają efekt migotania cienia lub syndromu turbin wiatrowych, które powodują bóle głowy czy też problemy ze snem. Farmy wiatrowe emitują charakterystyczny dźwięk, który także może być uciążliwy w dłuższym okresie czasu, są niepożądane w pobliżu terenów mieszkalnych, natomiast całe instalacje ingerują znacząco w otaczający krajobraz ze względu na górowanie nad okolicznymi budynkami, terenem, a ponadto wprowadzają nienaturalny wygląd do krajobrazu. Inne zagrożenie niesie ryzyko oderwania się elementów turbiny, a w okresie zimowym odłamków lodu znajdujących się na śmigłach, dodatkowo zauważa się zwiększoną śmiertelność ptaków w pobliżu takich instalacji. Aby poprawnie zlokalizować taką instalację, należy przeprowadzić pomiary oraz analizę parametrów wiatru. Zróznicowanie w mocy dostępnych siłowni sprawia, że mogą one znaleźć zastosowanie nie tylko jako duże elektrownie, ale także jako instalacje zaspokajające potrzeby energetyczne różnych rodzajów zakładów, wiejskich gospodarstw domowych [7].

Biomasa jako źródło energii

Biomasą są produkty ulegające biodegradacji (rozkładowi) pochodzące z rolnictwa (roślinne i zwierzęce), leśnictwa, rybołówstwa i innych działów przemysłu, a także odpady organiczne i inne pozostałości z wyżej wymienionych źródeł, które mogą zostać wykorzystane w celach energetycznych. Ciekawym rozwiązaniem jest pozyskiwanie biopaliw z odpadów rolno-spożywczych, ze względu na ich dużą ilość powstaje problem ich zagospodarowania. Podczas badań na temat właściwości paliwowych łusek cebuli Dołżyńska i inni [1] przeprowadzili zagęszczanie cebuli mielonej oraz analizę właściwości energetycznych tego produktu. Ze względu na dużą zawartość CO i NO oraz wysoką emisję SO₂ paliwo te nie spełnia wymagań, jednak ze względu na wysoką zawartość siarki istnieje możliwość dodania łupin cebuli do materiałów o wysokiej zawartości chloru w celu zmniejszenia ryzyka korozji chlorkowej w kotłach. Dlatego też jest to obecnie popularne zagadnienie, wymagające dalszych analiz i badań nad technologią produkcji oraz spalania paliw z odpadów rolno-spożywczych. Biomasa

jako naturalne źródło energii ma szereg zalet, są to m.in. bilans emisji powstałych w wyniku spalania zanieczyszczeń jest redukowany w wyniku procesu fotosyntezy, stwarza możliwość zagospodarowania odpadów oraz nadwyżki produkcji roślinnej, wykorzystuje się lokalne dostępne zasoby, prowadzi do zróżnicowania źródeł energii, co wpływa na uniezależnienie energetyczne z jednego nośnika. Pozyskiwanie energii odnawialnej z nośnika, jakim jest biomasa stała, ma największy udział w produkcji tej energii zarówno w Polsce, jak i Unii Europejskiej. Ponadto biomasę uznaje się za trzecie źródło energii na świecie (po energii słonecznej i wiatrowej) pod względem wielkości i dostępnych zasobów [13]. W Polsce wykorzystanie biopaliw stałych jest głównie ukierunkowane na produkcję ciepłą, podgrzewanie wody na potrzeby centralnego ogrzewania w budownictwie mieszkaniowym, jak i na wytworzenie pary w instalacjach przemysłowych. Jest to podyktowane tym, że technologia spalania biomasy jest bardziej dostępna dla instalacji prosumenckich niż inne złożone metody pozyskiwania energii z tego nośnika (jak np. fermentacja metanowa w biogazowniach). Jednak właściwości biomasy są różne, zależne od danego surowca, tak więc stwarza to pewne komplikacje w jej wykorzystaniu, np. nieekonomiczny jest transport mało energetycznego surowca o dużej objętości na duże odległości. Dlatego często biomasa jest poddawana przetworzeniu, np. drewno, słomę przetwarza się do postaci pelletu lub brykietu, następuje przemiana biomasy stałej na paliwo płynne bądź gazowe. Istnieje wiele metod wytworzenia energii z biomasy, np. poprzez bezpośrednie jej spalanie (w kotłach spala się drewno, pellet, zrębki oraz słomę), jest spalana wraz z innymi surowcami (węglem, gazem, olejem), przetwarzanie na paliwa ciekłe (np. etanol, metanol) i gazowe (m.in. biogaz, gaz drzewny), a następnie spalanie tych produktów. Energetyczna wartość biomasy, czyli kaloryczność, z natury jest niższa od wartości kalorycznej np. węgla, dla drewna w postaci pelletu wartość energetyczna przy wilgotności od 7% do 12% wynosi 16,5–19,0 MJ/kg, a słomy może wynosić od 14,3 do 15,2 MJ/kg przy wilgotności 10–20% [32].

Obecnie rosnącą popularnością cieszą się kotły zasilane paliwem typu pellet, który jest przedstawiony na rys. 15. Sprawność nowoczesnych kotłów przekracza 90%, emisja zanieczyszczeń podczas spalania biopaliwa jest znikoma, bilans CO₂ jest praktycznie zerowy, a stopień automatyzacji sprawia, że są one praktycznie bezobsługowe, producenci oferują zarówno instalacje dla małych, jak i większych odbiorców, więc taki kocioł może być zastosowany nie tylko w domach jednorodzinnych, ale także np. w budynkach użyteczności publicznej (takie instalacje różnią się mocą, kocioł dobiera się na podstawie bilansu cieplnego obiektu, natomiast do szybkiego doboru można posłużyć się wskaźnikiem powierzchniowym zapotrzebowania na ciepło dla ogrzewanego budynku – dla budynków dobrze zaizolowanych z nowoczesną instalacją przyjmuje się go na poziomie 70–80 W/m²) [33]. Ponadto obecnie kotły są przystosowane do spalania różnego rodzaju paliw, tak więc są urządzeniami uniwersalnymi. Biomasa jest konkurencyjnym nośnikiem energii, koszty eksploatacji kotła opalanego tym paliwem są niższe niż koszty wykorzystania np. oleju opałowego, gazu ziemnego czy prądu. Natomiast wykorzystanie biomasy stałej w większych instalacjach rośnie

z każdym rokiem, elektrownie oraz elektrociepłownie w wyniku modernizacji zużywają coraz większe ilości biomasy, rozwój tej gałęzi przemysłu energetycznego powoduje zwiększone zapotrzebowanie na ten surowiec w sektorze rolnym oraz leśnym.



RYS. 15. Instalacja CO wykorzystująca piec na pellet

ŹRÓDŁO: własne.

Mniej popularne są natomiast instalacje wykorzystujące biomasę przetworzoną na paliwa ciekłe i gazowe produkujące energię ciepłą, są one głównie wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej (z danych URE w 2019 roku instalacje wykorzystujące biogaz miały udział ok. 6,7% w ogólnej produkcji energii elektrycznej z OZE). Są to zazwyczaj większe biogazownie rolnicze, wykorzystujące produkty, odpady roślinne i zwierzęce, koszty takiej inwestycji są wysokie, stąd też mały udział tej technologii do wykorzystania biomasy.

Biomasa jako materiał w budownictwie

Procesy budowlane w kontekście ochrony środowiska można wyróżnić na obszarze zastosowania materiałów ekologicznych w realizacjach budowlanych.

Wykorzystanie biomasy nie ogranicza się tylko do celów energetycznych, jest to surowiec, który może znaleźć zastosowanie w wielu branżach, chociażby w budownictwie. Naturalnym surowcem, który jest wykorzystywany od tysięcy lat, jest drewno. Wznoszone z niego były wszelkiego rodzaju budynki, domy, kościoły. Nadal jest wykorzystywane jako elementy konstrukcyjne budynków, np. więźby dachowe,

domki letniskowe, przy budowie różnego rodzaju wiat i innych konstrukcji. Obecnie drewno poddaje się wielu procesom, takim jak prefabrykacja, które mają na celu podwyższenie jakości i trwałości otrzymanych produktów takich jak drewno klejone krzyżowo lub warstwowo, jako materiał izolacyjny służy wełna drzewna pod postacią granulatu lub płyt. Drewno z dębu korkowego znajduje zastosowanie w architekturze wnętrz. Wykorzystanie drewna w budownictwie przyczynia się do redukcji emisji związanych z procesem wytwarzania, transportem i wykorzystaniem, drewniane budynki mają dobrą charakterystykę energetyczną. Izolacje cieplne (płyty, maty) mogą być wytwarzane z konopi i lnu. Konopie są także wykorzystywane do produkcji bloczków kompozytowych Hempcrete (mieszanina cementu, piasku, wapna i konopi, która tworzy beton konopny / kompozyt wapienno-konopny).

Ponadto paździerz konopne można wykorzystać do kompozytu wapienno-cementowego o właściwościach termoizolacyjnych. Jak wskazuje Pietruszka [10], ich wysoka porowatość pozytywnie wpływa na właściwości termiczne wykonanych z ich udziałem kompozytów. Dodatkowo przewodnictwo ciepła dla paździerzy konopnych wynosi ok. 0,04–0,06 W/mK, co jest zbliżone do wartości materiałów takich jak styropian lub wełna mineralna, a przewodnictwo ciepła kompozytu wapienno-konopnego to od 0,07 do 0,14 W/mK. Właściwości termoizolacyjne komponentów z dodatkiem wymienionej biomasy zależą od proporcji poszczególnych składników produktu, im mniejsza gęstość objętościowa, tym lepsze parametry izolacyjne [3].

Innym ciekawym rozwiązaniem jest produkcja materiałów izolacyjnych z makulatury. Wykorzystuje się do tego wysokogatunkowy papier, który jest nasycany solami borowymi mającymi chronić materiał przed grzybami i pleśnią [8].

Kolejnym rozwiązaniem proekologicznym, które wiąże się z utylizacją ubocznych produktów spalania biomasy (UPS), jest wykorzystanie ich jako surowców wtórnych do produkcji materiałów budowlanych. Chodzi tutaj o wykorzystanie lotnych i dennych popiołów w produkcji betonu. Duże ilości powstających popiołów wymagają zagospodarowania ich w racjonalny sposób, tak aby nie zagrażały środowisku. Popiół ma miękkość zbliżoną do cementu, a skład chemiczny i fazowy jest podobny do ilastych surowców mineralnych, tak więc nadaje się jako dodatek do masy cementowej, jak wskazuje [Pietrzak, 2015], badania na temat wytrzymałości zapraw pozwalają na zastąpienie do 10% cementu bez utraty jakichkolwiek wartości mechanicznych. Obecność takich popiołów w 25% masy cementu powoduje opóźnienie procesu wiązania zaczynu, a także spowalnia proces narastania wytrzymałości na ściskanie betonu w porównaniu z zastosowaniem czystej zaprawy cementowej [6]. Natomiast produkty ze współspalania biomasy i węgla (lotne popioły) mogą być wykorzystane do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego w ilości do 12%. Jak pisze [6], istnieje także możliwość przetwarzania na cele budowlane popiołu powstającego w wyniku spalania poprzez termiczną mineralizację osadów ściekowych.

Popioły lotne będące dodatkiem do betonu powinny spełniać pewne normy, o których mówi norma PN-EN 450-1:2012. Dopuszcza się w niej stosowanie popiołów ze współspalania węgla i biomasy, osadami ze ścieków czy też ze spalania innych

produktów materii organicznej. Dzięki zastosowaniu takich rozwiązań można otrzymać trwały materiał o wysokiej jakości, o właściwościach proekologicznych i który jest bardziej opłacalny ekonomicznie [6].

Inne źródła energii odnawialnej

Energia wodna

Elektrownie wodne mają niewielki udział w strukturze produkcji energii elektrycznej, jest to podyktowane głównie tym, że zasoby wodne w Polsce są niewielkie. Stąd też mała liczba takich instalacji, zauważa się jedynie niewielki wzrost małych elektrowni wodnych do 100 kW budowanych na istniejących stopniach wodnych przez prywatnych inwestorów [4]. Energia elektryczna jest generowana poprzez generatory podczas przepływu wody przez napędzające turbiny. Wyróżnia się rodzaje obiektów hydroenergetycznych: zbiornikowe i przepływowe, pływakowe, pompowe. Do zalet energii wodnej oprócz produkcji zielonej energii można zaliczyć małe nakłady eksploatacyjne w porównaniu z elektrowniami cieplnymi, brak emitowanych zanieczyszczeń do środowiska, regulacja poziomu wód, zbiorniki wodne przy siłowniach mogą pełnić funkcję przeciwpowodziową [4].

Energia odnawialna z odpadów komunalnych

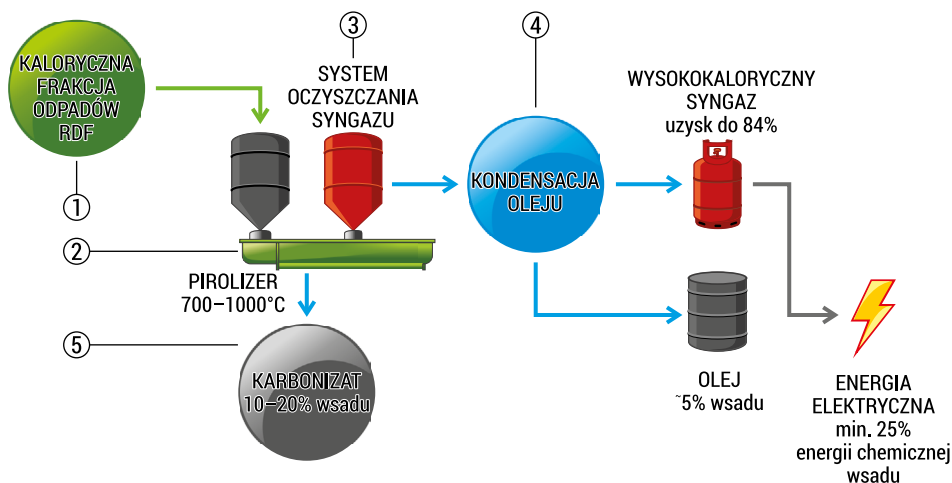
Wobec dużego zużycia konsumpcyjnego produktów obserwuje się zwiększoną ilość odpadów powstającą w wyniku nadmiernych zakupów, co tworzy wyzwanie do zagospodarowania tych odpadów, które często są traktowane jako zanieczyszczenia, które powinny być zneutralizowane. Składowanie nie jest sposobem zagospodarowania odpadów komunalnych, często są one źródłem emisji zanieczyszczeń. Do takich odpadów należą odpady z gospodarstw domowych, odpady biodegradowalne (osady ściekowe, żywność, papier, drewno, tkaniny, odchody). Dlatego też rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie różnych odpadów do celów energetycznych, zarówno do produkcji energii elektrycznej, jak i ciepłej. Najpopularniejszym sposobem utylizacji odpadów jest ich spalanie w spalarniach, czyli metoda termochemiczna, jednak niesie ona ze sobą dużą emisję szkodliwych gazów do atmosfery. Do odzysku energii z odpadów można doprowadzić biologicznie poprzez fermentację beztlenową, w wyniku czego otrzymywany jest biogaz. W ten sposób mogą zostać zutyliczowane odpady organiczne, ściekowe czy zwierzęce, otrzymany biogaz o zawartości CH_4 powyżej 40% nadaje się jako paliwo w transporcie, może być przesyłany w sieci gazowej jako palny gaz, może posłużyć do produkcji zarówno energii elektrycznej, jak i ciepłej.

Innym sposobem zagospodarowania i neutralizacji odpadów jest ich ponowne wykorzystanie, czyli recykling. Pozwala to na odzysk surowca, co wpływa także na zapotrzebowanie na dany surowiec i zmniejsza się przez to jego produkcja pierwotna.

Jedną z metod neutralizacji odpadów, która nie wpływa w znaczący sposób na środowisko, jest technologia termicznego przetwarzania odpadów (piroliza, zgazowanie), obecne technologie pozwalają na przeprowadzenie tego procesu, którego produktem jest wytworzona energia.

Podczas pirolizy odbywa się proces zwęglania, czyli termicznej transformacji substancji organicznych o wysokiej zawartości węgla, proces odbywa się w wysokich temperaturach (300–800°C) i w środowisku pozbawionym tlenu. Rodzaj i właściwości odpadu, a także panująca temperatura w procesie oraz czas przebywania w reaktorze warunkują skład oraz ilość produktów procesu. Jego produktem jest gaz pirolityczny, w którego skład wchodzi CO, CO₂, metan, etan, wodór, frakcja stała oraz frakcja ciepla zawierająca głównie mieszaninę wody, olejów i smoły. Natomiast wartość opałowa otrzymanego gazu wynosi od 5 do 15 MJ/m³ i może być spalany w kotle bez schładzania oraz oczyszczania, w przypadku wykorzystania go poza instalacją powinien być poddany kondensacji ze względu na liczne zanieczyszczenia. Oczyszczony może być wykorzystany w turbinach gazowych lub w silnikach spalinowych [5].

Jak wskazują Jamrozik i inni [5], proces zgazowania polega na termicznym rozkładzie materii organicznej przy niedoborze tlenu, w wyniku czego powstaje gaz generatorowy, jest mieszaniną gazów takich jak CO, CO₂, H₂, CH₄. Cała reakcja przebiega w zakresie temperatur od 500 do 1600°C, dzięki czemu węgiel mineralny zawarty w odpadach ulega niepełnemu utlenieniu do CO. Wartość opałowa otrzymanego gazu waha się od 8 do 14 MJ/m³, innymi ubocznymi produktami procesu są lotne i ciekłe smoliste substancje i pozostałość mineralna, czyli popiół. Otrzymany gaz po oczyszczeniu może posłużyć jako paliwo w silniku spalinowym, w wyniku czego można produkować energię elektryczną i ciepłą (kogeneracja).



RYS.16. Schemat pozyskiwania energii za pomocą procesu pirolizy

ŹRÓDŁO: [34].

Energia geotermalna

Zalicza się do odnawialnych źródeł energii, gdyż pochodzi z wnętrza kuli ziemskiej, które jest traktowane jako niewyczerpane źródło energii [4]. Energia jest zawarta w wodach geotermalnych wydobywanych na powierzchnię ziemi poprzez odwierty (podobnie jak eksploatacja złóż ropy naftowej i gazu), pobierana jest gorąca woda, natomiast zimna jest wtłaczana do złoża, a całość pracuje jak kocioł zasilany energią Ziemi. Wody z wnętrza Ziemi są zazwyczaj mocno zasolone. Ten rodzaj energii wykorzystuje się jako źródło energii cieplnej w układach centralnego ogrzewania, produkcja energii elektrycznej jest nieopłacalna ekonomicznie, wyjątek stanowią bardzo gorące źródła.

Na terenie Polski występują dość duże zasoby wód geotermalnych, przykładowo na Podkarpaciu są one na głębokości ok. 1000 metrów pod powierzchnią ziemi i dochodzą do 80°C, na terenach nizinnych są to głębokości rzędu 3000 metrów, dlatego ewentualne wydobywanie generowałoby wysokie koszty [4].



RYS. 17. Pompa ciepła do przygotowywania c.w.u. wykorzystująca powietrze

ŹRÓDŁO: własne.

Pompy ciepła są urządzeniami przekształcającymi energię o niskiej temperaturze z wód powierzchniowych, gruntu lub instalacji wentylacyjnych bądź powietrza (jak na rys. 17), przenosząc ją na wyższy poziom, do tzw. górnego źródła, gdzie oddawane jest ciepło z pompy. Wykorzystują one związek pomiędzy oddawaniem a pobieraniem ciepła (parowanie i skraplanie), czyli zależność temperatury wrzenia od ciśnienia. Mogą posłużyć do ogrzewania, ogrzewania ciepłej wody użytkowej

oraz jako odbiornik ciepła w układach klimatyzacji. Wymiary urządzenia pozwalają na ich instalacje w budynkach, typowa pompa ciepła składa się ze sprężarki, z wymiennika płytowego, aparatury chłodniczej oraz urządzeń pomocniczych takich jak pompy obiegowe. Urządzenia te są zasilane elektrycznie, produkują kilkakrotnie więcej energii, niż jej pobierają, ich wskaźnik efektywności waha się od 4 do 7. Wysokie koszty pomp ciepła powodują, że nie jest to jeszcze popularne rozwiązanie, jednak ze względu na duże korzyści płynące z zastosowania pomp ciepła (m.in. wysoka efektywność i sprawność, niskie koszty eksploatacji) powinny one z czasem mieć większy udział w produkcji energii cieplnej [4].

Inne rozwiązania

Proekologicznym rozwiązaniem chroniącym budynki przed dużymi stratami ciepła jest termoizolacja obiektów. Docieplenia budynków wykonuje się od strony, z której panuje niższa temperatura, aby uniknąć zjawiska kondensacji powierzchniowej, czyli zawilgocenia wewnątrz przegrody, co może skutkować rozwojem pleśni. Dobór grubości oraz rodzaj izolacji są zależne m.in. od danego klimatu, w którym znajduje się budynek, na podstawie współczynnika przenikania ciepła U . Najczęściej do termoizolacji służy styropian, ze względów na niskie koszty materiału, do ociepleń stosuje się także wełny mineralne, szklane oraz skalne [4].

Możliwość wykorzystania wody opadowej (deszczowej)

Przy dużym zużyciu wody słodkiej w budynkach użyteczności publicznej, takim jak np. uczelnia wyższa, ważne jest zarządzanie zasobami wody w sposób racjonalny. Polskie zasoby wodne są jednymi z najniższych spośród państw europejskich, w przeliczeniu na 1 mieszkańca wynoszą one ok. $1660 \text{ m}^3/\text{rok}$ przy średniej europejskiej $4560 \text{ m}^3/\text{rok}$. Jednym ze sposobów na ograniczenie zużycia wód jest wdrażanie systemów wykorzystujących wody opadowe. Woda deszczowa w zależności od typu instalacji oraz od tego, gdzie jest gromadzona, może być wykorzystywana np. do nawadniania zieleni, prania, mycia urządzeń czy też spłukiwania toalet. Systemy wykorzystujące wody opadowe coraz częściej są instalowane przy uczelniach wyższych, dzięki takiemu rozwiązaniu można ograniczyć zapotrzebowanie na wodę wodociągową [14].

