



AURA

OCHRONA ŚRODOWISKA

12/25



REDAKTOR NACZELNA:
mgr Jolanta Czudak-Tomaka

SEKRETARZ REDAKCJI:
Marek Tomaka

RADA NAUKOWO-PROGRAMOWA:

dr Badri Gechbaia
dr hab. inż. Agnieszka Generowicz
prof. dr hab. Kazimierz Górka
dr inż. Andrzej Jagusiewicz
dr Tomasz Jeleński
mgr inż. Krzysztof Kamieniecki
prof. dr hab. Iwan Kowalczyk
prof. Viktor Koval
prof. dr hab. inż. Zbigniew Myczkowski
prof. dr hab. Romuald Olaczek
prof. Nikolay Panayotov
prof. dr hab. Lucjan Pawłowski
dr Olga Pylypovych
prof. dr hab. Wojciech Radecki
prof. dr hab. Piotr Skubała
dr hab. Barbara Skwaryło-Bednarz
mgr inż. Tadeusz Trzmiel
prof. dr hab. Tomasz Żylicz

REDAKCJA:

tel. 660 400 468
ul. Ratuszowa 11 p. 733
03-450 Warszawa
www.aura.edu.pl
e-mail: aura@sigma-not.pl

SKŁAD I DRUK:

Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwa
SIGMA-NOT Sp. z o.o.
ul. Popiełuszki 19
01-595 Warszawa
tel. 22 833 40 69
e-mail: drukarnia@sigma-not.pl

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT 

WYDAWCA:

Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych
SIGMA-NOT Sp. z o.o.
ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa
www.sigma-not.pl

REKLAMA:

tel. 22 827 43 65
e-mail: reklama@sigma-not.pl

Okł. 1. Święta, święta, święta!
Fot. Wikipedia

Okł. 2. Uprawa winorośli w gospodarstwie
prowadzonym systemem biodynamicznym.
Fot. Freepik

Okł. 4. Kwitnący czosnek.
Fot. Shutterstock

Wersja pierwotna – papierowa
Artykuły w AURZE są recenzowane
Nakład 1500 egz., w tym wersja elektroniczna

AURA
OCHRONA ŚRODOWISKA

Miesięcznik Naczelnej
Organizacji Technicznej
poświęcony kształtowaniu
i ochronie środowiska

A monthly for the
protection and shaping
of human environment



12/2025

Rok założenia 1973
Indeks 351792

W NUMERZE

- 2 **ZDROWIE Z SADU** - Pigwa pospolita (*Cydonia oblonga Mill*) sadowniczy gatunek o walorach dekoracyjnych i prozdrowotnych - Dariusz Wach
- 4 **ROŚLINA UŻYTKOWA** - Czosnek – naturalna tarcza odporności w zimowych miesiącach - Katarzyna Dzida
- 7 **ZIOŁOLECZNICTWO** - Zielone lekarstwo - Agnieszka Jamiołkowska
- 9 **ZIELONE GODZINY** - Czas letni do poprawki - Piotr Krupa-Lubański
- 11 **OCIEPLENIE KLIMATU** - Prognozy do 2050 roku - Marek Tomaka
- 13 **GOSPODARKA, A PRZYRODA** - W poszukiwaniu przekonujących wyjaśnień - Tomasz Żylicz
- 15 **PRZEMYSŁEĆ PRZYRODĘ NA NOWO** - Wpływ globalnego ocieplenia na produkcję pierwotną: krytyczna rola i zagrożenia dla *Prochlorococcus marinus* - Piotr Skubała
- 17 **ROLNICTWO BIODYNAMICZNE** - Rezyliencja gospodarstw biodynamicznych – wyzwania i szanse - Paweł Bietkowski, Paweł Pietruszewski
- 19 **MIKROORGANIZMY METANOGENNE** - Biogazyfikacja złoża węgla brunatnego – badania eksperymentalne przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego w kontekście neokarbonizacji - Grzegorz Wałowski
- 25 **UPRAWA ZBÓŻ** - Emisje gazów cieplarnianych i amoniaku w modelowych technologiach uprawy zbóż jarych i ozimych – kontynuacja badań - Anita Konieczna



Szanowni Państwo, Drodzy Czytelnicy!