Podsumowanie

Emisja wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń zarówno do powietrza, wody, jak i gleby stanowi poważny problem, który nie może być bagatelizowany. Jest to zagrożenie nie tylko dla środowiska, ale także dla ludzi. Liczne zanieczyszczenia odprowadzane do atmosfery i środowiska powodują zmiany klimatu, degradację środowiska naturalnego

są źródłem wielu chorób, przyczyniają się do śmierci ludzi. Podjęte inicjatywy, a także wprowadzanie nowych, sprzyjających środowisku rozwiązań mogą zminimalizować zachodzące zmiany klimatu. Wzrost świadomości społeczeństwa ze względu na rosnące zagrożenie przyczynia się do przyspieszenia tempa przemian energetycznych w Unii Europejskiej i Polsce. Budownictwo jest ważnym sektorem związanym z emisją zanieczyszczeń, głównie chodzi o budownictwo mieszkaniowe, gdzie poprzez produkcję energii ciepłej technologią spalania bezpośredniego emituje się do atmosfery duże ilości zanieczyszczeń, pyłów zawieszonych.

Rosnące wymagania dotyczące ochrony środowiska postawiły wyzwanie poszukiwania alternatyw w zakresie produkcji energii elektrycznej i ciepłej, a także metod ograniczania ich zużycia. Wyżej wymienione technologie, metody pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych oraz ograniczające jej zużycie mają pozytywny wpływ na środowisko w kontekście walki ze zmianami klimatu. Zwiększający się dostęp do rozwiązań typu panele fotowoltaiczne czy pompy ciepła to zasługa nie tylko rozwoju technologii, ale także programów dofinansowań do tych urządzeń, zwiększenia świadomości społeczeństwa odnośnie do oddziaływania na środowisko. Wykorzystanie energii wiatru, słońca do produkcji energii elektrycznej ogranicza zapotrzebowanie na tę energię z sieci przemysłowej, ponadto łącząc instalacje przetwarzające energię z tego nośnika z technologią pozyskiwania ciepła z ziemi za pomocą pomp ciepła, otrzymujemy w miarę samowystarczającą instalację. Wykorzystanie proekologicznych źródeł energii to nie tylko pozytywny aspekt środowiskowy, obecnie zielona źródła staje się inwestycją uzasadnioną ekonomicznie, która w stosunkowo krótkim okresie może przynosić finansowe korzyści. Uczelnia wyższa jako instytucja publiczna związana z nauką powinna być prekursorem w wykorzystaniu wymienionych wcześniej rozwiązań, jej budynki winny być przyjazne środowisku jako przykład dla innych instytucji oraz konsumentów dużych ilości energii.

Wprowadzenie instalacji do produkcji energii ciepłej i elektrycznej z odnawialnych źródeł, tj. słońca, wiatru, biomasy, oraz zastosowanie naturalnych materiałów budowlanych wpływa na ochronę środowiska naturalnego poprzez rezygnację z paliw kopalnych i sztucznie wytworzonych materiałów. Zastosowanie kompozytu wapienno-konopnego jako wypełnienia ścian w porównaniu z innymi technologiami budowy przegród, takimi jak płyta warstwowa, jest technologią droższą, jednak zaletą hempcrete jest pozytywny aspekt ekologiczny. Ponadto ściany wykonane z hempcrete są niepalne, mają bardzo niski współczynnik przenikania ciepła, ok. $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, co czyni je dobrym izolatorem ciepła w budynku.

Wykorzystanie OZE w budynku zaspokaja znaczną część energii elektrycznej, pozostała część energii może być wykorzystana na inne potrzeby bądź może trafiać do sieci elektroenergetycznej, wpływając na zmniejszenie produkcji tego rodzaju energii w elektrowniach zawodowych.

Istnieje wiele programów i funduszy wspierających działania na rzecz ochrony Ziemi. Inwestycje z zakresu energetyki odnawialnej są finansowane zarówno przez instytucje krajowe, jak i przez Unię Europejską. Jest to zazwyczaj pomoc w postaci

dofinansowań bądź pożyczek (tak jak wyżej wymieniony program LIFE). Na przykład Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej wspiera działania na rzecz wdrażania nowych technologii, programy badawcze i rozwojowe w dziedzinie ochrony środowiska i gospodarki wodnej. Program UE ALTENER II wspiera natomiast działania w zakresie odnawialnych źródeł energii, jego celem jest ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery. Natomiast ogólnopolski program „Czyste powietrze” jest programem wsparcia finansowego na wymianę źródła ciepła oraz termomodernizację budynku, a „Stop smog” jest programem wsparcia dla gmin dla domów jednorodzinnych osób ubogich.

Literatura

- [1] Dołyńska M., Obidziński S., Kowczyk-Sadowy M., Jadwisieńczyk K., Sobczak P., *Densification and Fuel Properties of Onion Husks*, „Energies” 2019, vol. 24(12), 1–18.
- [2] Guźda A., Szmolke N., *Analiza opłacalności zastosowania ogniw fotowoltaicznych w warsztacie naprawy autobusów*, „Autobusy” 2017, nr 6, 188–191.
- [3] Haustein E., *Właściwości termoizolacyjne kompozytu wapienno-cementowego z udziałem paździerz konopnych*, „Inżynieria Ekologiczna” 2018, t. 19, z. 4, 72–78.
- [4] Jabłoński W., Wnuk J., *Zarządzanie odnawialnymi źródłami energii. Aspekty ekonomiczno-techniczne*, Wydawnictwo Humanitas, Sosnowiec 2009.
- [5] Jamrozik A., Pyrc M., Liziński M., Masapust K., *Możliwość pozyskania paliw gazowych w procesach termicznego przetwarzania odpadów*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury” 2015, t. 32, z. 62, 137–144.
- [6] Kosior-Kazberuk M., *Nowe dodatki mineralne do betonu*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2011, vol. 2, 47–55.
- [7] Lewandowski W., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.
- [8] Modrzycka A., Winczek J., *Ekologia i ochrona środowiska w budownictwie*, „Edukacja – Technika – Informatyka” 2016, nr 4, 177–182.
- [9] Kietliński W., *Budownictwo ekologiczne i energooszczędne budownictwem przyszłości*, „Przegląd Budowlany” 2015, nr 2, 36–41.
- [10] Pietruszka B., Gołębiowski M., *Właściwości wyrobów budowlanych na bazie konopi*, „Przegląd Budowlany” 2019, nr 10, 139–141.
- [11] Pietrzak A., *Wykorzystanie ubocznych produktów współspalania węgla i biomasy w budownictwie jako proekologiczne działanie człowieka*, „Budownictwo o Optymalizowanym Potencjale Energetycznym” 2015, nr 1, 159–164.
- [12] Ratuszny P., Pietkun-Greber I., Betka K., *Analiza opłacalności instalacji fotowoltaicznej o mocy 10 kW*, w: *Wybrane zagadnienia z szeroko pojętej Inżynierii Procesowej*, Uniwersytet Opolski, Opole 2016, 135–149.
- [13] Roszkowski A., *Bioenergia – pola i lasy zastąpią węgiel, ropę i gaz?*, „Inżynieria Rolnicza” 2009, nr 1, 243–257.
- [14] Stec A., Słyś D., *Analiza możliwości wykorzystania wody deszczowej na terenie miasteczka akademickiego w Polsce*, „Proceedings of ECOpole” 2017, vol. 11(1), 287–302.

- [15] Szczerbowski R., *Instalacje fotowoltaiczne – aspekty techniczno-ekonomiczne*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, R. 90, nr 10, 31–36.
- [16] Werle S., Wilk R., *Otrzymywanie paliwa gazowego na drodze zgazowania osadów ściekowych*, „Rynek Energii” 2012, nr 4, 94–97.
- [17] Werner-Juszczuk A., Stempniak A., *Analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania biomasy stałej jako paliwa*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2010, nr 1, 91–96.

Strony internetowe

- [18] <https://eur-lex.europa.eu>, portal Unii Europejskiej (dostęp z dn. 8.11.2020).
- [19] <https://ec.europa.eu>, portal Komisji Europejskiej (dostęp z dn. 8.11.2020).
- [20] <https://www.eea.europa.eu>, portal EEA (dostęp z dn. 8.11.2020).
- [21] <https://stat.gov.pl>, portal Głównego Urzędu Statystycznego (dostęp z dn. 10.11.2020).
- [22] <https://www.sempergreen.com/pl>, portal firmy Sempergreen (dostęp z dn. 10.11.2020).
- [23] <https://inzynierbudownictwa.pl>, portal Inżynier budownictwa (dostęp z dn. 12.11.2020).
- [24] <https://GRAMwZIELONE.pl>, portal GRAMWZIELONE.pl (dostęp z dn. 12.11.2020).
- [25] <https://galmet.com.pl>, portal firmy Galmet (dostęp z dn. 12.11.2020).
- [26] <https://bryla.pl>, portal BRYLA.pl (dostęp z dn. 14.11.2020).
- [27] <https://e-oknadachowe.pl>, portal E-OknaDachowe.pl (dostęp z dn. 14.11.2020).
- [28] <https://generatory-wiatrowe.pl>, portal generatory-wiatrowe.pl (dostęp z dn. 15.11.2020).
- [29] <https://enerad.pl>, portal enerad.pl (dostęp z dn. 15.11.2020).
- [30] <https://generatory-wiatrowe.pl>, portal generatory-wiatrowe.pl (dostęp z dn. 15.11.2020).
- [31] <https://innogy.pl>, portal innogy.pl (dostęp z dn. 16.11.2020).
- [32] <https://www.instalacjebudowlane.pl>, portal instalacjebudowlane.pl (dostęp z dn. 18.11.2020).
- [33] <https://www.instalacjebudowlane.pl>, portal instalacjebudowlane.pl (dostęp z dn. 8.12.2020).
- [34] <https://seo.org.pl>, portal Stowarzyszenie Energii Odnawialnej (dostęp z dn. 9.12.2020).
- [35] <https://bialystok.maps.arcgis.com>, portal Urzędu Miejskiego w Białymstoku (dostęp z dn. 8.01.2021).
- [36] <https://www.kalkulatoryec.pl>, kalkulator internetowy (dostęp z dn. 11.01.2021).
- [37] <https://instsani.pl>, portal instsani (dostęp z dn. 19.01.2021).
- [38] <https://ziemianarozdrozu.pl>, portal Ziemia na rozdrożu (dostęp z dn. 12.01.2021).
- [39] <https://meteobox.pl>, portal meteobox (dostęp z dn. 11.01.2021).
- [40] <https://uwm.edu.pl>, portal Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego (dostęp z dn. 13.01.2021).
- [41] <https://allegro.pl>, portal aukcyjny Allegro (dostęp z dn. 14.01.2021).
- [42] <https://elektro.info.pl>, portal elektro.info.pl (dostęp z dn. 17.01.2021).
- [43] <https://rachuneo.pl>, portal rachuneo (dostęp z dn. 12.01.2021).
- [44] <https://re.jrc.ec.europa.eu>, portal Komisji Europejskiej (dostęp z dn. 12.01.2021).
- [45] <https://sunsol.pl>, portal Sunsol (dostęp z dn. 14.01.2021).
- [46] <https://happysolar.pl>, portal Eisentreu (dostęp z dn. 14.01.2021).
- [47] <https://instsani.pl>, portal instsani (dostęp z dn. 15.01.2021).

- [48] <https://instsani.pl>, portal instsani (dostęp z dn. 15.01.2021).
- [49] <https://aquatechnika.com.pl>, portal Aquatechnika (dostęp z dn. 11.01.2021).
- [50] <https://termoregulatory.pl>, portal Termoregulatory.pl (dostęp z dn. 11.01.2021).
- [51] <https://e-szczuczyn.pl>, portal e-Szczuczyn (dostęp z dn. 11.01.2021).
- [52] <https://obud.pl>, portal budowlany obud.pl (dostęp z dn. 8.11.2020).
- [53] <https://firma-aman.pl>, portal firmy Aman (dostęp z dn. 25.01.2021).
- [54] <https://firma-aman.pl>, portal firmy Aman (dostęp z dn. 25.01.2021).
- [55] <https://kotly.pl>, portal Kotły (dostęp z dn. 25.01.2021).
- [56] <https://ios.edu.pl>, portal Instytutu Ochrony Środowiska (dostęp z dn. 7.11.2020).
- [57] <https://pse.pl>, portal Polskich Sieci Energetycznych (dostęp z dn. 8.11.2021).

Metody badań właściwości fizyko-chemicznych węgla aktywnych

Remigiusz Gumiński, Łukasz Wincone, Adam Tabor, Renata Weygand

*Department of Technology in Environmental Engineering,
Faculty of Civil and Environmental Science Białystok University of Technology
e-mail: guminski@grand-activated.pl; wincone@grand-activated.pl;
tabora@grand-activated.pl; weygandr@grand-activated.pl*

Słowa kluczowe: węgiel aktywny, właściwości chemiczne, sorpcja, metody badawcze

Streszczenie: Porowate materiały węglowe, czyli popularnie zwane węgle aktywne, charakteryzują się unikalnymi właściwościami fizyko-chemicznymi, co sprawia, że są stosowane w różnych dziedzinach. Materiał ten ma wiele zastosowań w środowisku i przemyśle do usuwania, odzyskiwania, separacji i modyfikacji różnych związków w fazie ciekłej i gazowej. Węgiel aktywny jest głównie materiałem sorpcyjnym o różnorodnym zastosowaniu. Do określenia ogólnej charakterystyki adsorbentu wystarczy wyznaczyć izotermę adsorpcji danego adsorbentu, to jednak w przypadku praktycznego wykorzystania takiego adsorbentu jest niewystarczające. Należy określić pozostałe parametry fizyko-chemiczne, aby móc dokładnie dobrać sorbent węglowy do danego zastosowania. Mając to na uwadze, w niniejszej pracy dokonano przeglądu metod badań właściwości fizyko-chemicznych węgla aktywnych, zwracając szczególną uwagę na parametry najważniejsze podczas oceny możliwości zastosowania.

Wstęp

Węgiel aktywny jest produktem wytwarzanym między innymi z węgla kamiennego, drzewnego, odpadów gumowych czy odpadów z przemysłu rolno-spożywczego. Przy aktywacji węgla tworzone są pory wewnątrz jego struktury, tworząc dużą powierzchnię wewnętrzną. Ta powierzchnia pozwala adsorbować cząsteczki zanieczyszczeń.

W zależności od rozmiaru porów można uzyskać efekt adsorpcji różnych substancji. Różne rodzaje węgla aktywnego są przeznaczone do adsorbowania różnych rodzajów związków chemicznych. Na przykład węgiel aktywny przeznaczony do adsorpcji mikrozanieczyszczeń, na przykład pestycydów, będzie miał większą ilość mikroporów. Inne rodzaje węgla drzewnego mogą być przeznaczone do adsorpcji szerszej gamy związków i dlatego będą mieć bardziej zrównoważone proporcje makro-, mezo- i mikroporów [1]. Węgłe aktywne charakteryzują się bardzo dużą powierzchnią właściwą ($1000\div 3000\text{ m}^2/\text{g}$) i dużą objętością porów ($1\div 2\text{ cm}^3/\text{g}$) [2, 3, 4] i z tego względu znajdują wielorakie zastosowania. Węgłe aktywne służą do magazynowania energii na przykład w superkondensatorach, bateriach, zbiornikach wodoru, mają zastosowanie do konwersji energii w ogniach słonecznych i paliwowych, a także w różnych czujnikach. Główne zastosowanie węgla aktywnych znajduje się w inżynierii środowiska. Służą one do adsorpcji tlenków siarki i tlenków azotu, do oczyszczania wody. Dodatkowo wykorzystywane są w procesie produkcji wielu istotnych gospodarczo substancji chemicznych [5–7]. Techniki i technologie wykorzystujące węgiel aktywny cechują się wysoką skutecznością usuwania z wody zanieczyszczeń organicznych, a nawet zanieczyszczeń występujących w ilościach składowych. Porowaty materiał węglowy skutecznie sorbuje metale ciężkie. Procesowi sorpcji ulegają także wirusy, które są odporne na chlorowanie. Do zalet technologii wykorzystujących węgiel aktywny zaliczyć można: brak wtórnych efektów zanieczyszczających wodę, stabilizacja oczyszczonej wody, obniżenie zapotrzebowania na dezynfekanty, niskie koszty eksploatacji [8–10]. Węgłe aktywne mają zastosowanie w filtrach węglowych, które są jednym z najsukuteczniejszych instrumentów zaawansowanego oczyszczania wody z aktualnie stosowanych metod jej uzdatniania [11].

Szeroki wachlarz możliwości zastosowania węgla aktywnego wiąże się z różnorodnymi właściwościami, które zależą od surowca, od procesu produkcji, modyfikacji oraz zużycia. Struktura powierzchni oraz właściwości fizyko-chemiczne mogą być badane za pomocą wielu nowoczesnych technik instrumentalnych. Mając to na uwadze, w niniejszej pracy dokonano przeglądu metod badań właściwości fizyko-chemicznych węgla aktywnych, zwracając szczególną uwagę na parametry najważniejsze podczas oceny możliwości zastosowania danego rodzaju węgla aktywnego.

Metody badań wskaźników technicznych węgla aktywnych

Jedną z grup wskaźników technicznych, dzięki którym ocenia się węgle aktywne, są właściwości mechaniczne. Jedną z głównych właściwości mechanicznych węgla aktywnego jest wytrzymałość mechaniczna. Można ją zdefiniować jako odporność na ścieranie lub abrazję podczas stosowania. Istnieją przeróżne testy do oceny wytrzymałości mechanicznej granulowanych węgla aktywnych. Określa się zmiany w rozkładzie wielkości cząstek lub ilości wytworzonego miazgu. Dzięki różnym metodom

badan wytrzymałościowych mierzy się różne aspekty, które są ze sobą powiązane matematycznie. Najpopularniejszą metodą badania jest twardość, a kolejną zużycie ścierane. Wartość liczbową twardości oznacza się na podstawie normy ASTM D3802. Wartość ta wyrażona jest w postaci odsetka straty na określonym sicie po przetrzaskaniu granuł w ściśle określonych warunkach. Natomiast zużycie ścierne oznacza się na podstawie normy AWWA B604. Jest to pomiar wytrzymałości konstrukcji granulowanego węgla aktywnego. Dzięki temu pomiarowi jest mierzona wytrzymałość pojedynczej cząsteczki węgla aktywnego na siły ścinające, które wywołane są przez wzajemne ocieranie się cząsteczek lub przez pocieranie cząsteczek o inne powierzchnie. Pomiaru dokonuje się poprzez potrząsanie granulek wraz ze stalowymi kulkami w zbiorniku w określonych warunkach [12].

Inną grupą mierzonych paramentów dla węgli aktywnych jest grupa podstawowych wskaźników technicznych, takich jak: gęstość nasypowa określona według normy PN-82/C-97555.02, wielkość cząstek w zakresie 0,6–2,3 mm oznaczana według normy ASTM D2862, zawartość popiołu w próbce oznaczona według normy PN-82/C-97555.08 lub ASTM D2866, wilgotność próbki oznaczana według normy ASTM D2867 oraz temperatura zapłonu badanej próbki węgla aktywnego. Kolejną grupą oznaczeń technicznych jest grupa wskaźników sorpcyjnych, do których zaliczono wartość liczby metylenowej – PN-82/C-97555.03, wartość liczby jodowej – PN-82/C-97555.04 oraz pH ekstraktu wodnego badanego materiału sorpcyjnego. Ponadto do tej grupy parametrów zaliczono także zdolność do dechloracji (oznaczaną wg DIN 19603) oraz liczbę detergentową (oznaczaną wg PN-84/C-97555.07) [13, 14].

Metody badań powierzchni i struktury węgli aktywnych

Z punktu widzenia procesów zachodzących na granicy faz ciało stałe–gaz i ciało stałe–ciecz pojęcie powierzchni właściwej ciała stałego takiego jak węglowy materiał sorpcyjny jest rozumiane jako powierzchnia, która jest dostępna dla cząsteczek gazu lub cieczy oraz obejmuje zarówno jego powierzchnię zewnętrzną, jak i wewnętrzną, która związana jest z jego porowatością. Definiuje się ją jako rzeczywistą powierzchnię materiału biorącą udział w adsorpcji, przypadającą na jednostkę masy adsorbentu i najczęściej wyraża się w m^2/g [15]. Istnieje wiele metod wyznaczania powierzchni właściwej. Najbardziej rozpowszechnionymi są metody oparte na pomiarach adsorpcji gazów i par. W przypadku metod adsorpcyjnych klasyczny pomiar polega na wyznaczeniu izotermy adsorpcji azotu, w temperaturze ciekłego azotu (77,3 K). Najczęściej stosowanym równaniem odwzorowującym przebieg adsorpcji jest równanie izotermy podane przez Brunauera, Emmeta i Tellera. Metoda ta jest popularnie określana jako metoda BET, stąd zazwyczaj symbolowi powierzchni właściwej S towarzyszy symbol BET [16].

Metody badań obecności grup funkcyjnych węgla aktywnych

Grupy chemiczne na powierzchni węgla aktywnego można oznaczać metodami mokrymi lub suchymi. Do metod mokrych należą metoda Boehma i miareczkowanie potencjometryczne [20, 21, 23], do metod suchych zaś należą spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), spektroskopia fotoelektronów (XPS), termogravimetria (TGA) oraz programowana termodesorpcja (TPD) [17, 18].

Miareczkowanie potencjometryczne oraz metoda Boehma informują o rodzaju i ilości grup funkcyjnych, które zachowują się jak zasady i kwasy w wodnych roztworach. Niestety wyklucza to możliwość oznaczenia grup funkcyjnych o takiej budowie, jaką mają niektóre związki organiczne, jak aldehydy, ketony, estry czy etery. W celu oznaczenia wymienionych ugrupowań chemicznych stosuje się na przykład metodę TPD, czyli programowaną termodesorpcję. Metoda ta polega na programowanym ogrzewaniu próbki węgla aktywnego w atmosferze beztlenowej z równoczesną analizą jakościową wydzielających się produktów rozkładu. W trakcie rozkładu tlenowych grup powierzchniowych wydzielają się takie produkty, jak para wodna, dwutlenek węgla i tlenek węgla [19].

Informacje o charakterze jakościowym wiązań chemicznych na powierzchni węgla aktywnych dają takie metody instrumentalne jak spektroskopia w podczerwieni (FTIR) czy rentgenowska spektroskopia fotoelektronowa (XPS). Najpopularniejsze techniki spektroskopii w podczerwieni, które wykorzystuje się do badania węgla aktywnego, to: spektroskopia transmisyjna, wówczas gdy próbka węgla aktywnego jest w postaci pasty z nujolem lub pastylki z KBr (bromkiem potasu), spektroskopia refleksyjna ATR. W przypadku metody spektroskopii fotoelektronów (XPS) rejestrowane widma, charakteryzują cienką powierzchniową warstwę węgla aktywnego, która pozwala na określenie stanu chemicznego znajdujących się w niej atomów. Na podstawie wymienionych technik badawczych można określić zmiany w chemicznej budowie powierzchni węgla aktywnych spowodowanych na przykład modyfikacją czy impregnacją chemiczną [19, 20].

Zestawienie metod badawczych węgla aktywnych na przykładzie firmy Grand-Activated

Firma Grand Activated Sp. z o.o. produkująca węgle aktywne do różnych zastosowań opiera się na kilku strategicznych obszarach działalności. W firmie tej produkowany jest węgiel aktywny w różnej formie, który skutecznie usuwa zanieczyszczenia, znajdując zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu i technologiach ochrony środowiska. Wytwarzany jest przede wszystkim z węgla kamiennego z wybranych polskich kopalń oraz węgla drzewnego polskiego pochodzenia. Otrzymywany jest metodą aktywacji termicznej przy użyciu pary wodnej. Firma do odpowiedniej charakterystyki

produkowanych węgla aktywnych oraz określenia ich właściwości stosuje aż 31 metod badawczych, które są znormalizowane i certyfikowane:

- 1) PN-82 C-97555.00 Węgle aktywne. Metodologia. Ogólne warunki i zakres standardu.
- 2) PN-82 C-97555.03 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie liczby metylenowej.
- 3) PN-83 C-97555.04 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie liczby adsorpcyjnej jodu.
- 4) PN-84 C-97555.05 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie liczby melasowej.
- 5) PN-83 C-97555.06 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie liczby fenolowej.
- 6) PN-84 C-97555/07 Węgle aktywne. Metodologia. Określenie numeru detergentu.
- 7) PN-84 C-97555/08 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie zawartości popiołu.
- 8) PN-84 C-97555/09 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie zawartości wody.
- 9) PN-85 C-97555/10 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie pH wodnego ekstraktu.
- 10) PN-86 C-97555/12 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie substancji rozpuszczalnych w HCl.
- 11) PN-86 C-97555/14 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie pH i Ca^{2+} .
- 12) PN-88 C-97555/01 Węgle aktywne. Metodologia. Analiza siatki.
- 13) PN-88 C-97555/11 Węgle aktywne. Metodologia. Oznaczanie substancji rozpuszczalnych w wodzie.
- 14) PN-80 G-04511 Paliwa stałe. Oznaczanie wilgoci.
- 15) PN-80 G-04512 Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu wagowo.
- 16) PN G-04516 Paliwa stałe. Oznaczanie wagowe zawartości części lotnych.
- 17) PN-71 G-04501 Analiza siatki. Wytyczne wdrożeniowe.
- 18) PN-83 N-03010 Statystyczna kontrola jakości. Wybór losowego produktu do pobrania.
- 19) PN-81 C-04521/00 Oznaczanie Fe. Ogólne warunki.
- 20) PN-81 C-04521.01 Oznaczanie Fe metodą kolorymetryczną z użyciem batofenantroliny.
- 21) PN-81 C-04521/02 Oznaczanie Fe metodą kolorymetryczną z użyciem 2,2'-dipyrydyli.
- 22) PN-81 C-04521.03 Oznaczanie Fe metodą kolorymetryczną z użyciem tiocyjanianu amonu.
- 23) PN-76 R-64772 Melasa buraczana.
- 24) PN-ISO 2591-1 Analiza siatki. Metody z wykorzystaniem ekranów kontrolnych z tkaniny drucianej i blachy perforowanej.
- 25) PN C-04333 Produkty na bazie węgla. Pobieranie i przygotowanie przeciętnej próbki laboratoryjnej.
- 26) PN G-04502 Węgiel brunatny i kamienny. Pobieranie i przygotowywanie próbek do badań laboratoryjnych. Podstawowe metody.
- 27) PN-EN 12902 Wyroby do uzdatniania wody pitnej – Media nieorganiczne i materiały filtracyjne. Metody testowe.

- 28) PN-EN 12915-1 Wyroby do uzdatniania wody pitnej – Granulowany węgiel aktywny. Część 1: Podstawowy granulowany węgiel aktywny.
- 29) PN-EN 12915-2 Wyroby do uzdatniania wody pitnej – Granulowany węgiel aktywny. Część 2: Reaktywowany granulowany węgiel aktywny.
- 30) PN-ISO 1953 Węgiel kamienny. Analiza ziarna metodą przesiewania.
- 31) PN-ISO 9277 Oznaczanie pola powierzchni właściwej ciał stałych metodą adsorpcji gazów metodą BET.

Podsumowanie

Wykorzystywanie różnego rodzaju węgli aktywnych w badaniach naukowych, jak i projektowaniu oraz optymalizacji wielu procesów przemysłowych związane jest z koniecznością ciągłego polepszania ich jakości, a także udoskonalania metod ich otrzymywania, co wiąże się z nieustanną oceną ich właściwości fizyko-chemicznych, jak i bardziej złożonej charakterystyki, takiej jak struktura, powierzchnia właściwa czy obecność grup funkcyjnych na powierzchni materiału węglowego [19, 20]. Bardzo często dokładna charakterystyka węgli aktywnych polega na zastosowaniu wielu nowoczesnych metod równocześnie. Na przykład wiedza na temat obecności określonych grup chemicznych na powierzchni badanego węgla aktywnego jest niezbędna w celu odpowiedniego dobrania tegoż materiału do określonego procesu oczyszczania roztworu wodnego czy gazów odlotowych. Chemiczna natura powierzchni sorpcyjnych materiałów węglowych bardzo istotnie wpływa na ich właściwości adsorpcyjne.

Literatura

- [1] www.grand-activated.pl [dostęp: 20.08.2022].
- [2] Jankowska H., Swiatkowski A., Choma J., *Active Carbon*, Ellis Horwood Ltd., Chichester 1991.
- [3] Bansal R.Ch., Goyal M., *Activated Carbon Adsorption*, CRC Press, Boca Raton 2005.
- [4] Choma J., Osuchowski Ł., Jaroniec M., *Właściwości i zastosowanie węgli aktywnych otrzymanych z materiałów polimerowych*, „Rocznik Ochrona Środowiska” 2014, t. 36, nr 2, 3–16.
- [5] Choma J., *Zastosowanie nanoporowatych materiałów do oczyszczania wody*, „Rocznik Ochrona Środowiska” 2011, t. 33, nr 4, 15–22.
- [6] Terzyk A.P., Gauden P.A., Kowalczyk P. (eds.), *Carbon Materials: Theory and Practice*, Research Signpost, Kerala (India) 2008.
- [7] Bandosz T.J. (ed.), *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*, Elsevier, Amsterdam 2006.
- [8] Nawrocki J. (red.), *Uzdatnianie wody. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne*, t. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

- [9] Wilmański K., *Warunki i efekty długotrwałego stosowania granulowanych węgla aktywnych w wodociągach*, „Węgiel Aktywny w Ochronie Środowiska i Przemysle” 2006, 225–235.
- [10] Lach J., *Wpływ sposobu modyfikacji węgla aktywnych na adsorpcję metali ciężkich*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011 („Monografie”, nr 197).
- [11] Lis A., Pasoń Ł., Stępniański L., *Przegląd stosowanych metod oznaczania aktywności biologicznej filtrów węglowych*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska” 2016, t. 19(3), 413–425.
- [12] www.desotec.com [dostęp: 20.08.2022].
- [13] Dąbek L., Ozimina E., Picheta-Oleś A., *Wpływ właściwości węgla aktywnych na szybkość usuwania wybranych barwników z roztworów w obecności nadtlenu wodoru*, „Rocznik Ochrona Środowiska” 2011, t. 13, 1023–1042.
- [14] Bezak-Mazur E., Adamczyk D., *Adsorpcja barwników na świeżym i zregenerowanym węglu WD-extra*, „Rocznik Ochrona Środowiska” 2011, t. 13, 951–972.
- [15] Moritz M., Geszke-Moritz M., *Zastosowanie modyfikowanych krzemionkowych materiałów mezoporowatych jako nośników w systemach dostarczania substancji leczniczych*, „Farmacja Polska” 2012, nr 6, 433–438.
- [16] Ryczkowski J. (red.), *Adsorbenty i katalizatory. Wybrane technologie a środowisko*, Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów 2012.
- [17] Dudek L., Kowalska-Włodarczyk M., *Pragmatyczne podejście do adsorpcji w skałach łupkowych złóż typu shale gas*, „Nafta-Gaz” 2014, nr 7, 416–424.
- [18] Salame I.I., Bandosz T.J., *Surface chemistry of activated carbons: Combining the results of temperature-programmed desorption, Boehm, and potentiometric titrations*, „Journal of Colloid and Interface Science” 2001, vol. 240, no. 1, 252–258.
- [19] Pradhan B.K., Sandle N.K., *Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons*, „Carbon” 1999, vol. 37, no. 8, 1323–1332.
- [20] Repelewicz M., Jedynak K., Choma J., *Struktura porowata i chemia powierzchni węgla aktywnych modyfikowanych kwasami nieorganicznymi*, „Ochrona Środowiska” 2009, t. 31(3), 45–50.
- [21] Buczek B., Chwiałkowski W., *Charakterystyka powierzchni modyfikowanego węgla aktywnego wybranymi metodami*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie” 2008, nr 767, 5–18.

Porównanie przydatności testów MTT i CellTiter-Glo stosowanych do oceny cytotoksyczności związków z grupy polifenoli

Piotr Malinowski^{1)}, Klaudia Skała¹⁾, Agata Jabłońska-Trypuć^{1)*},
Agata Koronkiewicz²⁾, Elżbieta Wołejko¹⁾, Urszula Wydro¹⁾,
Grzegorz Świdorski¹⁾, Włodzimierz Lewandowski¹⁾*

¹⁾ Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii, ²⁾ Nadleśnictwo Waliły,
* e-mail: peterraspberry006@gmail.com; a.jablonska@pb.edu.pl

Słowa kluczowe: MTT, CellTiterGlo, Caco-2, nowotwór, cytotoksyczność, polifenole

Streszczenie: Testy cytotoksyczności są podstawowym narzędziem wykorzystywanym w biologii molekularnej, a także w farmacji do badań nad nowymi lekami. Test MTT jest powszechnie stosowaną metodą kolorymetryczną do określania żywotności komórek/cytotoksyczności. Rośnie zainteresowanie związkami polifenolowymi, które wykazują wiele właściwości prozdrowotnych, ponieważ mają ogromny potencjał terapeutyczny, który można wykorzystać w walce z różnymi chorobami cywilizacyjnymi (m.in.: nowotwory, miażdżyca, otyłość, cukrzyca). Test MTT może dawać nieprawidłowe wyniki z powodu interakcji chemicznych z ekstraktami roślinnymi. Dlatego stosuje się coraz więcej testów opartych na pomiarze wewnątrzkomórkowego ATP (tj. CellTiter-Glo). Celem pracy było porównanie przydatności kolorymetrycznego testu MTT oraz bioluminescencyjnego testu CellTiter-Glo do oceny związków z grupy polifenoli. Analizę obu metod przeprowadzono, porównując otrzymane wyniki żywotności komórek Caco-2 traktowanych szerokim zakresem stężeń związków polifenolowych: kwasu cykoriowego, kwasu kaftarowego, kwasu kawowego i cynaryny. Wyniki wskazują na pewne różnice w przeżywalności komórek. Potwierdzono, że test CellTiter-Glo charakteryzuje się wyższą dokładnością pomiaru, dzięki czemu zapewnia bardziej wiarygodne wyniki analizy cytotoksycznej polifenoli w porównaniu z testem MTT.

Wstęp

Odkrywanie leków i badanie ich bezpiecznego wpływu na ludzki organizm łączy potrzeba wiarygodnych testów do oceny cytotoksyczności. Wszystkie nowe związki o charakterze potencjalnych leków przed skierowaniem ich do badań klinicznych obowiązkowo podlegają ocenie aktywności cytotoksycznej. Biorąc pod uwagę przeznaczenie lecznicze danego związku, aktywność cytotoksyczna jest parametrem pożądanym, jak to ma miejsce w przypadku cytostatyków, stosowanych w leczeniu chorób nowotworowych bądź dyskwalifikującym w stosunku do zdrowych komórek. Obserwacja zmian w procesach fizjologicznych spowodowanych przez oddziałujące na komórkę związki chemiczne możliwa jest poprzez stosowanie różnych technik pomiarowych, tj.: kolorymetria, fluorymetria czy bioluminescencja [1].

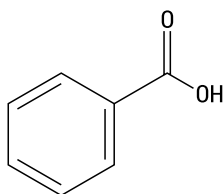
Właściwości biologiczne związków aktywnych z grupy polifenoli

Polifenole są bardzo liczną grupą wtórnych metabolitów roślinnych, które występują we wszystkich częściach roślin. Ich skład zależy od gatunku rośliny, odmiany, warunków klimatycznych i agrotechnicznych uprawy. Powszechność występowania związków fenolowych w świecie roślin sprawia, że są nierozłącznymi składnikami pożywienia. Można je przeważnie znaleźć w owocach, zielonej i czarnej herbacie, kawie, czerwonym winie czy kakao. Cechuje je bardzo zróżnicowana struktura chemiczna decydująca o ich wyjątkowych właściwościach fizycznych, chemicznych oraz biologicznych. Wspólną cechą związków polifenolowych jest obecność w cząsteczce grup hydroksylowych powiązanych z pierścieniem benzenowym [3, 6].

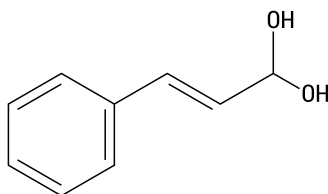
Naturalne polifenole wzbudziły ogromne zainteresowanie w medycynie, przemyśle spożywczym czy też kosmetycznym, ze względu na charakteryzujące je unikatowe właściwości, tj. aktywność antyoksydacyjna, przeciwnowotworowa czy antybakteryjna. Uznano je za jedno z najbardziej istotnych składników o działaniu prozdrowotnym, które wynika z ich aktywności przeciwutleniającej. Na przestrzeni wielu lat badań epidemiologicznych potwierdzono, iż stres oksydacyjny jest zjawiskiem ściśle powiązanym z rozwojem wielu chorób przewlekłych, m.in. chorób nowotworowych, miażdżycy, cukrzycy, choroby Alzheimera czy też choroby Parkinsona. Wyżej wspomniana zdolność polifenoli do przeciwdziałania temu zjawisku niewątpliwie wpłynęła na chęć dalszego zgłębiania natury tych związków [14].

Związki fenolowe pod względem struktury podstawowego szkieletu węglowego można w bardzo ogólnym pojęciu podzielić na dwie grupy: flawonoidy oraz kwasy fenolowe. Flawonoidy stanowią największą i najbardziej zróżnicowaną grupę polifenoli. W roślinach występują nie tylko jako wolne cząsteczki, lecz także – i to znacznie częściej – w formie związanej z polisacharydami, jako glikozydy. Druga wspomniana

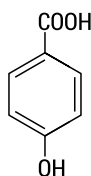
grupa polifenoli, czyli kwasy fenolowe, to związki zawierające w swojej strukturze grupę hydroksylową i karboksylową. W świecie roślin powszechnie występują hydroksylowe pochodne kwasu benzoowego oraz kwasu cynamonowego. Wśród kwasów hydroksybenzoesowych wymienia się głównie kwasy: galusowy, *p*-hydroksybenzoesowy, protokatechowy, wanilinowy i syringowy. W przypadku kwasów hydroksycynamonowych są to: kwas kawowy, ferulowy, *p*-kumarowy oraz synapowy (rys. 1) [3, 14].



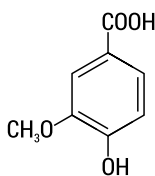
kwas benzoowy



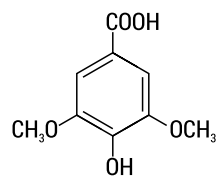
kwas cynamonowy



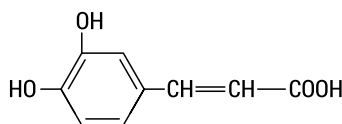
kwas *p*-hydroksybenzoesowy



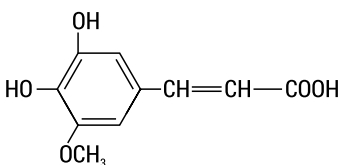
kwas wanilinowy



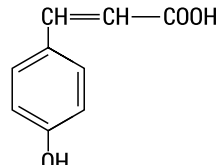
kwas syringowy



kwas kawowy



kwas ferulowy



kwas *p*-kumarowy

RYS. 1. Struktura kwasu benzoowego i cynamonowego oraz ich pochodnych

ŹRÓDŁO: [4, 9].

Testy do oceny cytotoksyczności

W dziedzinie badań nad cytotoksycznością istnieje szereg testów służących do oceny antywnowotworczego działania chemioterapeutyków w warunkach *in vitro*. Właściwa ocena siły działania leków chemioterapeutycznych wymaga precyzyjnych

i dokładnych analiz laboratoryjnych, dlatego też tak istotna jest świadomość ograniczeń tych metod. Ważne jest również, aby dobrać odpowiedni test do oceny cytotoxyczności substancji czynnej w zależności od przypuszczalnego mechanizmu śmierci komórki [17].

Metody oznaczania żywotności komórek eukariotycznych wykorzystują różnorodne techniki pomiarowe, tj. kolorymetria, fluorymetria, bioluminescencja czy też pomiar scyntylacyjny, w przypadku użycia izotopów promieniotwórczych. Ponadto poszczególne testy do oceny aktywności cytotoxycznej korzystają z różnych parametrów funkcjonowania komórek cechujących ich żywotność, tj.:

- zmiany w integralności błony komórkowej,
- aktywność enzymów związanych z metabolizmem komórki,
- zdolność komórek do podziałów (prolifracji),
- zmiany w zawartości białka lub materiału genetycznego.

Wszystkie testy łączą ten sam cel – wyznaczenie wartości stężenia badanego czynnika hamującego żywotność komórki – IC_{50} (ang. *inhibitory concentration*). Oznacza to takie stężenie, przy którym proliferacja komórek zostaje zahamowana w 50%, w odniesieniu do układu kontrolnego [1].

Jedną z podstawowych metod bezpośredniego pomiaru żywotności komórek eukariotycznych w hodowli jest określenie liczebności żywych lub martwych komórek. W tym celu stosuje się odpowiednie barwniki, które w zależności od stanu błony komórkowej wnikają do wnętrza komórki lub pozostają na jej powierzchni. Przykładem szybkiej w swoim przebiegu techniki pomiarowej, wykorzystującej barwienie przyżyciowe komórek jest test NR (ang. *neutral red*). Zastosowana czerwień obojętna przechodzi przez błonę komórkową jedynie żywych komórek, po czym gromadzi się w lizosomach. Zabarwione na czerwono komórki zliczane są w komorze hemocytometru bądź spektrofotometrycznie przez pomiar absorbancji uzyskanego po rozpuszczeniu barwnika roztworu. Innym stosowanym barwnikiem jest błękit trypanu, który w przeciwieństwie do czerwieni barwi wyłącznie martwe komórki, natomiast główna zasada metody pozostaje taka sama [1, 10].

Innym rozwiązaniem technicznym wskazującym na brak integralności błon komórkowych jest test LDH. Zasada działania tego testu opiera się na pomiarze aktywności enzymu cytoplazmatycznego – dehydrogenazy mleczanowej. Obecność tego enzymu w podłożu hodowlanym wskazuje na degradację błon komórkowych. W wyniku katalizowanej przez dehydrogenazę reakcji powstaje barwny formazan, którego intensywność zabarwienia mierzona jest przy użyciu spektrofotometru [10].

Oszacowanie liczby żywych komórek jest możliwe również przy zastosowaniu testu z sulforodaminą (SRB). Podstawą tej metody jest określenie całkowitej zawartości białka w badanej próbce, która z kolei jest wprost proporcjonalna do liczby komórek. Sulforodamina tworzy wiązania elektrostatyczne z białkami o odpowiednim pH, po czym przeprowadzany jest pomiar spektrofotometryczny [1].

Przykładem pomiaru aktywności metabolicznej żywych komórek jest test AB (ang. *alamarBlue*). Metoda ta wykorzystuje resaurynę o barwie niebieskiej, która w efekcie przemian oksydoredukcyjnych przekształcana jest w resorufinę o różowej fluorescencji. Ilość powstałego produktu mierzona jest za pomocą spektrofotometru lub fluorymetru [10].