życzę zdrowych, radosnych,
pełnych bliskości i rodzinnego ciepła
Świąt Bożego Narodzenia.
Niech pomysłowość, uśmiech i optymizm
towarzyszą Państwu każdego dnia,
a Nowy Rok 2026 przyniesie dużo uśmiechu,
szczęścia i pozytywnej energii
w życiu osobistym i zawodowym.
Bardzo dziękuję wszystkim
Autorom i Partnerom „AURY”
za dotychczasową współpracę.

Jolanta Czudak-Tomaka

Dr Dariusz WACH
Instytut Produkcji Ogrodniczej,
Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ORCID 0000-0001-6041-5695

Pigwa pospolita (*Cydoniaoblonga* Mill) sadowniczy gatunek o walorach dekoracyjnych i prozdrowotnych

Pigwa pospolita (*Cydoniaoblonga* Mill) - a fruit-growing species with ornamental
and health-promoting properties

Pigwa pospolita jest w Polsce wciąż niedocenianym amatorskim gatunkiem sadowniczym znanym z wysokich walorów użytkowych owoców, chętnie wykorzystywanym w celach kulinarnych za sprawą bogactwa związków organicznych i mineralnych. Owoce pigwy i produkty z niej wytwarzane mają wysoką wartość biologiczną i są stosowane do wspomagania leczenia a także w profilaktyce zdrowotnej. W agroekosystemie jest składnikiem bioróżnorodności gatunkowej i urozmaicheniem pożytku dla owadów zapylających. Jest także urozmaicheniem krajobrazu dzięki walorom dekoracyjnym. Pigwa pospolita jako gatunek o wyższych wymaganiach cieplnych może zyskać większe znaczenie w warunkach ocieplającego się klimatu.

Słowa kluczowe: owoce pigwy, wartość biologiczna, właściwości lecznicze, zawartość związków bioaktywnych, aktywność antyoksydacyjna

Pigwa pospolita (*Cydoniaoblonga* Mill.) należy rodziny różowatych (*Rosaceae*), pochodzi z basenu Morza Śródziemnego, Azji Mniejszej, Kaukazu. Łacińska nazwa pochodzi od miasta Cydon na Krecie, gdzie była znana i uprawiana już w starożytności [8]. W obrębie gatunku pigwa pospolita występują dwie formy *C. oblongasubsp. pyriformis* – o owocach gruszkowatych i *C. oblongasubsp. maliformis* – o owocach jabłkowatych [14]. W Polsce pigwa pospolita jest amatorskim gatunkiem sadowniczym a także drzewkiem ozdobnym. Można ją spotkać w parkach, jak również w amatorskich ogrodach [3].

Morfologia roślin. Pigwa jest krzewem lub drzewem dorastającym do 6-8 m wysokości. Kwiaty podobne do kwiatów jabłoni są 5-płatkowe, średnicy 4-5 cm, barwy lekko różowej lub białej, z niezrośniętymi szyjkami słupków oraz 15-25 pręcikami. Osadzone są pojedynczo na ulistnionych, bocznych, krótkich pędach kwiatostanowych. Kwiaty rozwijają się później niż liście i są w znacznej większości obcypylne, zapylane przez różne gatunki pszczoł, trzmieci i inne zapylacze. W sadzie i ogrodzie zwiększają bioróżnorodność owadziego pożytku. Kwitnie-

nie przypada w maju i na początku czerwca [14]. Pigwa pospolita jest samosterylna i nie zapyla się własnym pyłkiem, choć niektóre odmiany uprawne są częściowo samopłodne [5]. Owoce form dzikich są małe o średnicy 2,5-3,5 cm. Odmiany uprawnych mają owoce dorastające do 15 cm kształtu gruszkowatego (Bereczki, Vranja, Champion) lub jabłkowatego (Konstantynopol, Ursynowska, Leskovac). Początkowo pokryte są kutnerem – wełnistym i ścieralnym nalotem, po dojrzewaniu cytrynowo-



Owoce pigwy używa się w kuchni do przyrządzania kompotów, soków, nektarów, przecierów, konfitur, powideł, dżemów, marmolad i galaretek.
Fot. Wikipedia

Quince is still an underappreciated amateur fruit plant in Poland, known for its high utility value and often used for culinary purposes due to its rich organic and mineral content. Quince fruit and products derived from it have high biological value and are used to support medical treatment and preventative health care. In the agro-ecosystem, it contributes to species biodiversity and enriches the habitat of pollinating insects. It also enhances the landscape thanks to its ornamental value. As a species with higher thermal requirements, quince may become increasingly important in a warming climate.