Celem pracy było określenie użyteczności zastosowania testu MTT i testu CellTiter-Glo do oceny cytotoksyczności związków z grupy polifenoli (kwasu cykoriowego, kawowego, kaftarowego oraz cynaryny) w stosunku do ludzkich komórek linii komórkowej Caco-2.

Materialy i metody

Medium wzrostowe DMEM (ang. Dulbecco's Modified Eagle's Medium) wzbogacone 4,5 mg/mL (25 mM) glukozy, penicylina, streptomycyna, trypsyna z EDTA, FBS (bydłęca surowica płodowa) Gold oraz PBS (buforowana fosforanem sól fizjologiczna; bez dodatku Ca i Mg), zostały zakupione w firmie Gibco (San Diego, CA, USA). Test CellTiter-Glo™ 2.0 został zakupiony od firmy Promega. Kwas cykoriowy, kawowy, kaftarowy oraz cynaryna zostały kupione od firmy Sigma-Aldrich.

Linia komórkowa

Badania wpływu kwasu cykoriowego, kawowego, kaftarowego oraz cynaryny wykonano na linii komórkowej Caco-2 wywodzącej się z ludzkiego gruczolakoraka okrężnicy, którą zakupiono w Amerykańskiej Kolekcji Hodowli Komórkowych (ATCC, ang. *American Type Culture Collection*).

Metodyka hodowli komórek *in vitro*

Hodowlę komórek prowadzono w sterylnych, jednorazowych naczyniach hodowlanych z zachowaniem warunków jałowych. Komórki Caco-2 hodowano w kompletnym medium wzrostowym DMEM (Gibco) suplementowanym 10-procentową bydlęcą surowicą płodową FBS (Gibco), z dodatkiem penicyliny (100 U/mL) oraz streptomycyny (100 µg/mL) w warunkach standardowych w inkubatorze CO₂ (temp. 37°C, 95% powietrza, 5% CO₂). Ocenę żywotności komórek testowanej linii komórkowej przeprowadzono w zakresie stężeń 0,5 µM, 1 µM, 5 µM, 10 µM, 20 µM, 50 µM, 100 µM, 200 µM, 300 µM, 500 µM dla każdego analizowanego związku polifenolowego.

Test MTT

Cytotoksyczność kwasu cykoriowego, kawowego, kaftarowego oraz cynaryny została zmierzona w odniesieniu do metody Carmichaela, w tym celu wykorzystano bromek 3-(4,5-dimetylotiazol-2-yl)-2,5-difenylotetrazoliowy (MTT). Komórki gruczolakoraka okrężnicy linii Caco-2 wysiewano na 96-dołkowe płytki hodowlane w gęstości 1×10^4 komórki/dołek. Komórki potraktowane kwasem cykoriowym, kawowym, kaftarowym oraz cynaryną w zakresie stężeń 0,5–500 μM inkubowano w inkubatorze CO_2 przez 24 godziny, po czym usuwano medium, a monowarstwę komórek przemywano trzykrotnie jałowym roztworem PBS, do dołków mikropłytki dodawano zaś świeże medium hodowlane. Po 24-godzinnej hodowli komórek wykonano test MTT. Do każdego dołka mikropłytki dodawano po 10 μl roztworu MTT (5 mg/mL w PBS, stężenie końcowe wynosiło 0,05 mg/mL). Mikropłytkę umieszczano w inkubatorze CO_2 na 2 godziny (temp. 37°C , 5% CO_2). Po zakończeniu inkubacji do dołków mikropłytki dodawano po 100 μl DMSO w celu rozpuszczenia powstałych w środowisku żywych komórek fioletowych kryształów formazanu, po czym komórki inkubowano w ciemności przez kolejne 2 godziny. Absorbancję roztworu formazanu po delikatnym wymieszaniu odczytywano przy długości fali $\lambda = 570 \text{ nm}$, przy użyciu czytnika mikropłytek GloMax®-Multi Microplate Multimode Reader (Promega, Madison, WI, USA). Procent żywych komórek wyliczano, porównując wartość absorbancji prób badanych z wartością absorbancji próby kontrolnej (komórki nietraktowane badanymi związkami). Test MTT przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

Test CellTiter-Glo

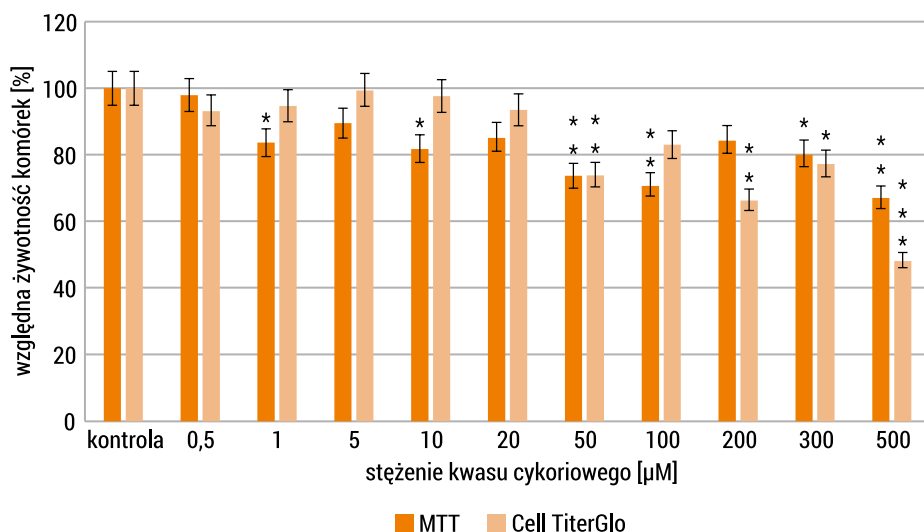
Cytotoksyczność kwasu cykoriowego, kawowego, kaftarowego oraz cynaryny zmierzono przy użyciu testu CellTiter-Glo™ 2.0 (Promega), wg protokołu producenta CellTiter-Glo® Luminescent Cell Viability (Promega). Komórki Caco-2 wysiewano na białych 96-dołkowych płytkach w gęstości 1×10^4 komórek/dołek. Dodatkowo w celu uzyskania wartości luminescencji tła przygotowywano studzienki kontrolne zawierające medium hodowlane bez komórek. Po upływie 24 godzin przeznaczonych na przyklejenie się komórek do powierzchni naczynia hodowlanego traktowano je kwasem cykoriowym, kawowym, kaftarowym oraz cynaryną, w zakresie stężeń od 0,5 μM do 500 μM . Po 24-godzinnej inkubacji płytkę wraz z jej zawartością pozostawiano w temperaturze pokojowej przez około 30 minut. Po upływie tego czasu dodawano objętość odczynnika CellTiter-Glo® równą objętości podłoża do hodowli komórkowej w każdym dołku. Następnie zawartość płytki mieszano przez 2 minuty na wytrząsarce orbitalnej w celu wywołania lizy komórek, kolejno była 10-minutowa inkubacja w temperaturze pokojowej, aby ustabilizować sygnał luminescencyjny. Następnie przy użyciu czytnika mikropłytek GloMax®-Multi Microplate Multimode Reader zarejestrowano luminescencję. Badanie przeprowadzono w trzech powtórzeniach, aby zapewnić uzyskanie wiarygodnych wyników.

Analiza statystyczna

Wyniki badań uzyskanych w dwóch niezależnych eksperymentach, w trzech powtórzeniach każdy, przedstawione zostały w formie średniej arytmetycznej $\pm$ odchylenie standardowe (SD, ang. *standard deviation*). Średnią arytmetyczną obliczono przy użyciu programu Microsoft Excel (program pakietu Microsoft Office 2010, Microsoft Corporation, USA). Różnice pomiędzy traktowanymi i nietraktowanymi związkami polifenolowymi komórkami ludzkimi zostały przeanalizowane na podstawie jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), w nawiązaniu do procedury Dunnetta dla porównań wielokrotnych programu STATISTICA firmy StatSoft, USA. Wyniki istotne statystycznie uznano gdy: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), $p \leq 0,001$ (***)

Wyniki

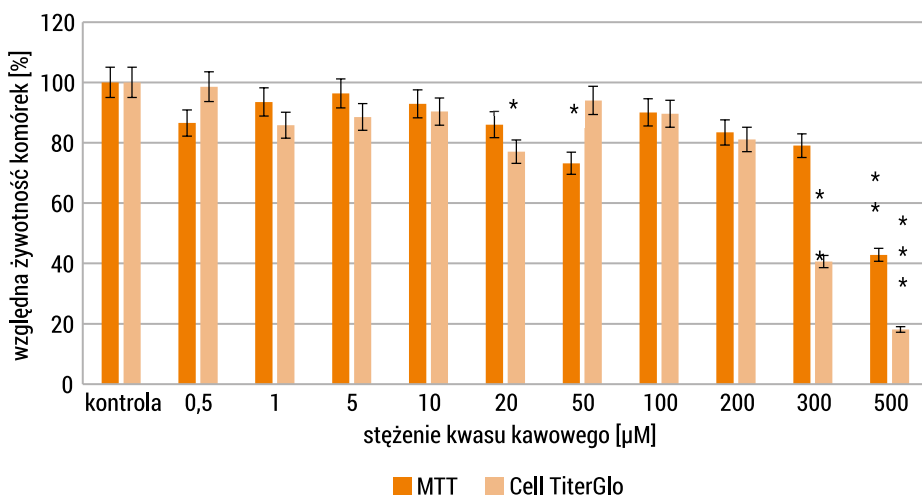
Na rysunku 2 ukazano wpływ różnych stężeń kwasu cykoriowego (0,5–500 μM) na przeżywalność komórek linii Caco-2, którą zmierzono przy wykorzystaniu dwóch metod: testu kolorymetrycznego MTT oraz opartego na pomiarze luminescencji testu CellTiter-GloTM. Na podstawie wyników uzyskanych z obu metod zaobserwowano, iż kwas cykoriowy nie wykazuje działania stymulującego żywotność komórek Caco-2. Najmniejszy spadek proliferacji komórek stwierdzono po dodaniu kwasu cykoriowego w stężeniu 0,5 μM (MTT) oraz 5 μM (CellTiter-GloTM), przy czym żywotność spadła o 1,86% (MTT) oraz 0,38% (CellTiter-GloTM) w odniesieniu do kontroli.



RYS. 2. Względna żywotność komórek gruczolakoraka okrężnicy Caco-2 eksponowanych na różne stężenia kwasu cykoriowego przez 24 godziny, obliczona jako procent komórek kontrolnych zmierzona za pomocą testów MTT oraz CellTiter-GloTM. Wyniki przedstawiono jako średnią wartość $\pm$ SD z trzech pomiarów. Istotność statystyczna (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

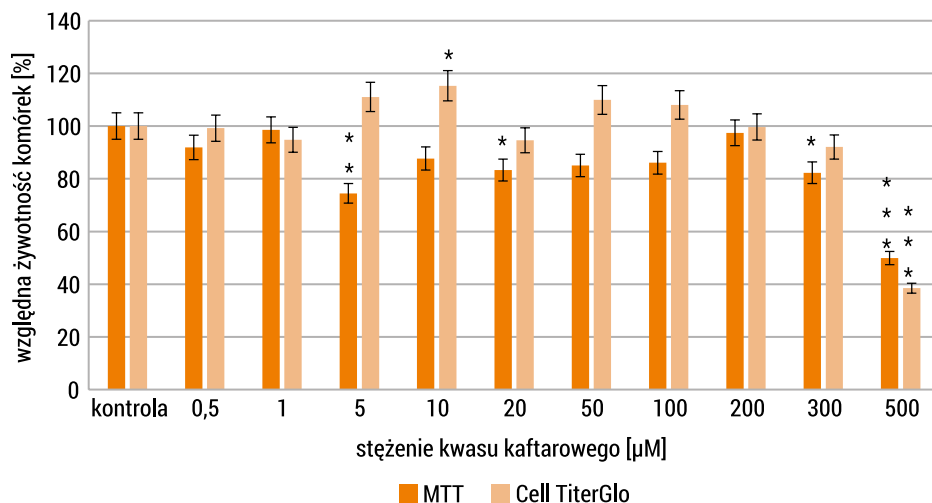
Metodę testu MTT oraz CellTiter-Glo™ wykorzystano do oceny działania cytotoksycznego kwasu kawowego w stosunku do linii komórkowej Caco-2. Komórki potraktowano wzrastającym stężeniem tego kwasu (w zakresie 0,5–500 μ M) przez okres 24-godzinnej inkubacji. Na podstawie uzyskanego w toku analizy wykresu (rys. 3) stwierdzono, iż kwas kawowy nie wykazuje działania stymulującego wzrost komórek Caco-2, co potwierdził zarówno test MTT, jak i CellTiter-Glo™. Dla komórek linii Caco-2, potraktowanych 300 μ M kwasu kawowego, w teście MTT uzyskano blisko dwukrotnie wyższy wynik niż w CellTiterGlo™ (odpowiednio 79,03% vs 40,61% przeżywalność). W przeciwieństwie do stężenia 200 μ M, gdzie oba testy dostarczyły podobnych wyników (różnica na poziomie 2,33%).



RYS. 3. Względna żywotność komórek gruczolakoraka okrężnicy Caco-2 eksponowanych na różne stężenia kwasu kawowego przez 24 godziny, obliczona jako procent komórek kontrolnych zmierzona za pomocą testów MTT oraz CellTiter-Glo™. Wyniki przedstawiono jako średnią wartość $\pm$ SD z trzech pomiarów. Istotność statystyczna (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$)

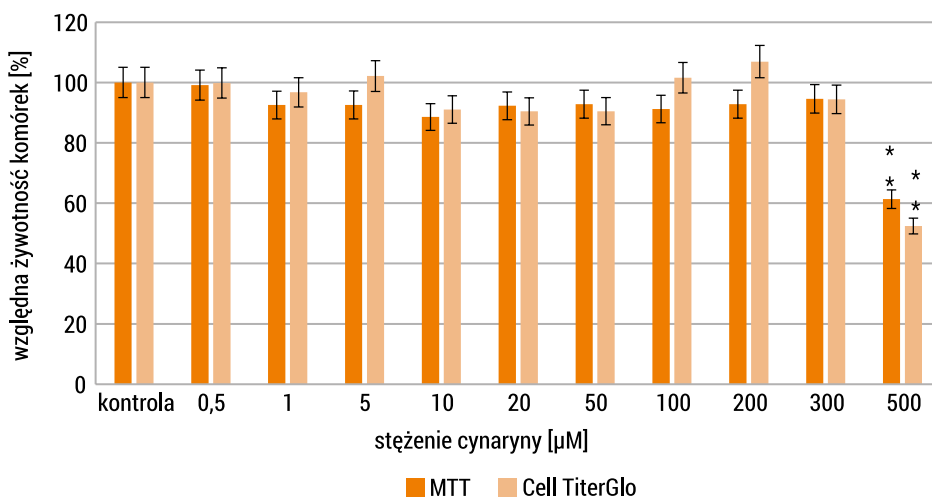
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Rysunek 4 obrazuje wpływ rosnącego stężenia kwasu kaftarowego (w zakresie 0,5–500 μ M) na żywotność komórek Caco-2, przy użyciu testu MTT oraz testu CellTiter-Glo™. Na podstawie wyników uzyskanych za pomocą metody CellTiter-Glo™ stwierdzono, iż kwas kaftarowy w stężeniu: 5 μ M, 10 μ M, 50 μ M oraz 100 μ M wykazuje działanie stymulujące proliferację komórek Caco-2, przy czym największy wzrost hodowli odnotowano przy stężeniu 10 μ M (o 15,3% w stosunku do kontroli).



RYS. 4. Względna żywotność komórek gruczolakoraka okrężnicy Caco-2 eksponowanych na różne stężenia kwasu kaftarowego przez 24 godziny, obliczona jako procent komórek kontrolnych zmierzona za pomocą testów MTT oraz CellTiter-Glo™. Wyniki przedstawiono jako średnią wartość $\pm$ SD z trzech pomiarów. Istotność statystyczna (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 5. Względna żywotność komórek gruczolakoraka okrężnicy Caco-2 eksponowanych na różne stężenia cynaryny przez 24 godziny, obliczona jako procent komórek kontrolnych zmierzona za pomocą testów MTT oraz CellTiter-Glo™. Wyniki przedstawiono jako średnią wartość $\pm$ SD z trzech pomiarów. Istotność statystyczna (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zamieszczony powyżej wykres (rys. 5) ukazuje wpływ różnych stężeń cynaryny (0,5–500 μ M) na żywotność linii komórkowej Caco-2, dzięki zastosowaniu dwóch testów do oceny aktywności cytotoksycznej: MTT i CellTiter-GloTM. Nawiązując do wyników uzyskanych w teście CellTiter-GloTM, na skutek ekspozycji komórek Caco-2 na stężenia cynaryny 5 μ M, 100 μ M oraz 200 μ M, odnotowano nieznaczny wzrost żywotności komórek z 100% do odpowiednio 102,13%, 101,57% oraz 106,91% w odniesieniu do kontroli. Ponadto wyniki uzyskane z obu testów (MTT, CellTiter-GloTM) są zbliżone do siebie, przy czym największa różnica wystąpiła na poziomie 14,08%.

Dyskusja

Społeczeństwo jest obecnie powszechnie poddawane ekspozycji na liczne ksenobiotyki, w tym leki. Farmakoterapia we współczesnej medycynie stanowi jeden z podstawowych rodzajów interwencji, dlatego też tak istotne jest dalsze odkrywanie nowych rozwiązań w tej dziedzinie. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie naturalnymi substancjami czynnymi pochodzenia roślinnego odznaczającymi się potencjałem wykorzystania w leczeniu różnych chorób, w tym nowotworowych. Jedną z przyczyn takiego zjawiska jest chęć znalezienia substytutu obecnych na rynku sztucznych chemioterapeutyków, które jak już udowodniono powodują wiele niepożądanych skutków ubocznych. Szczególną uwagę naukowców przyciągnęły związki polifenolowe. Jak dotąd wykazano wiele prozdrowotnych właściwości tych substancji, jak również udowodniono ich aktywność przeciwnowotworową. Jednakże mechanizm ich oddziaływania na ludzki organizm nie został jeszcze dobrze poznany. Pomóc w tym mogą testy do oceny cytotoksyczności, które są jedną z procedur sprawdzających bezpieczeństwo lekowe na wczesnym etapie badań klinicznych. Z tego względu w niniejszej pracy skupiono się na porównaniu użyteczności dwóch powszechnie wykorzystywanych testów biologicznych – MTT oraz CellTiter-Glo – do oceny cytotoksyczności związków z grupy polifenoli. W tym celu wykorzystano linię komórkową Caco-2, która jest powszechnie stosowanym modelem komórkowym wchłaniania jelitowego, tym samym jest wiarygodnym reprezentantem warunków charakterystycznych dla wchłaniania leków podawanych drogą doustną.

Znaczna część badań naukowych dotyczących oceny cytotoksyczności polifenoli oparta jest na wykorzystaniu kolorymetrycznego testu MTT, jednakże jak dowiedziono metoda ta ma szereg ograniczeń. Potwierdzono, iż test MTT pomimo powszechnego stosowania do oceny żywotności komórek nie zawsze dostarcza wiarygodnej oceny proliferacji komórek linii *in vitro* [11]. Ponadto niektóre dane literaturowe wskazują na potencjalną interferencję fitozwiązków z odczynnikiem MTT, co może prowadzić do otrzymywania fałszywie pozytywnych wyników [2]. W dalszym ciągu niewiele jest informacji na temat porównania wiarygodności testów biologicznych w obszarze badań polifenoli, które mogłyby okazać się lepszą alternatywą dla tak powszechnie

stosowanego testu opartego na redukcji soli tetrazolowej. Obszar ten pozostaje mało zbadany. To sprawia trudność w uzyskaniu powtarzalności wyników analiz przeprowadzanych w różnych laboratoriach, co z kolei wydłuża proces odkrywania i analizy substancji biologicznie czynnych pochodzenia naturalnego. W powyższych badaniach monitorowano żywotność komórek linii Caco-2 z wykorzystaniem dwóch metod – testu MTT i testu bioluminescencyjnego CellTiter-Glo, przy szerokim zakresie stężeń czterech związków polifenolowych (kwas cykoriowy, kaftarowy, kawowy, cynaryna) przez okres 24 godzin.

Otrzymane w tych dwóch niezależnych eksperymentach wyniki nie odbiegały od siebie znacząco, nie można jednak stwierdzić jednoznacznej korelacji między nimi. Przykładowo zarówno test MTT, jak i test CellTiter-Glo wykazały największy spadek żywotności komórek przy maksymalnym stężeniu każdego z badanych związków, jednakże ten drugi wymieniony w każdym z przypadków dostarczał dużo niższych wartości wskaźnika przeżywalności. Dostępne dane literaturowe potwierdzają, iż test ATP (CellTiter-Glo) odnotowuje wyższy poziom inhibicji wzrostu komórek w porównaniu z testem MTT [17]. Można zatem stwierdzić, iż cechuje go większa czułość pomiaru, co znalazło potwierdzenie w literaturze. Według Terry'ego Rissa test CellTiter-Glo jest w stanie wykryć nawet 15 komórek, gdzie sygnał luminescencyjny może zostać zmierzony już po 10 minutach od dodania reagentów reakcji [15].

Najbardziej zauważalna różnica pomiędzy uzyskanymi wynikami z obu testów wystąpiła jednak w przypadku kwasu kawowego. Największy spadek żywotności na tle wszystkich czterech analizowanych związków odnotowano dla stężenia 500 μM tego związku (test MTT/CellTiter-Glo). Uzyskany wynik znalazł potwierdzenie w publikacji naukowej, w której udowodniono, iż kwas kawowy przy niższych stężeniach wykazuje aktywność antyoksydacyjną, jednakże w zakresie wysokich stężeń zaczyna przejawiać działanie prooksydacyjne, prowadzące do spadku żywotności komórek [12]. Zarówno przy stężeniu 300 μM , jak i 500 μM rozbieżność w oszacowanej przeżywalności wystąpiła na poziomie odpowiednio 38,42% oraz 24,73%, z przewagą dla testu CellTiter-Glo, który wykrył znacznie więcej martwych komórek Caco-2. Odnosząc się do już przytoczonej w tym rozdziale publikacji [5], można podejrzewać wystąpienie interferencji kwasu kawowego z odczynnikami MTT, co tłumaczyłoby zawyżone wyniki testu względem CellTiter-Glo. Dodatkowym potwierdzeniem są badania przeprowadzone przez Sari i in., których przedmiotem było porównanie testu MTT z innym testem kolorymetrycznym (WST-1) do oceny cytotoksyczności wspomnianej w niniejszej pracy pochodnej kwasu kawowego (CAPE), które pokazały, iż test MTT wykazał wyższy poziom żywotności komórek przy dawce powodującej znacznie wyższy poziom śmiertelności zastosowanej linii komórkowej [16]. Do podobnych założeń doszli Karakas i in., którzy stwierdzili, iż test MTT dostarczył fałszywie pozytywnych wyników w badaniach nad ekstraktami roślinnymi użytymi na komórkach nowotworowych [8]. Dodatkowo Wang i in. również zwrócili uwagę na niedostateczną precyzję wyników oceny aktywności antyproliferacyjnej polifenoli wyekstrahowanych z zielonej herbaty [18]. Na podstawie powyższych informacji można stwierdzić,

iz do oceny cytotoksycznej tego związku bardziej wiarygodnych informacji dostarczy test oparty na pomiarze ATP.

Zarejestrowana największa aktywność cytotoksyczna kwasu cykoriowego przy maksymalnym stężeniu została potwierdzona przez oba testy, jednakże wyraźniejszy spadek przeżywalności komórek Caco-2 odnotował test CellTiter-Glo (51,57% w odniesieniu do kontroli), podczas gdy test MTT wykazał spadek żywotności komórek jedynie o 32,68% (w stosunku do komórek kontrolnych). Stwierdzono, iż test MTT jednoznacznie nie określił toksycznego działania kwasu cykoriowego (500 μM), gdyż podobny spadek przeżywalności komórek odnotował przy niższych stężeniach tego kwasu (50 μM i 100 μM). Badania przeprowadzone w 2019 r., dotyczące między innymi określenia cytotoksyczności metanolowych ekstraktów z cykorii (*Cichorium intybus* L.) na komórkach nowotworowych linii MCF-7, dowiodły, iż wykazują one cytotoksyczny efekt przy stężeniu 500 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (oznaczono ok. 80,71% martwych komórek) [7]. Do podobnych wniosków doszli inni naukowcy, którzy odnotowali aktywność cytotoksyczną *C. intybus* przeciwko komórkom nowotworowym SKBR3 [13]. Brak danych literaturowych dotyczących cytotoksyczności kwasu cykoriowego w stosunku do komórek linii Caco-2 uniemożliwia precyzyjne porównanie obu testów, jednakże biorąc pod uwagę wykazywaną cytotoksyczność kwasu cykoriowego w badaniach nad komórkami nowotworowymi innych linii komórkowych, można przypuszczać, iż test CellTiter-Glo dostarczył bardziej autentycznych wyników analizy tego związku.

Wnioski

Otrzymane wyniki, które zostały zaprezentowane w niniejszej pracy, jak również dokonany przegląd literaturowy podkreślają, iż zarówno test MTT, jak i CellTiter-Glo mają zalety oraz wady. Porównanie pokazało jednak, iż test CellTiter-Glo stanowi bardziej użyteczne narzędzie do analizy fitozwiązków. Charakteryzuje go bowiem mniejsza podatność na interferencję z tymi związkami, większa czułość, a także możliwość multipleksowania z innymi dostępnymi metodami pomiarowymi, co umożliwia kompleksową ewaluację procesów komórkowych zachodzących pod wpływem aktywności ocenianych substancji. Wybranie właściwego testu do oceny cytotoksyczności związków z grupy polifenoli jest istotnym czynnikiem otrzymania wysokiej jakości danych, które dostarczą odpowiedzi na pojawiające się pytania badawcze dotyczące ich działania, z najlepszą dokładnością, szybkością oraz efektywnością. Informacje zawarte w tej pracy będą służyć w przyszłości do poszerzania badań związków polifenolowych w celu ich potencjalnego wykorzystania jako różnorodnych preparatów leczniczych.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr W/WB-IIŚ/6/2022 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez Ministra Edukacji i Nauki.

Literatura

- [1] Anuszevska E.L., *Badanie aktywności cytotoksycznej produktów leczniczych i wyrobów medycznych*, „Gazeta Farmaceutyczna” 2010, vol. 19(5), 36–38.
- [2] Bruggisser R., von Daeniken K., Jundt G., Schaffner W., Tullberg-Reinert H., *Interference of Plant Extracts, Phytoestrogens and Antioxidants with the MTT Tetrazolium Assay*, „Planta Medica” 2002, vol. 68(5), 445–448.
- [3] Gawlik-Dziki U., *Fenolokwasy jako bioaktywne składniki żywności*, „Żywność. Nauka – Technologia – Jakość” 2004, nr 4(41), 29–40.
- [4] Godlewska-Żyłkiewicz B., Świsłocka R., Kalinowska M., Golonko A., Świderski G., Arciszewska Ż., Nalewajko-Sieliwoniuk E., Naumowicz M., Lewandowski W., *Biologically active compounds of plants: structure-related antioxidant, microbiological and cytotoxic activity of selected carboxylic acids*, „Materials” 2020, vol. 13(19), 1–37.
- [5] Han M., Li J., Tan Q., Sun Y., Wang Y., *Limitations of the use of MTT assay for screening in drug discovery*, „Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences” 2010, vol. 19, 195–200.
- [6] Jeszka M., Flaczyk E., Kobus-Cisowska J., Dziedzic K., *Związki fenolowe – charakterystyka i znaczenie w technologii żywności*, „Nauka. Przyroda. Technologie” 2010, t. 4, nr 2, 1–13.
- [7] Kandil A.S., Abou-Elella F., El Shemy H.A., *Cytotoxic profile activities of ethanolic and methanolic extracts of chicory plant (Cichorium intybus L.)*, „Journal of Radiation Research and Applied Sciences” 2019, vol. 12(1), 106–111.
- [8] Karakaş D., Ari F., Ulukaya E., *The MTT viability assay yields strikingly false-positive viabilities although the cells are killed by some plant extracts*, „Turkish Journal of Biology” 2017, vol. 41(6), 919–925.
- [9] Kędzia B., Hołderna-Kędzia E., *Występowanie związków fenolowych w miodzie pszczełim*, „Postępy Fitoterapii” 2008, nr 4, 225–232.
- [10] Krzysztoń-Russjan J., Książek I., Anuszevska E., *Porównanie użyteczności testów MTT i EZ4U stosowanych do oceny cytotoksyczności ksenobiotyków*, „Farmacja Polska” 2009, nr 65(6), 395–402.
- [11] Lü L., Zhang L., Wai M.S.M., Yew D.T.W., Xu J., *Exocytosis of MTT formazan could exacerbate cell injury*, „Toxicology in Vitro” 2012, vol. 26(4), 636–644.
- [12] Maurya D.K., Devasagayam T.P., *Antioxidant and prooxidant nature of hydroxycinnamic acid derivatives ferulic and caffeic acids*, „Food and Chemical Toxicology” 2010, vol. 48(12), 3369–3373.
- [13] Mehrandish R., Mellati A.A., Rahimipour A., Nayeri N.D., *Anti-cancer activity of methanol extracts of Cichorium intybus on human breast cancer SKBR3 cell line*, „Razavi International Journal of Medicine” 2017, vol. 5(1), 1–4.
- [14] Parus A., *Przeciwwłaniające i farmakologiczne właściwości kwasów fenolowych*, „Postępy Fitoterapii” 2013, nr 1, 48–54.
- [15] Riss T., *Selecting cell-based assays for drug discovery screening*, „Cell Notes” 2005, vol. 13, 16–21.
- [16] Sari C., Kolaylı S., Celep Eyüpoğlu F., *A Comparative Study of MTT and WST-1 Assays in Cytotoxicity Analysis*, „Haydarpaşa Numune Medical Journal” 2019, vol. 61(3), 281–288.

- [17] Ulukaya E., Ozdikicioglu F., Oral A.Y., Demirci M., *The MTT assay yields a relatively lower result of growth inhibition than the ATP assay depending on the chemotherapeutic drugs tested*, „Toxicology in Vitro” 2008, vol. 22, 232–239.
- [18] Wang P., Henning S.M., Heber D., *Limitations of MTT and MTS-based assays for measurement of antiproliferative activity of green tea polyphenols*, „PLoS ONE” 2010, vol. 5(4), 1–10.

Podstawy psychologii środowiskowej

Krzysztof Skoczko

*Akademia Ekonomiczno-Humanistyczna w Warszawie, Wydział Nauk Społecznych
krisbukowa@gmail.com*

Słowa kluczowe: środowisko, psychologia środowiskowa, architektura, człowiek

Streszczenie: Artykuł dotyczy przedstawienia podstawowych zasad psychologii środowiskowej oraz tego, w jaki sposób możemy ją dziś wykorzystać. Praca ta jest swoistym wstępem do niezwykle obszernej subdyscypliny psychologii, opisując jej korzenie oraz odnosząc się jednocześnie do świata, który rozpoznawany jest przez współczesne społeczeństwo. Szczególną uwagę zwraca na środowiskowe otoczenie człowieka i sposoby, w jakie ono ingeruje w codzienne życie; przedstawiając realne przykłady, ze szczególnym uwzględnieniem formacji architektonicznych.

Wprowadzenie

Psychologia środowiskowa jako odrębna i uznana dziedzina psychologii powstała stosunkowo niedawno. Skupia się ona na relacjach między ludźmi a miejscami i środowiskiem. Psychologia środowiskowa zajmuje się problemami społecznymi w relacji do fizycznego środowiska życia człowieka. Huppmann (2003) i Sanders (2004) omawiali wpływ, jaki otoczenie człowieka może mieć na jego zachowanie i postawy.

W dobie potęgujących się problemów dzisiejszego świata psychologia jako nauka nie skupia się na wewnętrznych reakcjach i przemianach człowieka. Dziś zajmuje się również otoczeniem zewnętrznym, które może być rozumiane jako ogół bodźców stymulujących organizm, ale także jako zbiór informacji odbieranych przez ludzi i kształtujących ich zachowanie. Dziś psychologia ma na celu rozwiązywanie problemów codziennego życia człowieka, takich jak: zdrowie, praca, edukacja czy wypoczynek. Ma też ścisły związek z problemami wynikającymi ze środowiska i otoczenia.

Psychologia środowiskowa łączy wiedzę ze wszystkich działów i dziedzin psychologii jako podstawowej nauki. W rzeczywistości środowisko w psychologii jest aktywnym pośrednikiem procesów społecznych oraz głównym odniesieniem praktycznych działań psychologicznych (Bańka, 2002).

Rys historyczny

Spencer i Gee (2009) przypuszczają, że pierwszy i stosunkowo wczesny eksperyment z zakresu psychologii środowiskowej został przeprowadzony w 1972 roku przez Marco Polo. Pol (2006) pisze, iż podróżnik zwiedzał królestwa Azji Zachodniej i zauważył, że mieszkańcy państwa Kermanu byli „dobrzy, pokorni, pomocni i pokojowo nastawieni, podczas gdy ich bezpośredni sąsiedzi w Persji byli źli, zdradzieccy i morderczy”. Król Kermanu, szukając przyczyn tego zjawiska, zwrócił się do swoich mędrców zapytaniem, co może być tego powodem. Stwierdzono, że przyczyna leży w glebie. Ta odpowiedź nie usatysfakcjonowała króla. Postanowił on przeprowadzić eksperyment. Mieszkańcy sąsiedniego Isfahanu byli postrzegani jako ludzie niegodziwi i twardej natury. Król kazał więc sprowadzić stamtąd pewną ilość ziemi. Posypał nią podłogi w swojej sali bankietowej, a następnie przykrył dywanami. Gdy rozpoczęła się uczta, jego goście zaczęli zachowywać się zupełnie inaczej: obrażali się wzajemnie, kłócili się, inicjowali bójkę, a nawet ranili siebie nawzajem. Król ostatecznie zdecydował, że odpowiedź naprawdę leży w ziemi (Spencer, Gee, 2009, Pol, 2006).

Powyższy przykład może świadczyć, iż relacja między miejscem a osobą nie ogranicza się do jednej drogi. W psychologii środowiskowej często cytuje się Churchilla, aby zilustrować, jak relacja ludzie–miejsce może być transakcją: „To my kształtujemy nasze budynki, a potem nasze budynki kształtują nas” (Churchill, 1943). Sławny premier brytyjski przekonywał, że zbombardowana sala obrad Izby Gmin powinna zostać odbudowana w swojej tradycyjnej, zatłoczonej, opozycyjnej formie. Był przeciwny „daniu każdemu posłowi biurka, przy którym mógłby siedzieć, i pokrywy, którą mógłby uderzać” (Churchill, 1943). Tłumaczył, że przez większość czasu Izba byłaby pusta, podczas gdy w krytycznych głosowaniach i momentach wypełniałaby się ponad miarę, a posłowie wylaliby się na korytarze: jego zdaniem odpowiednie „poczucie tłoku i pilności” (Churchill, 1943).

Przez większą część istnienia psychologia środowiskowa koncentrowała się bardziej na swoim aspekcie zachowań środowiskowych niż na postawach środowiskowych. Psychologia środowiskowa jest uznawana za dziedzinę psychologii od końca lat 60. XX wieku, a zatem jest stosunkowo „nową” dziedziną psychologii. Pol (2006) twierdzi, że Hellpach był jednym z pierwszych badaczy, którzy wprowadzili termin „psychologia środowiskowa” w pierwszej połowie XX wieku. Badał wpływ różnych bodźców środowiskowych, takich jak kolor i forma, słońce i księżyc, oraz środowiska ekstremalne na działania człowieka. W późniejszych pracach badał również

zjawiska miejskie, takie jak zatłoczenie i nadmierna stymulacja, a w swoich badaniach wyróżniał różne rodzaje środowisk, np. naturalne, społeczne i historyczno-kulturowe (Huppmann, Gernot, 2004).

Ostatnio zaś psychologowie zwrócili szczególną uwagę na potrzebę „zazielenienia” psychologii pod hasłem „psychologii ochrony przyrody” (Saunders, Myers, 2003). Wskazuje to na dążenie niektórych psychologów do wykorzystania swojego wykształcenia, narzędzi i perspektywy, aby przyczynić się do uczynienia społeczeństwa bardziej zrównoważonym ekologicznie. Nie jest to dyscyplina czy subdyscyplina, ale termin, który wyznacza punkt centralny dla współpracy, badań i działań zewnętrznych.

Tematy badań z zakresu psychologii środowiskowej

Dostępna literatura podaje listę aktualnych tematów, którymi zajmują się psychologowie środowiskowi:

- ekologiczne konsekwencje działań człowieka,
- zrównoważony rozwój i zmiany klimatyczne,
- psychologiczne aspekty zarządzania zasobami,
- psychologiczne i behawioralne aspekty ludzi i przyrody,
- przywiązanie do miejsca i tożsamość miejsca,
- ryzyko i zagrożenia środowiskowe: percepcja, zachowanie i zarządzanie,
- indywidualne i grupowe postrzeganie i ocena budynków oraz krajobrazów naturalnych,
- projektowanie i ocena miejsc pracy, szkół, domów, budynków publicznych i przestrzeni publicznych,
- mapowanie kognitywne, poznanie przestrzenne i wskazywanie drogi,
- zachowania rekreacyjne i turystyczne w odniesieniu do otoczenia fizycznego,
- stres związany z otoczeniem fizycznym,
- przestrzeń społeczna: zatłoczenie, prywatność, terytorialność, przestrzeń osobista (Joye, 2007, Evans, 1998, Moser, 2003).

Zainteresowania psychologów środowiskowych nadal odzwierciedlają środowisko, w którym żyjemy, bazując na przeszłości i dostosowując się do nowych warunków (np. stworzenie wirtualnej rzeczywistości rozszerza pojęcie środowiska). Dwudziesty pierwszy wiek to era komunikacji cyfrowej i sztucznej inteligencji, a także zagrożeń ekologicznych (Stokols, 1987). W jaki sposób postępy nowych technologii zmieniają nasze doświadczenia i relacje z naszym fizycznym środowiskiem? Czy miejsce pracy lub szkoła są nadal właściwymi koncepcjami miejsca, skoro ludzie mogą pracować, uczyć się, robić zakupy, zwiedzać miejsca na całym świecie lub konsultować się z terapeutą w niemal każdym otoczeniu fizycznym? Jak będziemy postrzegać, myśleć i zachowywać się w rzeczywistości wirtualnej, rzeczywistości rozszerzonej

oraz w „inteligentnych” budynkach i miastach? To właśnie te zagadnienia będą w najbliższej przyszłości przedmiotem badań psychologii środowiskowej. Z perspektywy czasu wielu psychologów środowiskowych dąży do wykorzystania wiedzy uzyskanej w wyniku prowadzonych przez siebie badań w praktyce. Chęć posiadania głosu w kwestiach budowy lub przemian środowisk zabudowanych i naturalnych jest jedynie jednym z wielu głównych aspektów ich pracy. Jest to możliwe m.in. poprzez wywieranie wpływu na przemysł architektoniczny w postaci ofiarowania zaleceń planistom miejskim. Innym sposobem mogą być specjalnie programy pomocnicze do tworzenia miejsc i kreowania przestrzeni miejskich, które są zdrowe psychospołecznie (Gifford, 2019).

Zakres działalności psychologii środowiskowej

Praca psychologa środowiskowego ma charakter interdyscyplinarny. W zależności od obszaru będzie on umiał powiązać tematy architektury, zachowań organizacyjnych, zdrowia, zarządzania zasobami naturalnymi i pokrewnych z tymi dyscyplin. Współpraca z innymi specjalistami w swoich dziedzinach jest niezwykle ważna, także zrozumienie potrzeb użytkowników (lub potencjalnych użytkowników) środowiska, które jest planowane, budowane lub odnawiane. Projekty związane z psychologią środowiskową są niezwykle ważne dla liderów mniejszych społeczności, wolontariuszy i decydentów, którzy mogą wykorzystać wyniki badań z zakresu psychologii środowiskowej do sformułowania lub zmiany przepisów i wytycznych zaproponowanych przez rząd (Treppte 2011, Steg 2012).

Psychologowie środowiskowi:

- dążą do poprawy naszego zarządzania zasobami naturalnymi i pomagają łagodzić zmiany klimatyczne oraz jak najlepiej się do nich dostosować,
- mają wiedzę dostateczną do określenia tego, jak zwiększyć zdolność środowiska zbudowanego do bycia zamieszkanym przez jednostki,
- badają otoczenie, z którym mamy codziennie styczność w odniesieniu do naszych postaw, emocji i zachowań,
- dbają o to, aby ludzie radzili sobie ze środowiskiem, jakie kształtują, nie reagując biernie na trudności związane ze środowiskiem naturalnym (Gifford, 2019).

Psychologowie środowiskowi pracują w różnych zawodach. Niektóre ścieżki obejmują dołączenie do uznanej firmy konsultingowej zajmującej się środowiskiem i zachowaniami z nim związanymi, inne – założenie własnej działalności gospodarczej. Należą również do instytutów badawczych lub organizacji zajmujących się projekcją środowiska przeznaczonego do przyszłego użytku. Departamenty rządowe oraz agencje zajmujące się planowaniem regionalnym, miejskim lub budowlanym zawsze mają zespół ściśle związany z psychologią środowiskową w celach doradczych.

W porównaniu z niektórymi innymi subdyscyplinami psychologii, takimi jak psychologia kliniczna czy seksuologia, liczba osób decydujących się na ścieżkę środowiskową jest niewielka. Wynikać to może z faktu, że psychologia środowiskowa jest wciąż stosunkowo nową dyscypliną; ustabilizowanie sobie kariery w tym kierunku zależy w dużej mierze od własnej inicjatywy i dobrego pomysłu. Choć niektóre ogłoszenia o pracę wyraźnie wymagają „psychologa środowiskowego”, wiele stanowisk otwartych dla psychologów środowiskowych ma inne tytuły, takie jak planista obiektów, programista projektowy lub badacz projektowy (Gifford, 2019, Dharmaraj 2021, Ravi, 2021).

Psychologia środowiskowa a człowiek

Psychologia środowiskowa pokrywa się z wieloma innymi uznanymi dyscyplinami związanymi z projektowaniem, w tym z planowaniem przestrzeni, ergonomią, oświetleniem, akustyką, identyfikacją drogi, brandingiem i projektowaniem wnętrz. I choć zakres jej badań jest ogromny, metody i wnioski są niezwykle precyzyjne. Na przykład badania dowiodły, że umieszczenie umywalki w widocznym miejscu szpitalnego korytarza może zwiększyć częstotliwość mycia rąk, a zainstalowanie otwieranych okien w szkolnej klasie może zmniejszyć senność. Badane są skutki zastosowania określonego koloru farby na ścianie w salonie, a także idealnego stosunku powierzchni obsadzonej roślinami do powierzchni utwardzonej w parku miejskim (Moses, 2019).

W przeciwieństwie do innych dziedzin psychologii psychologia środowiskowa koncentruje się na mikrojednostkach środowiska, takich jak domy ludzi, sąsiedztwa oraz praca. Badania psychologii środowiskowej łączą naukowe analizy dotyczące natury relacji między ludźmi a środowiskiem z bardziej praktycznym celem poprawy i optymalizacji otoczenia, w którym żyją. Głównie poprzez lepsze planowanie urbanistyczne i środowiskowe (Moses, 2019).