Keywords: quince fruit, biological value, bioactive compound content; antioxidant activity

żółte, pachnące, nagie z dużymi działkami kielicha na wierzchołkach, bardzo twarde. Są silnie aromatyczne, a w miąższu, który jest cierpki, słodki ale mało soczysty, występują liczne komórki kamienne oraz jasnobrunatne nasiona [2]. W Polsce owoce pigwy dojrzewają dopiero pod koniec października, a w zimne lata w ogóle nie dojrzewają na drzewie, dochodzą do pełnej dojrzałości przetrzymane przez 2-3 tygodnie w pomieszczeniach. Przechowują się dobrze przez długi czas [4].

Walory dekoracyjne. Pigwa pospolita ma walory dekoracyjne. Kora pigwy łuszczy się w charakterystyczny sposób porównywalny do platana klonolistnego, co jest jedną z cech ozdobnych tego gatunku. Młode pędy i związki owoców pokryte są wełnistym, szarym nalotem – kutnerem, który łatwo daje się zetrzeć. Szarawozielone liście długości 8-10 cm są szeroko jajowate, całobrzegie. Występują u nich duże i ząbkowane przylistki z gruczołowatymi nektarnikami, które opadają wraz z przekwitaniem kwiatów. Obficie kwitnące rośliny dają bardzo ładny efekt, a duże kwiaty są dobrze widoczne. Liście jesienią przebarwiają się na żółty kolor [11].

Wartość odżywcza i zdrowotna owoców pigwy pospolitej. Pigwa pospolita jest cennym dla zdrowia gatunkiem ze względu na występowanie w jej owocach dużej ilości składników organicznych i mineralnych. Owoce te są bogate w cukry, pektyny, garbniki, błonnik i witaminy – A, C oraz z grupy B (9). Owoce pigwy pospolitej zawierają dużo biologicznie aktywnych substancji, które wpływają bardzo korzystnie na organizm człowieka. Kształt owoców pigwy nie wpływa ich skład chemiczny. W zależności od warunków i miejsca uprawy oraz okresu wegetacji owoce zawierają: 19-29% suchej masy, 4,8-12,6% cukrów (w tym: 5,97-9,28% fruktozy, 2,77-3,31% glukozy, 1,16-2,58% sacharozy), 1,5-5% kwasów organicznych (jabłkowego, winowego i cytrynowego), 0,33% pektyn, 12-32 mg% kwasu askorbinowego, 250-2280 mg% związków polifenolowych, 0,11-0,5 mg% karotenoidów, 86-102 mg/kg olejków eterycznych, które nadają owocom miły zapach. Pigwy zawierają około 1,5% s.m. składników mineralnych takich jak fosfor, wapń, potas, magnez oraz 30 mg/kg żelaza i 1,4 mg/kg miedzi [3]. Pektyny, garbniki, witaminy i aromatyczne estry zawarte są głównie w skórce [12].

Właściwości lecznicze. Pigwa znana jest z licznych właściwości terapeutycznych, w tym działania antyoksydacyjnego, przeciwzapalnego, przeciwbakteryjnego, przeciwrzodowego i przeciwnowotworowego [1, 13]. Działanie antyoksydacyjne tego owocu wynika z obecności substancji polifenolowych takich jak flawonoidy, kwercetyna, rutyna, kemferol [12]. W tkankach pigwy zidentyfikowano 26 związków polifenolowych [15]. Surowcem leczniczym są owoce i nasiona, z których napar stosowany jest jako dodatek do kremów stosowanych przy opuchnięciach, liszajach, oparzeniach, wrzodach i stanach zapalnych [10]. Poza bardzo dobrymi walorami smakowymi owoce a właściwie wyciągi z owoców pigwy mają zastosowanie jako lek przeciwanemiczny ze względu na żelazo. Lecznicze znaczenie mają nasiona pigwy, które moczone w wodzie obficie wydzielają śluz. Zalecany jest przede wszystkim przy kaszlu, w stanach zapalnych górnych dróg oddechowych, żołądka i jelit [7]. Owoce spożywane na surowo też są bardzo cenne, ponieważ zapobiegają biegunkom, pobudzają apetyt i regulują procesy trawienia [10]. W Japonii stosuje się pigwę w leczeniu i profilaktyce miażdżycy i nadciśnienia, przy zatruciach metalami ciężkimi i w chorobie popromiennej [16]. Preparaty galenowe stosuje się jako tonizujące pracę jelit oraz w leczeniu chorób serca.