Innym ważnym czynnikiem poszerzającym zakres psychologii środowiskowej jest ergonomia. Jest to naukowe studium zajmujące się m.in. tworzeniem produktów do optymalnego użytku w otoczeniu człowieka. Dzięki ergonomii i psychologii środowiskowej takie meble jak łóżka i krzesła zapewniają nam komfort użytku; zwracając uwagę na naszą postawę podczas leżenia czy siedzenia. Psychologia środowiskowa ma również na celu zmianę naszych zachowań w taki sposób, który wspomaga rozwój środowiskowy i rozwiązuje jego problemy, gwarantując jednocześnie dobrobyt człowieka i zachowując wysoką jakość życia. W psychologii środowiskowej zjawisko to nazywamy zrównoważonym rozwojem, który jest kluczową zasadą w tej dziedzinie (Dharmaraj, 2021).

Przestrzeń osobista i prywatność w psychologii środowiskowej są kluczowe dla dobrego samopoczucia i jakości życia jednostki i społeczności. Altman (1975)

definiuje prywatność jako „selektywną kontrolę dostępu do siebie lub swojej grupy”. Tak więc prywatność implikuje kontrolę nad najbliższym otoczeniem. Istotne jest, aby jednostka była w stanie zorganizować i spersonalizować własną przestrzeń. Dlatego też dostosowanie tejże prywatności może być ustanowione za pomocą barier fizycznych lub nawet psychologicznych, gdziekolwiek człowiek stara się odizolować lub chronić przed wtargnięciem innych w jego przestrzeń prywatną. Szczególnie widzi się to w domu, ale także w środowisku pracy lub podczas spędzania czasu wolnego (np. na plaży). Prywatność obejmuje nie tylko wyłączność wzrokową, lecz także słuchową. Stale lub przejściowo zajmowane miejsca skutkują przywiązaniem do miejsca, któremu towarzyszą więzi z osobistymi obiektami, takimi jak meble, obrazy i pamiątki. Wykorzystanie przestrzeni w środowisku domowym lub biurowym zaowocowało wieloma badaniami na ten temat. Przestrzeń osobista jest definiowana przez psychologię środowiskową jako niewidzialną granicę otaczającą każdą jednostkę, w którą inni ludzie nie mogą ingerować bez powodowania dyskomfortu dla pierwszej osoby. Dystanse interpersonalne są więc wskazówkami pozwalającymi zrozumieć specyficzną relację dwóch jednostek (Evans, 1998).

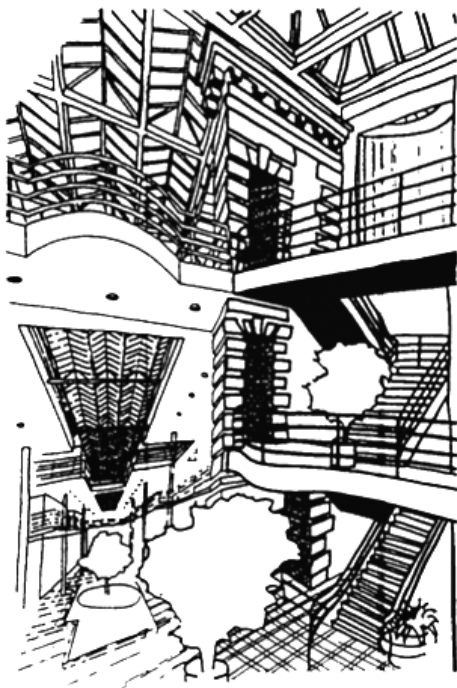
Architektura w psychologii środowiskowej

Psychologia środowiskowa najpierw zaczęła zaznaczać swoją obecność w świecie architektury. Od dziesięcioleci psychologowie środowiskowi pracują nad ulepszeniem budynków w taki sposób, aby skupić się na potrzebach człowieka.

Ludzie spędzają ponad 90% swojego życia w budynkach. Wiele więcej wiemy o tym, jak warunki środowiskowe nas otaczające wpływają na nasze zachowanie niż o tym, jak środowisko zabudowane wpływa na nasze zdrowie. Jest tak, ponieważ istnieje zbyt mało dowodów na to, aby stwierdzić, że cechy środowiska zabudowanego mogą wpływać bezpośrednio na zdrowie człowieka. Na przykład stres pojawia się, gdy występuje brak równowagi pomiędzy wymaganiami środowiska a zasobami ludzkimi. Psychologowie środowiskowi wiedzą, że stres jest procesem dynamicznym, który w dużym stopniu zależy od tego, jak jednostka radzi sobie w życiu codziennym. Jednak dopóki psychologia środowiskowa nie zrozumie lepiej, w jaki sposób właściwości typowych, codziennych wnętrz stanowią wyzwanie dla ludzkich zdolności życia codziennego, nasze rozumienie środowiska i ludzkiego samopoczucia pozostanie niekompletne (Evans, McCoy, 1998).

Na poziom stymulacji u człowieka wpływają właściwości otoczenia wewnątrz budynków, takie jak intensywność lub złożoność cech bodźców. Głośny hałas, jaskrawe światło, nietypowe lub silne zapachy oraz jaskrawe kolory szczególnie wydają się zwiększać wspomnianą wcześniej stymulację. Ekstremalne natężenie bodźców oraz bardzo złożone lub niespójne wzorce stymulacji mogą potencjalnie wywoływać stres. Wysoki poziom złożoności stworzony przez różnorodność i intensywność prowadzi

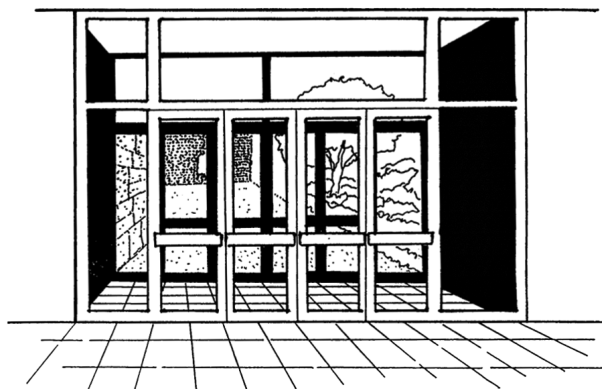
do nadmiaru stymulacji. Sama różnorodność elementów i wielkość przestrzeni powodują przeciążenie zmysłów. W przestrzeni brakuje silnego, jednoczącego tematu przewodniego albo wzoru. Typowy przykład takiego środowiska przedstawiono na rysunku 1 (McCoy, 1998).



RYS. 1. Przykładowy wystrój wnętrza niezgodnego z zasadami psychologii środowiskowej

ŹRÓDŁO: Evans, 1998.

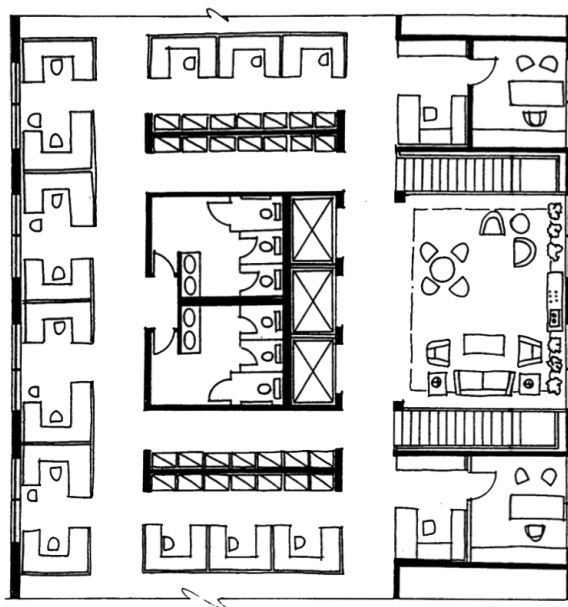
Wykorzystujemy wnętrza zgodnie z naszym rozumieniem ich funkcji. Polegamy również na systemach informacyjnych, które dostarczają informacji zwrotnych o działaniu budynku lub urządzeń w nim się znajdujących. Kiedy nie jesteśmy w stanie łatwo dostrzec funkcjonalnych właściwości przestrzeni lub niewłaściwie oceniamy funkcję budynku lub technologii z nim związanych, następują problemy w naszej ocenie sytuacji. Rysunek 2 przedstawia właśnie błędne wykorzystanie dostępnej przestrzeni. Niejasności dotyczące funkcjonalnego znaczenia elementów wnętrza mogą pojawić się z kilku powodów. Drzwi te są nietrafionym pomysłem, ponieważ nie jesteśmy do końca pewni, w jaki sposób one działają. Po której stronie i w jakim kierunku należy obsługiwać drzwi? Gwałtowne zmiany w dostępie wzrokowym, spowodowane przemieszczaniem się przez ostrą pionową lub poziomą barierę, mogą powodować wyraźną dezorientację. Narożniki, wejścia i schody są czasami zaprojektowane tak, że niewiele można dostrzec w przestrzeni gdzie się znajdują. Następuje to, dopóki nie przekroczy się bariery, którą one stanowią (Evans, McCoy 1998).



RYS. 2. Drzwi w środku budynku – błędnie wykorzystana przestrzeń

ŹRÓDŁO: Evans, 1998.

Odległość pomiędzy przestrzeniami również wpływa na potencjał i częstotliwość interakcji między ludźmi. Bezpośredniość otworów drzwiowych i przecięcie ścieżek komunikacyjnych wpływają na nieuniknioną interakcję. Punkty centralne zapewniają możliwość socjalizacji w małych grupach. Dobrze zaprojektowane – są łatwo dostępne, funkcjonują jako neutralne obszary i zapewniają perspektywiczny dostęp wzrokowy, jak pokazano na rysunku 3.



RYS. 3. Wystrój wnętrza zgodny z zasadami psychologii środowiskowej

ŹRÓDŁO: Evans, 1998.

Punkty centralne znacznie ułatwiają interakcje międzyludzkie. W tym budynku biurowym punkt ten jest zlokalizowany w centrum, w pobliżu kilku głównych ścieżek komunikacyjnych, i może być oglądany z każdej strony. Punkt centralny jest neutralnym terytorium, maumeblowanie oraz zapewnia kawę i jedzenie, które przyciągają i utrzymują zainteresowanie potencjalnych użytkowników.

Aranżacje meblowe również mogą bezpośrednio wpływać na częstotliwość interakcji społecznych. Zależy to w większej mierze od wygodnego dystansu interpersonalnego, łatwości nawiązywania kontaktu wzrokowego i komfortu fizycznego podczas rozmowy. Jednak kiedy kontakt wzrokowy jest utrudniony czy odległości interpersonalne są nieodpowiednio bliskie lub dalekie, mają odwrotny skutek, zniechęcając do interakcji społecznych.

Podsumowanie

Psychologia środowiskowa jest nową dziedziną nauki i dąży do spekulatywnego i interdyscyplinarnego połączenia i integracji subdyscyplin świata techniki i kultury. Ustalenia dziedziny psychologii środowiskowej zakładają, że człowiek jest silnie związany z określonymi elementami środowiska naturalnego. We współczesnym świecie jednak coraz mniej widoczny jest udział rzeczywistej przyrody lub strukturalnej organizacji preferowanych układów wokół jednostek ludzkich. Psychologia środowiskowa ma do odegrania ważną rolę w dostarczaniu konceptualnych wytycznych, w tym m.in., jak patrzeć i analizować dane otoczenie w odniesieniu do jego kontekstu i przeznaczenia. Jeśli istnieje w tym otoczeniu luka, to należy odpowiedzieć na pytanie, czy powstała ona dlatego, że psychologom środowiskowym nie udało się poprawnie porozumieć z innymi naukowcami organizującymi środowisko, czy też dlatego, że psychologowie środowiskowi nie dostarczyli takich odpowiedzi, jakich oczekiwali inżynierowie, architekci i projektanci. Może psychologowie środowiskowi stawiają sobie niewłaściwe pytania? A może psychologia środowiskowa cierpi na niedobór danych od praktyków właśnie? Nieustannie należy poszukiwać skuteczniejszych sposobów zrozumienia teoretycznych danych niż te, które ludzkość obecnie zna. Może być też tak, że ci, którzy mają za zadanie realizować i wdrażać wyniki badań z zakresu psychologii środowiskowej i innych nauk behawioralnych, są ograniczeni brakiem zrozumienia i współpracy z zespołami odpowiedzialnymi za wizualne generowanie przestrzeni odbieranej przez człowieka.

Niewątpliwie obecnie coraz częściej psychologia środowiskowa jednak odgrywa znaczną rolę w kreowaniu nowych miejsc pracy, zamieszkania czy odpoczynku. Jest ona również kluczowa w organizacji naszej własnej przestrzeni, ponieważ zwraca szczególną uwagę na dobre samopoczucie i zdrowie.

Literatura

- [1] Ackerman C.E., *What is Environmental Psychology?*, [online] PositivePsychology.com, 2018, <https://positivepsychology.com/environmental-psychology/> (dostęp: 25.06.2022).
- [2] Bańka A., *Spółeczna psychologia środowiskowa*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2002.
- [3] Churchill W., *House of Commons rebuilding*, HC Deb, 1943, 393, 403–473.
- [4] Stokols D., *Conceptual strategies of environmental psychology*, w: D. Stokols, I. Altman (eds.), *Handbook of Environmental Psychology*, John Wiley & Sons, New York 1987, 41–70.
- [5] Dharmaraj S., *Environmental Psychology and its importance*, Rethinking the Future, 2022, 1.
- [6] Evans G., McCoy J.M., *When buildings don't work: The role of architecture in human health*, „Journal of Environmental Psychology” 1998, vol. 18, 85–94.
- [7] Huppmann G., [Willy Hellpach's (1877–1955) *Medical Psychology*], „Würzburger medizinhistorische Mitteilungen” 2004, Bd. 23, 19–38.
- [8] Joye Y., *Architectural Lessons from Environmental Psychology: The Case of Biophilic Architecture*, „Review of General Psychology” 2007, vol. 11(4), 305–328, DOI: 10.1037/1089-2680.11.4.305.
- [9] Moser G., Uzzell D.L., *Environmental Psychology*, w: T. Millon, M.J. Lerner (eds.), *Comprehensive Handbook of Psychology*, vol. 5: *Personality and Social Psychology*, John Wiley & Sons, New York 2003, 419–445.
- [10] Ng Ch.F., Gifford R., Veitch J.A., McCunn L.J., *Environmental psychology*, w: M.E. Norris (ed.), *The Canadian Handbook for Careers in Psychological Science*, eCampus Ontario, Kingston 2019.
- [11] Pol E., *Blueprints for a History of Environmental Psychology (I): From First Birth to American Transition*, „Medio Ambiente y Comportamiento Humano” 2006, vol. 7, 95–113.
- [12] Saunders C.D., *The Emerging Field of Conservation Psychology*, „Human Ecology Review” 2003, vol. 10(2), 137–49.
- [13] Ravi N., *Environmental Psychology: Origin, Theories, Scope, Applications*, Sociology Group, 2021, <https://www.sociologygroup.com/environmental-psychology-origin-theories-scope-applications> (dostęp: 2.07.2022).
- [14] Spencer C., Gee K., Sutton J., *The roots and branches of environmental psychology*, „The Psychologist” 2009, vol. 22, 180–183.
- [15] Steg L., van den Berg A.E., de Groot J.I.M., *Environmental psychology: History, scope and methods*, w: E.M. Steg, A.E. van den Berg, J. de Groot (eds.), *Environmental Psychology: An introduction*, Wiley-Blackwell, London 2012, 1–12.
- [16] Trepte S., Reinecke L., *Privacy Online. Perspectives on privacy and self-disclosure in the social web*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2011, DOI 10.1007/978-3-642-21521-6_1.
- [17] www.youtube.com (n.d.), *Lecture 01 – Introduction to Environmental Psychology and Overview of the Course*, <https://www.youtube.com/watch?v=wHUS5T6uYT4> (dostęp: 22.06.2022).

Analiza zanieczyszczeń powietrza z procesów przemysłowych w Polsce

Adam Tabor, Renata Weygand, Ewa Szatyłowicz

*Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku,
Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska,*

e-mail: tabora@grand-activated.pl, weygandr@grand-activated.pl, e.szatyłowicz@pb.edu.pl

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, przemysł, procesy przemysłowe, Polska

Streszczenie: Zanieczyszczenia powietrza w postaci pyłów i gazów wytwarzane są przez zakłady przemysłowe oraz gospodarstwa domowe. Przemysł jest zobowiązany do stosowania metod, technologii i środków technicznych w celu ochrony powietrza. Jednak emisja zanieczyszczeń z przemysłu, na którą składają się emisje z procesów produkcyjnych oraz emisje ze spalania paliw w przemyśle, ma duży udział w całkowitej emisji zanieczyszczeń ze źródeł antropogenicznych. W artykule omówiono wielkość emisji z przemysłu w systemie inwentaryzacji emisji SNAP. Emisje z procesów produkcyjnych i spalania paliw w przemyśle porównano z całkowitą emisją ze źródeł antropogenicznych w Polsce w danym roku.

Wstęp

Zanieczyszczenia powietrza pochodzenia antropogenicznego są charakterystycznym elementem środowiska miast. Ich głównymi źródłami są procesy spalania paliw kopalnych na potrzeby komunalne, transportowe i przemysłowe, a także procesy produkcyjne powodujące uwalnianie do atmosfery specyficznych zanieczyszczeń, charakterystycznych dla danego typu produkcji [1]. Ten drugi rodzaj zanieczyszczeń antropogenicznych, czyli emisja zanieczyszczeń do atmosfery z procesów przemysłowych, to według systemu SNAP (*Selected Nomenclature for sources of Air Pollution*) jedna z 11 kategorii emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Emisji z procesów przemysłowych nadano kod

SNAP04, a procesom spalania w przemyśle przypisano kod SNAP03. Obie kategorie zawierają emisję zanieczyszczeń z przemysłu. Przemysł jest głównym elementem gospodarki europejskiej. Według Eurostatu w 2018 roku odpowiadał on za 17,6% produktu krajowego brutto (PKB) i zatrudniał bezpośrednio 36 milionów osób. Jednocześnie jest odpowiedzialny za ponad połowę całkowitych emisji niektórych kluczowych zanieczyszczeń powietrza i gazów cieplarnianych [2].

Do zanieczyszczeń przemysłowych zaliczamy substancje wyemitowane do atmosfery na skutek procesów spalania paliw, w których główną rolę odgrywa przemysł energetyczny, a także procesów technologicznych przemysłu chemicznego, hutniczego, rafineryjnego oraz kopalni i cementowni. Głównymi zanieczyszczeniami atmosferycznymi są tlenek węgla (CO), pył zawieszony (PM), tlenki azotu (NO_x), lotne związki organiczne (LZO), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), ozon (O_3) i dwutlenek siarki (SO_2). Wzrost ilości emisji tych zanieczyszczeń wynika z szybkiego uprzemysłowienia i urbanizacji krajów rozwijających się [3, 4].

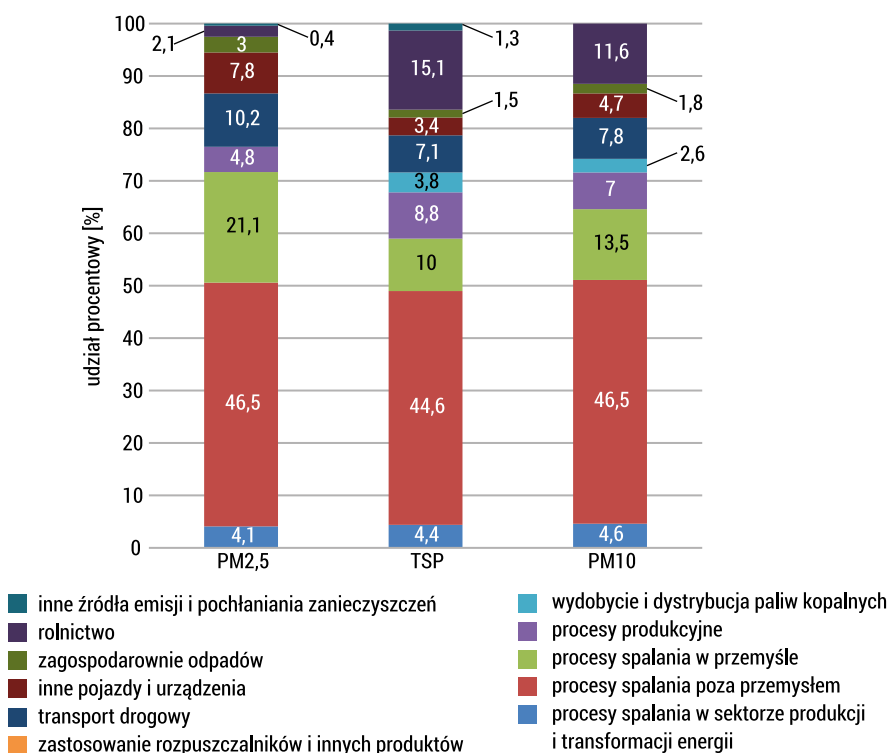
W związku z powyższym postanowiono porównać emisję z przemysłu z emisją z innych sektorów według układu SNAP. W niniejszej pracy przedstawiono wielkości emisji zanieczyszczeń, tj.: SO_2 , NO_x , NMLZO, NH_3 , PM_{2,5}, PM₁₀ oraz TSP dla wszystkich kategorii emisji według SNAP.