Kulinarne wykorzystanie. Twarde owoce pigwy przeważnie nie nadają się do bezpośredniego spożycia, są natomiast doskonałym surowcem na różnego rodzaju przetwory dzięki



Kwitnące drzewka pigwy. Pigwa ma kwiaty podobne do kwiatów jabłoni.
Fot. Freepik



Owoce pigwy są stosowane w profilaktyce miażdżycy i nadciśnienia a także przy zatruciach metalami ciężkimi.
Fot. 123RF

wysokiej zawartości pektyn i jej twardości [1, 6]. Odmiany deserowe, nadające się do spożycia na surowo uprawiane są głównie na Bałkanach i Peru. Owoce pigwy z powodzeniem używa się w kuchni do przyrządzania kompotów, soków, nektarów, przecierów, konfitur, powideł, dżemów, marmolad i galaretek. Nadają się do suszenia jak jabłka czy gruszki. Służą jako dodatek do sałatek. Po upieczeniu lub ugotowaniu są doskonałym dodatkiem do dań mięsnych i ziołowych. Łączą się z alkoholem dając silnie aromatyczne wódki i nalewki tzw. pigwówki. Napar z liści pigwy z powodzeniem zastępuje herbatę [3].

Dzięki zawartości aromatycznych estrów owoce wykorzystuje się jak odświeżacz powietrza aby wkładając je do komód i szaf, nadać ubraniom piękny zapach. Pigwa również skutecznie odstrasza mole [8]. Nasiona znajdują także zastosowanie w przemyśle perfumeryjnym i kosmetycznym. Śluz z nasion służy jako środek do nadawania tkaninom połysku w przemyśle włókienniczym.

Literatura

[1] Al-Zughbi P, Krayem M. 2022. Quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.) nutritional composition, antioxidative properties, health benefits and consumers preferences towards some industrial quince products: A review. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133362>

[2] Grochowski B., 1997. Pigwa pospolita. Wiadomości Zielarskie nr 7-8.

[3] Kawecki Z., Łojko R., Piłarek B., 2001. Mało znane rośliny sadownicze. Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.

[4] Mika A., 1994. Owoce dla amatorów. Wyd. Krajowa Rada Polskiego Związku Działkowców, Warszawa.

[5] Mika A., 2004. Krzewy owocowe. Wyd. Multico, Warszawa.

[6] Najman K., Adrian S., Hallmann E., Sadowska A., Buczak K., Waszkiewicz-Robak B. Szterk A. 2023. Effect of Various Drying Methods on Physicochemical and Bioactive Properties of Quince Fruit (*Cydonia oblonga* Mill.). Agriculture, 13, 446. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020446>

[7] Pajor W.J., 2000. Owoce - jak się nimi leczyć? Pigwa pospolita. Zdrowa Żywność - Zdrowy Styl Życia nr 3.

[8] Pieniążek Sz. A., 2000 (red.). Sadownictwo. PWRiL Warszawa, wyd. XI.

[9] Rop O., Balik J., Reznicek V., Jurikova T., Skardova P., Salas P., Sochor J., Micek J., Kramarova D., 2011. Chemical characteristics of fruits of some selected quince (*Cydonia oblonga* Mill.) cultivars. 1: 65-73.

[10] Sarwa A. 2013. Wielka encyklopedia roślin leczniczych. Armoryka: Sandomierz, Poland, s. 154-156.

[11] Seneta W., Dolatowski J., 2008. Dendrologia. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.

[12] Silva B.M., Andrade P.B., Gonçalves A.C., Seabra R.M., Oliveira M.B., Ferreira M.A. 2004. Influence of jam processing upon the contents of phenolics, organic acids and free amino acids in quince fruit (*Cydonia oblonga* Miller). Eur. Food Res. Technol., 218, 385-389.

[13] Silva B.M., Andrade P.B., Martins R.C. Valentão P., Ferreres F., Seabra R.M., Ferreira M.A. 2005. Quince (*Cydonia oblonga* Miller) fruit characterization using principal component analysis. J. Agric. Food Chem., 53, 111-122.

[14] Szot I., Michalski P., Szot P., Krawiec P., Lipa T. 2017. Mało znane gatunki drzew i krzewów owocowych z rodziny różowatych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.

[15] Wojdyło A., Oszmiański J., Bielicki P. 2013. Polyphenolic composition, antioxidant activity, and polyphenol oxidase (PPO) activity of quince (*Cydonia oblonga* Miller) varieties. J. Agric. Food Chem. 61, 2762-2772.

[16] Yasonauri H., Takanori I., Chihiro K., Miho I., Kohzy H. 2006. Antioxidant and Antilcerative Properties of Phenolics from Chinese Quince, Quince, and Apple Fruits. J. Agric. Food Chem., 54, 3, 765-772

Dr hab. inż. Katarzyna DZIDA
Instytut Produkcji Ogrodniczej,
Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ORCID 0000-0002-5337-7931

Czosnek – naturalna tarcza odporności w zimowych miesiącach

Garlic – a natural shield of immunity in the winter months

Wzrost zainteresowania zdrową żywnością spowodował, że od kilku lat wzrasta zapotrzebowanie na żywność funkcjonalną, w skład której wchodzi naturalne produkty posiadające unikalną wartość odżywczą oraz składniki pokarmowe, które wywołują korzystne efekty zdrowotne. Do takich produktów można zaliczyć czosnek, który wykazuje prewencję wielu chorób cywilizacyjnych. Czosnek jest niezwykle bogatym surowcem w różnorodne substancje biologicznie czynne, które wykazują istotny wpływ na przemiany wewnątrzkomórkowe. Badania wykazały, iż czosnek posiada właściwości przeciwbakteryjne, przeciwwirusowe, przeciwgrzybicze, przeciwzapalne, przeciwzakrzepowe, a także przeciwnowotworowe.

Słowa kluczowe: czosnek pospolity, skład chemiczny, zastosowanie, właściwości

Czosnek pospolity (*Alliumsativum* L.) jest bardzo znanym i cenionym warzywem zarówno w Polsce, jak i na świecie [11]. Jest jedną z najstarszych roślin uprawnych, a jego historia sięga III w. p.n.e. [2]. Po raz pierwszy został odnaleziony w Azji Środkowej. Z czasem został przewieziony do Azji Zachodniej, Europy Południowej, a następnie do Europy Środkowej, gdzie jest powszechnie uprawiany [18]. Do Polski dotarł w okresie średniowiecza, przywieziony został przez tatarskich kupców [1]. Dzisiaj uprawia się go w przydomowych ogródkach i na wielohektarowych powierzchniach [11]. Największymi światowymi producentami są: Chiny, Egipt, Indie i Hiszpania [1]. Mimo znacznych ilości jakie Polska jest w stanie wyprodukować, nie pokrywa zapotrzebowania w kraju na ten surowiec, dlatego konieczny jest import czosnku z takich państw jak Chiny, Hiszpania czy Chorwacja. Niestety zdarza się często, że czosnek sprowadzany z odległych stron świata różni się znacząco od czosnku krajowego. W związku z czym ważne jest, aby sięgać po rodzime warzywa wolne od szkodliwych związków i zbędnych dodatków. Innym ważnym aspektem, dla którego warto sięgać po czosnek, są



Fot. 1. Czosnek odmiany Jarus. Fot. Wikipedia

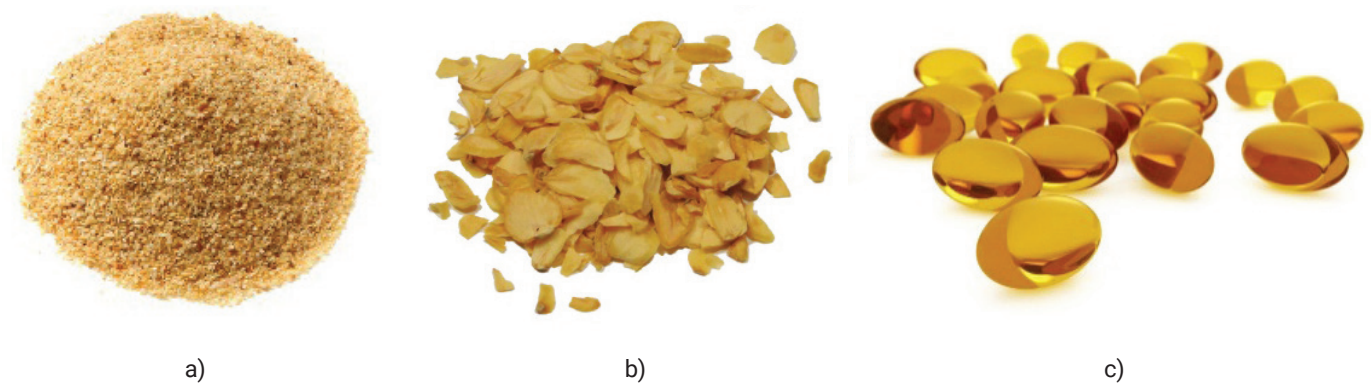
jego cenne właściwości zdrowotne. W swoim składzie posiada ważne dla organizmu człowieka witaminy z grupy B, witaminę C, allicynę, potas, magnez, żelazo i wiele innych substancji. Z tego względu, że jest tak bogaty w składniki odżywcze i substancje lecznicze, nazywa się go naturalnym antybiotykiem [2]. Prozdrowotne działanie czosnku pospolitego zachęca do jego spożycia coraz większą grupę osób.