Analiza wielkości emisji

Najnowsze badania prowadzone przez KOBIZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami) w zakresie inwentaryzacji zanieczyszczeń powietrza pokazują, że emisja pyłu, sadzy oraz WWA pochodzi głównie z procesów spalania poza przemysłem, czyli z gospodarstw domowych. Natomiast emisja zanieczyszczeń powietrza z przemysłu, na którą składają się: emisja z procesów przemysłowych oraz emisja z procesów spalania w przemyśle, we wszystkich analizowanych zanieczyszczeniach ma mniejsze udziały niż procesy spalania poza przemysłem. Na rysunku 1 przedstawiono udziały głównych sektorów gospodarki w emisji pyłu całkowitego TSP, pyłu PM₁₀ oraz pyłu PM_{2,5}. We wszystkich przypadkach udział z sektora SNAP 02 (ang. *Selected Nomenclature for Air Pollution*; 02 – sektor komunalny i mieszkaniowy) jest na poziomie ok. 50%. Głównym źródłem emisji całkowitego pyłu zawieszonego (TSP) w Polsce są procesy stacjonarnego spalania, z których pochodzi większość krajowej emisji. Emisje z transportu oraz innego pochodzenia stanowią zaledwie ok. 10% emisji krajowej TSP. Znaczna część emisji w tej kategorii pochodzi z procesów innych niż spalanie paliw (tj. ścieranie opon i hamulców oraz ścieranie powierzchni dróg) [KOBIZE 2019]. Na emisję związaną z przemysłem w przypadku TSP przypada 18,8%, na co składa się emisja z procesów spalania w przemyśle równa 10% oraz emisja z procesów produkcyjnych, która wynosi 8,8%. Zasadniczym źródłem emisji (ok. 47%) pyłu drobnego PM_{2,5} (rys. 1) są źródła należące do kategorii „Procesy spalania poza

przemysłem (SNAP 02)”, w którym największa część emisji (ponad 80%) jest związana ze spalaniem węgla kamiennego i drewna w gospodarstwach domowych. Pozostałe większe istotne źródła emisji pyłu tej frakcji to sektory: „Procesy spalania w przemyśle (SNAP 03)” – 21% oraz „Transport drogowy (SNAP 07)” – 10%. Na emisję PM_{2,5} związaną z przemysłem składa się jeszcze emisja z procesów produkcyjnych, która stanowi 4,8%. Emisja PM_{2,5} z przemysłu to 25,8%. Dla przykładu w 2017 roku zanotowano wzrost emisji pyłów PM_{2,5} w porównaniu z rokiem poprzednim o ok. 4%. Największy wpływ na tę zmianę miał wzrost zużycia węgla kamiennego i drewna w przemyśle (SNAP 0302) oraz wzrost emisji PM_{2,5} z transportu drogowego, wynikający z większego zużycia paliw, a wraz z tym ze zwiększenia rocznych przebiegów pojazdów (przebiegi zwiększyły się o ponad 16%) [KOBIZE 2019].

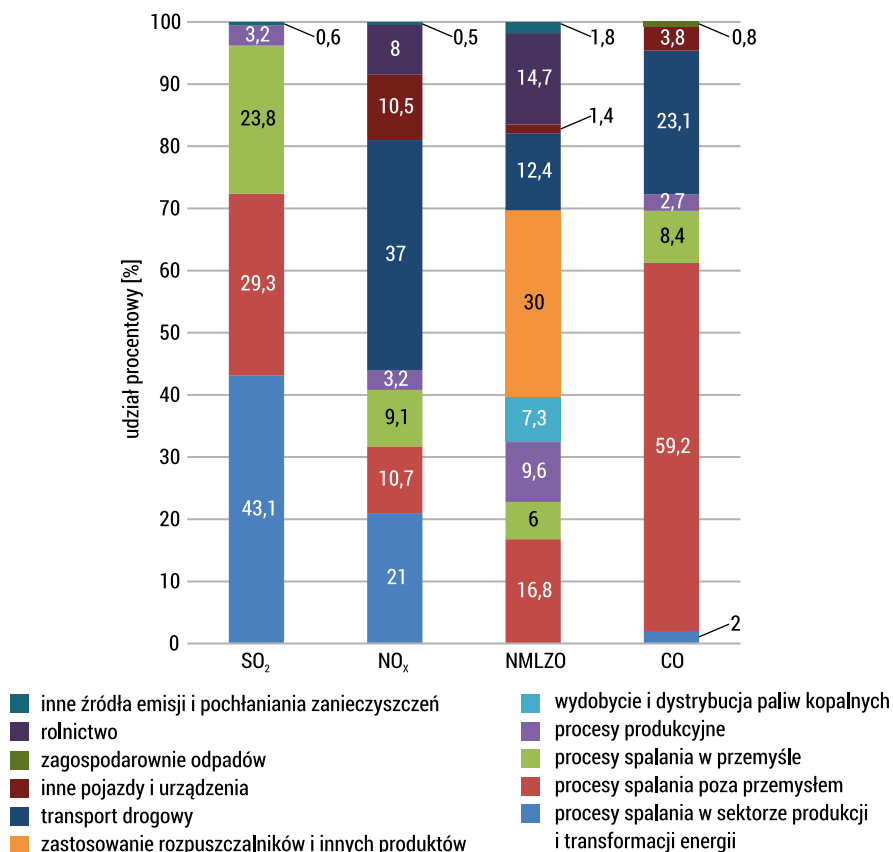
Głównym źródłem emisji pyłu PM₁₀, podobnie jak dla pyłu całkowitego, są procesy stacjonarnego spalania (SNAP 0103), z których większość pochodzi z kategorii SNAP 02 (Procesy spalania poza przemysłem), a także SNAP 10 (Rolnictwo) [rysunek 1]. Na emisję pyłu PM₁₀ z przemysłu składa się emisja z „Procesów spalania w przemyśle” równa 13,5% oraz emisja z „Procesów przemysłowych” równa 7%, co w sumie stanowi 20,5% emisji całkowitej PM₁₀ z przemysłu.



RYS. 1. Udział istotnych sektorów w emisji PM_{2,5}, TSP oraz PM 10 w roku 2017

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [KOBIZE 2019].

Z kolei głównym źródłem emisji SO_2 (rys. 2) jest energetyczne spalanie paliw (głównie węgla) w źródłach stacjonarnych, które łącznie są odpowiedzialne za prawie 100% krajowej emisji, w tym zawarto 23,8% odpowiedzialnych za „Procesy spalania w przemyśle”. Emisja SO_2 z procesów produkcyjnych stanowi tylko 3,2% emisji krajowej i jest związana z rafinacją ropy naftowej, produkcją koksu i kwasu siarkowego [KOBIZE 2019]. W sumie emisja całkowita z przemysłu wynosi 27% emisji całkowitej krajowej SO_2 .

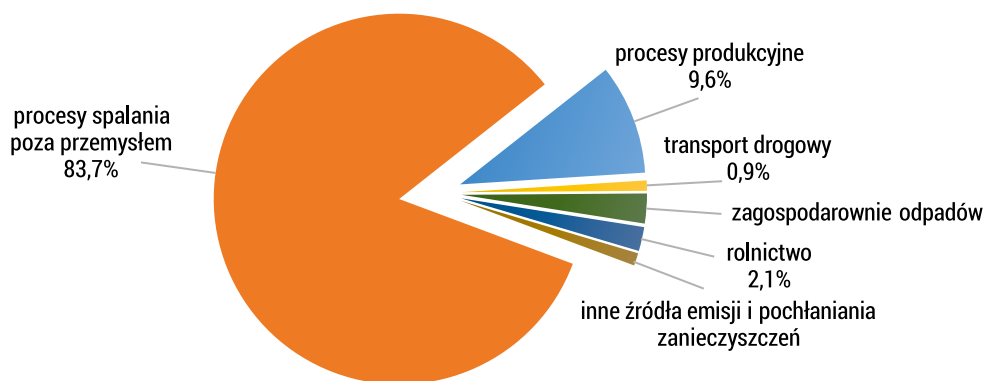


RYS. 2. Udział istotnych sektorów w emisji SO_2 , NO_x , NMLZO, CO

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [KOBIZE 2019].

Emisja tlenków azotu NO_x w sektorze przemysłowym stanowi w sumie 12,3%, na co składa się 3,2% emisji z procesów przemysłowych oraz 9,1% ze spalania paliw w sektorze przemysłowym. Dla porównania emisja z sektora „Procesy spalania poza przemysłem” wynosi 10,7%. Spadek emisji w roku 2017 (o ok. 2,2%) w stosunku do roku 2016 wynika z mniejszego zużycia węgla kamiennego w gospodarstwach domowych. „Procesy spalania poza przemysłem” są drugą kategorią pod względem

udziału w emisji krajowej NMLZO z ok. 17-procentowym udziałem w emisji krajowej. Emisja NMLZO z przemysłu stanowi 15,6%, w tym 6% to sektor „Procesy spalania w przemyśle”, a 9,6% to sektor „Procesy przemysłowe”. Istotnymi źródłami emisji NMLZO są również „Rolnictwo” (SNAP 10) z udziałem ok. 15% i „Transport drogowy” (SNAP 07) z udziałem ok. 12%. W roku 2017 największym źródłem emisji tlenku węgla (rys. 2) były „Procesy spalania poza przemysłem” (SNAP 02), które są odpowiedzialne za ok. 59% krajowej emisji tlenku węgla. Innym znaczącym źródłem emisji tlenku węgla jest „Transport drogowy” (SNAP 07) – ok. 23% emisji krajowej. Emisja tlenku węgla w przemyśle stanowi 11,1%, na co składa się 8,4% emisji pochodzącej ze spalania paliw w przemyśle, a 2,7% to emisja CO z procesów produkcyjnych w różnych branżach.



RYS. 3. Udział istotnych sektorów w emisji WWA w roku 2017

ŹRÓDŁO: [KOBIZE 2019].

Analizując rysunek 3, stwierdzono, że decydująca część emisji WWA, ok. 84%, pochodzi z kategorii „Procesy spalania poza przemysłem (SNAP 02)”, przy czym jej główną część stanowi emisja z podkategorii SNAP 0202, tj. z gospodarstw domowych. Około 10% szacowanej krajowej emisji WWA pochodzi z „Procesów produkcyjnych” (SNAP 04) – głównie z produkcji koksu [KOBIZE 2019]. Procentowy udział poszczególnych sektorów w emisji krajowej przedstawia rysunek 3. Emisja WWA do powietrza, szacowana na podstawie oceny wielkości emisji czterech wskaźnikowych związków z tej grupy (benzo(a)pirenu, benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, i indeno(1,2,3-cd)pirenu), wyniosła w 2017 roku 151,6 Mg. Na podstawie danych z raportu KOBIZE emisja WWA w roku 2017, w stosunku do poziomu emisji z roku 2016, zmniejszyła się o ok. 1,3% oraz o 2,6% w odniesieniu do roku 2015. W największym stopniu do zmiany krajowej emisji WWA przyczynił się spadek emisji z sektora „Procesy spalania poza przemysłem” (SNAP 02), co jest związane ze zmniejszeniem zużycia węgla kamiennego i drewna w gospodarstwach domowych.

Podsumowanie

W ciągu ostatnich 20 lat znacznie ograniczono zanieczyszczenia powietrza emitowane z przemysłu. Przyczyną tego zjawiska było wprowadzenie wymogów na poziomie prawa unijnego. Jednakże ciągły brak wymogów i norm regulujących emisję w zakresie instalacji spalania z gospodarstw domowych oraz transportu generuje ogromne ilości zanieczyszczeń powietrza, co dowiedziono powyższą analizą całkowitej emisji zestawionej przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami.

Ponadto należy pamiętać, że na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń z przemysłu oprócz rygorystycznych przepisów dotyczących ochrony środowiska w głównej mierze wpłynęły poprawa efektywności energetycznej, przejście na mniej zanieczyszczające rodzaje procesów produkcyjnych oraz dobrowolne programy ograniczania wpływu produkcji na środowisko. Mimo tych pozytywnych zmian przemysł nadal jest odpowiedzialny za znaczne obciążenie naszego środowiska w zakresie zanieczyszczeń i wytwarzania odpadów.

Literatura

- [1] Cembrzyńska J., Krakowiak E., Brewczyński P.Z., *Particulate pollution of PM10 and PM2.5 due to strong anthropopressure in Sosnowiec city*, „Environmental Medicine” 2012, vol. 15, 31–38. [in Polish]
- [2] EEA, *The challenge of reducing industrial pollution*, 2022, <https://www.eea.europa.eu/pl/sygna142y/sygna142y-2020/articles/wyzwanie-zwiazane-z-redukcja-zanieczyszczen-przemyslowych> [access 4.09.2022].
- [3] Fu H., Chen J., *Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China*, „Science of the Total Environment” 2017, vol. 578, 121–138, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.201>.
- [4] Sofia D., Gioiella F., Lotrecchiano N. Giuliano A., *Mitigation strategies for reducing air pollution*, „Environmental Science and Pollution Research” 2020, vol. 27, 19226–19235, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08647-x>.
- [5] KOBIZE, *National emission balance of SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMVOCs, dusts, heavy metals and POPs for the years 2015–2017 in the SNAP classification system. Synthetic report*, Institute of Environmental Protection, Warsaw 2019. [in Polish].

Komfort pracy w biurze domowym z wentylacją mechaniczną – studium przypadku

dr inż. Anna Justyna Werner-Juszczuk

*Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku,
Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji,
e-mail: a.juszczuk@pb.edu.pl*

Słowa kluczowe: komfort pracy, biuro domowe, wentylacja mechaniczna, poziom hałasu, odczucia komfortu

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę komfortu pracy w biurze domowym zlokalizowanym w budynku jednorodzinnym z wentylacją nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła. Analizie poddano równoważny poziom dźwięku, temperaturę powietrza, prędkość i temperaturę wypływu powietrza z anemostatu oraz odczucia subiektywne osoby pracującej. Parametry badano dla pięciu ustawień wydajności centrali wentylacyjnej: wentylator wyłączony (OFF), poziom niski (LOW), normalny (NORMAL), wysoki (HIGH) i maksymalny (MAX). Najwyższy poziom dźwięku, 31–32 dB(A), zaobserwowano dla wysokiego i maksymalnego poziomu. Normalny i niski poziom nastawy wentylatora skutkował powstaniem hałasu na poziomie 20–21 dB(A). Nastawa wentylatora wpływała na odczucia komfortu osoby pracującej. Przy najwyższym i maksymalnym poziomie pracy osoba skarżyła się na uciążliwość i głośność pracy wentylacji mechanicznej oraz na przeciąg. Temperatura w miejscu pracy spadała maksymalnie o 1 K w porównaniu z brakiem wentylacji. Niski poziom działającego nawiewu nie wpływał negatywnie na komfort pracy, w tym na odczucia hałasu i przeciągu. Poziom normalny, najczęściej ustawiany przez domowników, powodował brak lub odczucie lekkiego przeciągu, praca wentylacji była określana jako nieuciążliwa lub lekko uciążliwa. Komfort w miejscu pracy jest zależny od warunków pracy instalacji wentylacyjnej (poziom hałasu, prędkość i temperatura powietrza) oraz od subiektywnych odczuć osoby pracującej. W celu poprawy komfortu zaleca się lokalizowanie miejsca pracy z dala od elementów nawiewnych.

Wstęp

Człowiek ponad 90% czasu spędza w pomieszczeniach zamkniętych [6], w związku z czym istotną kwestią jest jakość środowiska wewnętrznego i jego parametry. W pomieszczeniach źródłem zanieczyszczeń są te pochodzące ze środowiska zewnętrznego: cząsteczki stałe PM_{2,5}, PM₁₀ oraz zanieczyszczenia gazowe (CO₂, CO, NO_x, lotne związki organiczne – VOCs) [19]. Drugim źródłem są zanieczyszczenia powstające w pomieszczeniach wskutek emisji materiałów oraz użytkowania pomieszczeń (CO₂ [7], wilgoć [16]). Do zanieczyszczeń środowiska zalicza się także hałas, którego nadmierny poziom negatywnie wpływa na zdrowie i życie człowieka [18]. Szczególnie negatywne oddziaływanie ma miejski hałas samochodowy, który wpływa na zaburzenia snu, choroby serca oraz problemy natury psychicznej (rozdrażnienie, zaburzenia poznawcze, szumy uszne).

Do głównych źródeł hałasu w pomieszczeniach zalicza się hałas przenikający z zewnątrz, hałas generowany podczas użytkowania budynku i hałas od wyposażenia technicznego w budynku.

Na hałas przenikający z zewnątrz wpływa izolacyjność przegród budowlanych zewnętrznych i jej komponentów oraz dodatkowe elementy na elewacji budynku, np. urządzenia zacieniające [9]. Hałas zależy także od środowiska zewnętrznego, bliskości drogi, torów kolejowych, zakładów przemysłowych, obiektów usługowych, w tym obiektów z branży rozrywkowej.

Istotnym źródłem hałasu w pomieszczeniach jest hałas pochodzący od technicznego wyposażenia budynku: instalacji wodno-kanalizacyjnych, grzewczych i wentylacyjnych czy dźwigów osobowych.

Wysokie wymagania w zakresie energochłonności budynków wymagają stosowania nowoczesnych instalacji HVAC, które zapewnią komfort mieszkańcom przy jednocześnie niskim zużyciu energii.

Tradycyjnym sposobem wentylacji budynków jest wentylacja grawitacyjna, która polega na nawiewaniu świeżego powietrza przez nieszczelności budynku, otwieranie okien lub przez specjalne urządzenia wmontowane w ściany zewnętrzne (nawiewniki). Wywiew powietrza następuje poprzez kanały murowane ponad dach budynku. Działanie wentylacji grawitacyjnej jest oparte na różnicy temperatury (ciśnienia) powietrza w pomieszczeniu i na zewnątrz budynku. Stąd, zwłaszcza latem, jest ona nieefektywna. Stosowanie dodatkowych otworów do napływu świeżego powietrza w ścianach zmniejsza szczelność budynku. Powoduje to napływanie dużych ilości powietrza o temperaturze powietrza zewnętrznego, które trzeba ogrzać, a tym samym zwiększa się zapotrzebowanie na ciepło budynku [2]. Innym negatywnym skutkiem wentylacji grawitacyjnej jest zwiększony poziom hałasu przenikającego z zewnątrz [1]. Ze względu na liczne wady wentylacji grawitacyjnej w nowoczesnych niskoenergetycznych lub zeroenergetycznych budynkach konieczne jest stosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej, najlepiej z odzyskiem ciepła [15].

Zastosowanie wentylacji mechanicznej w budynku powoduje dodanie kolejnego źródła hałasu [12]. Głównym źródłem hałasu w instalacji wentylacyjnej jest turbulentny przepływ powietrza w kanałach. Im wyższa prędkość przepływu powietrza, tym hałas generowany w kanałach jest większy [10]. Istotnym źródłem hałasu jest także wentylator i jego silnik [4]. Poprawnie dobrane urządzenia z uwzględnieniem strumienia powietrza wentylacyjnego, sprężu oraz maksymalnej dopuszczalnej prędkości przepływu powietrza nie powinny generować dużego hałasu. Zdarza się jednak, że niepoprawne zaprojektowanie instalacji oraz naturalne zużywanie elementów wentylatora powoduje powstawanie hałasu. Hałas generowany przez wentylację może być odbierany jako tonalny, przeszkadzający, niekomfortowy. W ten sposób może negatywnie oddziaływać na samopoczucie człowieka, jego produktywność [3] oraz jakość spania [8, 5].

Ekspozycja na hałas podczas pracy umysłowej wpływa na wydajność i komfort pracy. W obiektach biurowych typu „open space” wykazano, że hałas obniża wydajność pracowników, ich samopoczucie oraz samoocenę [17]. Poza tym na wydajność pracy ma wpływ temperatura powietrza w pomieszczeniu. Zbyt wysoka temperatura w biurze, przekraczająca optymalny zakres 21–25°C, negatywnie wpływa na nastrój, motywację do pracy, koncentrację i ocenę jakości powietrza [11].

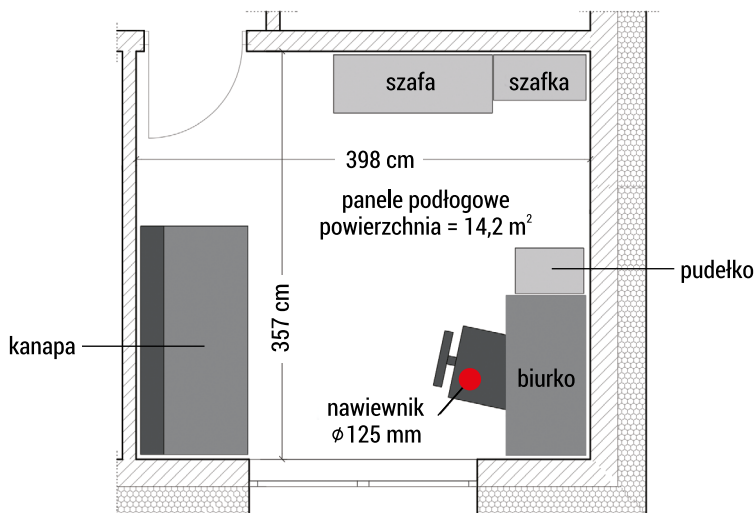
W ciągu ostatnich trzech lat ze względu na pandemię COVID-19 wzrosła liczba osób pracujących zdalnie w pomieszczeniach domowych. W związku z czym zmieniły się warunki wykonywania pracy. Do głównych okoliczności wpływających negatywnie na pracę w domu należą obecność pozostałych członków rodziny oraz brak wydzielonego pomieszczenia do pracy. Istotny wpływ ma także jakość środowiska wewnętrznego, na które składają się temperatura, wilgotność, prędkość przepływu powietrza, a także poziom hałasu.

Przedmiotem badań jest komfort pracy w pomieszczeniu przeznaczonym do pracy biurowej, zlokalizowanym w domu jednorodzinnym, w którym zastosowana jest wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła. Analizie poddano poziom hałasu oraz temperaturę w miejscu wykonywania pracy. Wykonano pomiary wypływu powietrza z anemostatu nawiewnego. Dodatkowo przeprowadzono ankietę wśród osób wykonujących pracę w pomieszczeniu w celu określenia ich subiektywnego odczucia komfortu podczas pracy i pracującej instalacji wentylacyjnej.

Opis pomieszczenia i instalacji wentylacyjnej

Analizowane pomieszczenie znajduje się w budynku parterowym o powierzchni użytkowej 122 m² zlokalizowanym w spokojnej okolicy, z dala od ruchu drogowego. Dom jest ostatni na ulicy, w związku z czym nie ma żadnego ruchu samochodowego oprócz ruchu mieszkańców i służb komunalnych. Ściana zewnętrzna najbliższego budynku znajduje się w odległości 33 m od okna analizowanego pomieszczenia. Pomieszczenie

jest ogrzewane z wykorzystaniem ogrzewania podłogowego, rozmieszczonego równomiernie na całej powierzchni pomieszczenia. Badane pomieszczenie ma powierzchnię $14,2 \text{ m}^2$ i wysokość $2,74 \text{ m}$. Schemat pomieszczenia z rozmieszczeniem umeblowania i anemostatu nawiewnego przedstawia rysunek 1.



RYS. 1. Schemat badanego pomieszczenia

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Budynek jest wyposażony w wentylację mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła. Wentylacja jest wykonana w systemie rozdzielaczowym. W analizowanym pomieszczeniu jest usytuowany jeden anemostat nawiewny o średnicy 125 mm , podłączony do skrzynki rozprężnej. Skrzynka rozprężna pełni funkcję wyrównującą dystrybucję powietrza oraz tłumiącą. Jest wyłożona materiałem dźwiękochłonnym o grubości 3 mm . Do skrzynki rozprężnej doprowadzone są dwa przewody elastyczne karbowane $\phi 75 \text{ mm}$, które doprowadzają powietrze z rozdzielacza powietrza nawiewanego i z centrali wentylacyjnej. Obliczeniowy przepływ powietrza w pomieszczeniu to $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Nawiewnik nie jest wyposażony w przepustnicę, regulacja strumienia jest realizowana poprzez stopień otwarcia anemostatu. Instalacja wentylacyjna została wyregulowana przed oddaniem budynku do użytkowania. Długość przewodów od centrali wentylacyjnej do anemostatu wynosi około 12 m . Przewody są ułożone w warstwie izolacji cieplnej – styropianie.

Budynek jest zasilany przez centralę wentylacyjną o wydajności $387 \text{ m}^3/\text{h}$. Centrala jest wyposażona w wymiennik obrotowy do odzysku ciepła. Poziom dźwięku emitowany przez centralę według danych producenta to 42 dB(A) . Centrala może pracować na 5 poziomach:

- poziom OFF – centrala wyłączona – prędkość wentylatora 0 obr/min ,
- poziom LOW – prędkość wentylatora 1020 obr/min ,

- poziom NORMAL – prędkość wentylatora 1320 obr/min,
- poziom HIGH – prędkość wentylatora 3000 obr/min,
- poziom MAXIMUM – prędkość wentylatora 3120 obr/min.

Ustawienie poziomu pracy wentylatora odbywa się ręcznie za pomocą panelu dotykowego zlokalizowanego w salonie, w zależności od potrzeb mieszkańców. Standardowe ustawienie wentylatora w ciągu dnia to NORMAL.

Opis użytkowania pomieszczenia

Pomieszczenie biurowe jest użytkowane jednocześnie przez jedną osobę. Praca wykonywana jest pod nieobecność pozostałych członków rodziny, w związku z czym podczas pracy nie występują źródła hałasu związane z normalnym użytkowaniem domu: rozmowy, gotowanie, oglądanie TV, zabawy. Jedynym źródłem hałasu jest centrala wentylacyjna oraz urządzenia mechaniczne w domu, jak lodówka. Ponieważ badane pomieszczenie nie sąsiaduje z kuchnią, wpływ hałasu od urządzeń w kuchni jest pomijalnie mały.

Metodyka badań

Na stanowisku pracy mierzono parametry:

- równoważny poziom dźwięku $A L_{Aeq}$,
- temperaturę powietrza na stanowisku pracy T_{in} ,
- temperaturę powietrza nawiewanego T_{naw} ,
- prędkość wypływu powietrza z anemostatu.

Pomiary dźwięku wykonano za pomocą miernika DSA-50 SONOPAN (rys. 2a). Pomiary temperatury za pomocą termopary KNiCr-Ni podłączonej do miernika firmy Ahlborn (rys. 2c). Pomiar wypływu powietrza z anemostatu odbywał się z wykorzystaniem miernika TESTO 435 i anemometru wiatraczkowego TESTO 417 (rys. 2b). Zakresy pomiarowe urządzeń zebrano w tabeli 1. Pomiary temperatury i poziomu dźwięku wykonano przy biurku, w miejscu siedzenia osoby pracującej, na wysokości 1,2 m od poziomu podłogi (rys. 1).

2a)



2b)



2c)



RYS. 2. Urządzenia pomiarowe: 2a) miernik poziomu dźwięku DSA-50 SONOPAN, 2b) anemometr TESTO 417 z miernikiem TESTO 435, 2c) termopara KNiCr-Ni z miernikiem Ahlborn

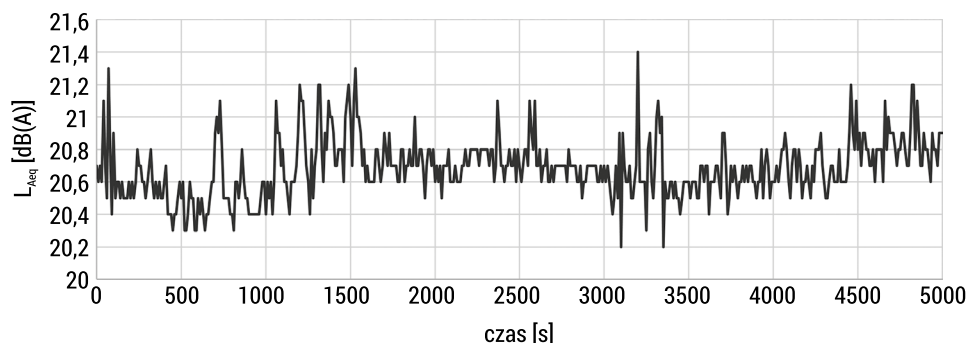
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TAB. 1. Charakterystyka przyrządów pomiarowych

Parametr	Poziom dźwięku	Temperatura powietrza	Prędkość powietrza
Urządzenie pomiarowe	• DSA-50 SONOPAN klasa dokładności – 1 • całkowity zakres pomiarowy poziomu dźwięku (L_A) i równoważnego poziomu dźwięku (L_{Aeq}) 18–135 dB(A)	termopara K NiCr-Ni ZA 9020-FS AHLBORN	• miernik TESTO 435 z anemometrem skrzydełkowym TESTO 417 • zakres pomiarowy 0,3–20 m/s
Dokładność	0,1 dB	$\pm 0,05$ K lub $\pm 0,05\%$	0,01 m/s

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Norma PN-87/B-02156 [14] zaleca, aby pomiar dźwięku był wykonywany w trakcie cyklu pracy urządzenia. Minimalny czas badań poziomu dźwięku to 10 min. W badanym budynku centrala wentylacyjna pracuje bez przerw. Przeprowadzono badania wstępne, które wykazały brak zmienności poziomu dźwięku. Amplituda poziomu dźwięku podczas 5000 s pomiarów wyniosła maksymalnie 1,2 dB(A) [rysunek 3]. Na tej podstawie przeprowadzono pomiary hałasu dla okresu 10 min dla każdej nastawy wentylatora.



RYS. 3. Równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} w ciągu 5000 s przy nastawie wentylatora NORMAL

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

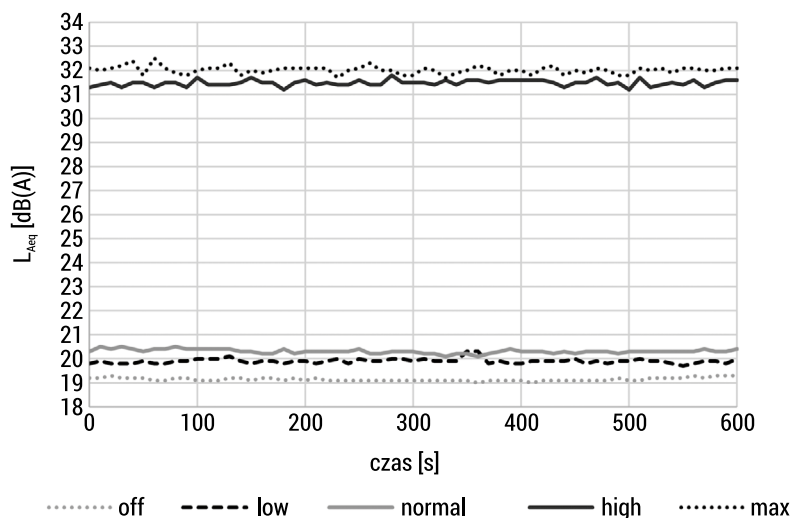
Wyniki badań

Przeprowadzono 5 pomiarów poziomu dźwięku L_{Aeq} w pomieszczeniu dla każdej z nastaw prędkości wentylatora oraz zmierzono temperaturę powietrza T_{in} na stanowisku pracy i temperaturę powietrza wypływającego z anemostatu T_{naw} . Na podstawie pomiarów równoważnego poziomu dźwięku w danym przedziale czasowym obliczono średnią wartość równoważnego poziomu dźwięku dla każdego pomiaru. Uśrednione wartości L_{Aeq} i temperatury są zestawione w tabeli 2. Przykładowy rozkład poziomu dźwięku A w czasie przedstawiono na rysunku 4.

TAB. 2. Uśrednione wartości równoważnego poziomu dźwięku L_{Aeq} i odpowiadająca im temperatura powietrza na stanowisku pracy T_{in} oraz temperatura powietrza nawiewanego T_{naw} dla 5 pomiarów (1–5)

Poziom pracy wentylatora	L_{Aeq}	T_{in}	L_{Aeq}	T_{in}	L_{Aeq}	T_{in}	L_{Aeq}	T_{in}	L_{Aeq}	T_{in}
	dB(A)	°C	dB(A)	°C	dB(A)	°C	dB(A)	°C	dB(A)	°C
	1		2		3		4		5	
OFF	18,9	21,2	19,1	21,2	19,2	21,9	19,1	21,5	19,2	21,5
LOW	20,0	21,0	19,9	21,1	19,7	21,7	20,0	21,1	19,6	21,4
NORMAL	20,5	20,9	20,3	21,0	20,4	21,6	20,6	20,9	20,1	21,3
HIGH	31,5	20,8	31,5	20,8	31,8	21,0	30,9	20,7	31,5	21,1
MAX	32,0	20,7	32,0	20,7	32,3	20,9	31,8	20,6	32,1	21,0
T_{naw} °C	17,9		18,2		18,6		17,5		19,2	

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4. Zmienność równoważnego poziomu dźwięku L_{Aeq} dla różnych nastaw wentylatora (OFF–MAX) – pomiar 2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości wypływającego powietrza z anemostatu dla zmiennej nastawy prędkości wentylatora.

TAB. 3. Prędkość wypływu powietrza z anemostatu v_A dla 5 pomiarów (1–5)

Poziom pracy wentylatora	v_A				
	m/s				
	1	2	3	4	5
OFF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LOW	0,68	0,68	0,64	0,66	0,66
NORMAL	0,95	0,92	0,94	0,94	1,05
HIGH	2,26	2,25	2,32	2,28	2,36
MAX	2,48	2,48	2,44	2,46	2,48

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Oprócz pomiarów z wykorzystaniem mierników przeprowadzono ankietę wśród osób użytkujących pomieszczenie, dla zmiennych nastaw pracy wentylatora. Osoby ankietowane nie wiedziały, jaki poziom pracy wentylatora jest ustawiony w trakcie badania. Pytania dotyczyły subiektywnych odczuć przy pracującej instalacji: uciążliwości hałasu (tabela 4), opisu głośności (tabela 5) oraz odczucia przeciągu (tabela 6).

TAB. 4. Ocena uciążliwości hałasu pochodzącego od instalacji wentylacyjnej na stanowisku pracy

Poziom pracy wentylatora	Ocena uciążliwości hałasu (nieuciążliwy, lekko uciążliwy, umiarkowanie uciążliwy, bardzo uciążliwy, ekstremalnie uciążliwy)	
	osoba 1	osoba 2
OFF	nieuciążliwy	nieuciążliwy
LOW	nieuciążliwy	nieuciążliwy
NORMAL	lekko uciążliwy	nieuciążliwy
HIGH	bardzo uciążliwy	bardzo uciążliwy
MAX	bardzo uciążliwy	bardzo uciążliwy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TAB. 5. Ocena głośności hałasu pochodzącego od instalacji wentylacyjnej na stanowisku pracy

Poziom pracy wentylatora	Ocena głośności hałasu (bardzo cicho, cicho, neutralnie, głośno, bardzo głośno)	
	osoba 1	osoba 2
OFF	bardzo cicho	bardzo cicho
LOW	cicho	cicho
NORMAL	neutralnie	cicho
HIGH	bardzo głośno	głośno
MAX	bardzo głośno	głośno

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TAB. 6. Ocena odczucia przeciągu pochodzącego od instalacji wentylacyjnej na stanowisku pracy

Poziom pracy wentylatora	Ocena przeciągu (brak przeciągu, słaby przeciąg, silny przeciąg)	
	osoba 1	osoba 2
OFF	brak przeciągu	brak przeciągu
LOW	brak przeciągu	brak przeciągu
NORMAL	słaby przeciąg	brak przeciągu
HIGH	silny przeciąg	słaby przeciąg
MAX	silny przeciąg	słaby przeciąg

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Analiza

W Polsce maksymalne dopuszczalne poziomy dźwięku są określone w normie PN-87/B-02156 [14]. Jest to norma, której stosowanie jest wskazane w Rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późn. zm.). W normie tej określone są dopuszczalne poziomy równoważnego poziomu dźwięku pochodzącego od wyposażenia technicznego budynku oraz innych urządzeń. W budynkach mieszkalnych w ciągu dnia dopuszczalny poziom równoważnego poziomu dźwięku to 35 dB(A).

Drugą normą, która jest obowiązująca, ale nieobligatoryjna do stosowania w Polsce, jest norma PN-B-02151-2 [13], w której najwyższy dopuszczalny równoważny poziom dźwięku w ciągu dnia to 25 dB(A).

Równoważny poziom dźwięku przy wyłącznej wentylacji wynosił mniej niż 20 dB(A). Praca wentylatora na niskim i normalnym poziomie spowodowała nieistotny z punktu widzenia pomiarów hałasu wzrost poziomu dźwięku o maksymalnie 1,1 dB(A) dla nastawy wentylatora LOW i o 1,6 dB(A) dla nastawy NORMAL. Jednocześnie temperatura na stanowisku pracy spadła maksymalnie o 0,6 K. Przy nastawie LOW hałas był określany jako nieuciążliwy oraz jako cichy. Nawiew powietrza na poziomie LOW nie powodował uczucia przeciągu. Na poziomie NORMAL, dla którego prędkość wypływu powietrza z anemostatu oscylowała około 1 m/s, hałas był oceniany jako lekko uciążliwy i nieuciążliwy oraz neutralny i cichy. Jedna osoba odczuwała lekki przeciąg.

Poziom dźwięku istotnie wzrasta przy poziomie pracy wentylatora HIGH i MAX, do wartości maksymalnej 31,8 dB(A) przy poziomie HIGH i 32,3 dB(A) przy MAX. Różnice poziomu dźwięku na poziomach HIGH i MAX są nieistotne – maksymalnie o 0,9 dB(A). Hałas na poziomach HIGH i MAX był oceniany jako bardzo uciążliwy oraz głośny i bardzo głośny. Odczuwano słaby i silny przeciąg przy prędkości wypływu powietrza z anemostatu w granicach 2,25–2,48 m/s. Zauważalny jest spadek temperatury w miejscu pracy w stosunku do temperatury powietrza przy wyłączonej wentylacji o 0,4–1 K. Związane jest to z niższą temperaturą powietrza nawiewanego (17,7–19,2°C) w porównaniu z temperaturą powietrza w pomieszczeniu.

Poziom hałasu dla nastawy LOW i NORMAL, który jest najczęściej ustawiany przez mieszkańców, nie przekracza dopuszczalnych wartości określonych w normach PN-87/B-02156 – 35 dB(A) [14] oraz PN-B-02151-2 – 25 dB(A) [13]. Praca wentylatora na poziomie HIGH i MAX powodowała przekroczenie dopuszczalnego poziomu dźwięku wg normy PN-B-02151-2 [13].

Podsumowanie

Wymagania w zakresie dopuszczalnego poziomu dźwięku były spełnione dla nastawy wentylatora, która najczęściej jest ustawiana przez użytkowników, stanowiącej około 33% maksymalnej nastawy wentylatora. Pomimo tego jedna osoba odczuwała lekką uciążliwość działającej wentylacji, związaną z poziomem hałasu i prędkością nawiewanego powietrza.

Oprócz wymagań normatywnych istotne są subiektywne odczucia osób pracujących w pomieszczeniu z wentylacją mechaniczną. Zależą one od wielu czynników: płci, wieku, stanu zdrowia oraz od rodzaju wykonywanej pracy. Odczucia komfortu wśród osób w trakcie pracy wymagającej skupienia są inne niż w przypadku osób wykonujących codzienne czynności w domu, takie jak gotowanie, sprzątanie.

Wpływ na odbiór hałasu ma także poziom tła akustycznego, czyli poziom hałasu przy wyłączonym źródle hałasu. W analizowanym przypadku tło akustyczne miało niski poziom, stąd nawet nieznaczny wzrost poziomu dźwięku o 1–2 dB(A) powodował negatywne odczucia wśród użytkowników pomieszczenia.

Istotne jest to, że wymagania w zakresie dopuszczalnego poziomu dźwięku są obecnie bardziej restrykcyjne niż w latach 80. XX wieku. Związane jest to z coraz większą świadomością negatywnego oddziaływania hałasu na życie i zdrowie człowieka.

W celu ograniczenia negatywnego oddziaływania wentylacji mechanicznej na osobę wykonującą pracę umysłową zaleca się lokalizowanie kratek nawiewnych z dala od miejsca pracy.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WZ/WBiŚ/7/2022 w Katedrze Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

Literatura

- [1] Barclay M., Kang J., Sharples S., *Combining noise mapping and ventilation performance for non-domestic buildings in an urban area*, „Building and Environment” 2012, vol. 52, 68–76.
- [2] Berge M., Georges L., Mathisen H.M., *On the oversupply of heat to bedrooms during winter in highly insulated dwellings with heat recovery ventilation*, „Building and Environment” 2016, vol. 106, 389–401.
- [3] Choi W., Pate M.B., *An evaluation and comparison of two psychoacoustic loudness models used in low-noise ventilation fan testing*, „Building and Environment” 2017, vol. 120, 41–52.
- [4] Choy Y.S., Lau K.T., Wanga C., Chau C.W., Liu Y., Hui D., *Composite panels for reducing noise in air conditioning and ventilation systems*, „Composites: Part B” 2009, vol. 40, 259–266.

- [5] Fan X., Shao H., Sakamoto M., Kuga K., Lan L., Wyon D.P., Ito K., Bivolarova M.P., Liao Ch., Wargocki P., *The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: Pilot measurements in a climate chamber*, „Building and Environment” 2022, vol. 209, 108666.
- [6] *Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought*, Brussels, 22 September 2003, IP/03/1278.
- [7] Krawczyk D.A., Rodero A., Gładyszewska-Fiedoruk K., Gajewski A., *CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates – Measurements and simulations*, „Energy and Buildings” 2016, vol. 129, 491–498.
- [8] Lan L., Sun Y., Wyon D.P., Wargocki P., *Pilot study of the effects of ventilation and ventilation noise on sleep quality in the young and elderly*, „Indoor Air” 2021, vol. 31(6), 2226–2238.
- [9] Lee J., Chang J.D., *Influence on vertical shading device orientation and thickness on the natural ventilation and acoustical performance of a double skin façade*, International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, 2015.
- [10] Mak C.M., *Development of a prediction method for flow-generated noise produced by duct elements in ventilation systems*, „Applied Acoustics” 2002, vol. 63, 81–93.
- [11] Maula H., Hongisto V., Ostman L., Haapakangas A., Koskela H., Hyona J., *The effect of slightly warm temperature on work performance and comfort in open-plan offices – A laboratory study*, „Indoor Air” 2015, vol. 26(2), 286–297.
- [12] Op't Veld P., Passlack-Zwaans C., *IEA ANNEX 27: Evaluation and demonstration of domestic ventilation systems. Assessment on noise*, „Energy and Buildings” 1998, vol. 27, 263–273.
- [13] PN-B-02151-2:2018-01, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [14] PN-B-02156:1987, Akustyka budowlana – Metody pomiaru poziomu dźwięku A w budynkach.
- [15] Shin M.S., Rhee K.N., Lee E.T., Jung G.J., *Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings*, „Building and Environment” 2018, vol. 142, 451–463.
- [16] Teleszewski T.J., Gładyszewska-Fiedoruk K., *Characteristics of humidity in classrooms with stack ventilation and development of calculation models of humidity based on the experiment*, „Journal of Building Engineering” 2020, vol. 31, 101381.
- [17] Varjo J., Hongisto V., Haapakangas A., Maula H., Koskela H., Hyona J., *Simultaneous effects of irrelevant speech, temperature and ventilation rate on performance and satisfaction in open-plan offices*, „Journal of Environmental Psychology” 2015, vol. 44, 16–33.
- [18] World Health Organization, *Burden of disease from environmental noise*, 2011, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf (access data 4.01.2022).
- [19] Załuska M., Gładyszewska-Fiedoruk K., *Regression Model of PM_{2.5} Concentration in a Single-Family House*, „Sustainability” 2020, vol. 12(15), 5952.

lp Politechnika
Białostocka