Opis botaniczny *Alliumsativum* L.
Czosnek pospolity – *Alliumsativum* L. należy do rodziny amarylkowatych (Ama-

The growing interest in healthy eating has led to a growing demand for functional foods in recent years, including natural products with unique nutritional value and nutrients that can have beneficial health benefits. Garlic is one such product, which have been shown to prevent many lifestyle diseases. Garlic is an exceptionally rich source of various biologically active substances that significantly influence intracellular metabolism. Studies have shown that garlic possesses antibacterial, antiviral, antifungal, anti-inflammatory, antithrombotic, and antioxidant properties.

Keywords: garlic, chemical composition, uses, properties

ryllidaceae), dawniej zaliczany rodziny czosnkowatych (Alliaceae) lub liliowatych (Liliaceae), wśród której znajdują się także cebula (*A. cepa* L.), szalotka (*A. asacloncum* L.), czosnek niedźwiedzi (*A. ursinum* L.) czy szczypiorek (*A. schoenoprasum* L.) [23]. Nazwa gatunku *Alliumsativum* wywodzi się od celtyckich i łacińskich słów, *allo* oznacza ostry lub piekący, natomiast *sativum* z łaciny znaczy uprawny [35]. Czosnek pospolity to bylina dorastająca do 90 cm wysokości o dosyć płytkim wiązkowym systemie korzeniowym, wyrastającym z piętki [5]. Korzenie przybyszowe sięgają maksymalnie 30 cm w głąb ziemi oraz osiągają szerokość nieprzekraczającą 20 cm. Część podziemna czyli główka składa się z pojedynczych ząbków. Całość otoczona jest wielowarstwową łuską, która chroni cebulę przed rozpadaniem się oraz w czasie przechowywania ogranicza wysychanie. Liczba ząbków w główce różni się w zależności od odmiany. Najmniej ząbków posiada odmiana „Mega”, natomiast największą liczbą ząbków wyróżnia się „Cyryl”. Jeśli jest ich mniej zazwyczaj są one większe. Różnice odmianowe warunkują także sposób ułożenia ząbków w cebuli. Mogą być one umiejscowione nieregularnie lub jak w przypadku odmia-



Fot. 2. Czosnek w postaci: a) granulowanej, b) płatków, c) kapsułek.

Fot. Wikipedia

ny „Jarus” ułożone są okółkowo. Z cebuli wyrastają ciemno-zielone, płaskie, długie, o szerokości około 1 cm liście [14].

Przegląd odmian

Charakterystykę najważniejszych cech czosnku, głównych odmian uprawianych w Polsce, zamieszczono w tabeli 1. Odmiany czosnku różnią się przede wszystkim terminem sadzenia. Wyróżnia się odmiany ozime czyli sadzone jesienią oraz jare, które wysadzane są do gleby wczesną wiosną. Ponadto czosnek może być strzałkujący lub niestrzałkujący. Obie grupy różnią się tym, że czosnek strzałkujący w przeciwieństwie do niestrzałkującego wytwarza pędy kwiatostanowe oraz cebulki powietrzne. Odmiana „Jarus” należy do grupy odmian niestrzałkujących. Tworzy dosyć małe główki o masie nieprzekraczającej 40 g. Liczba ząbków w główce wynosi od 7 do 12 sztuk. Ze względu na doskonały smak, aromat i cenne substancje zdrowotne jest bardzo chętnie wykorzystywany zarówno w kuchni, jak i w farmaceutyce [12].

Skład chemiczny

Świeża masa ząbków czosnku składa się przede wszystkim z wody (ok. 65%) oraz związków takich jak węglowodany (ok. 28%), organiczne związki siarki (2,3%) czy białka (2%) oraz wolne aminokwasy (1,2%, np. cysteina, metionina, arginina) [4, 37]. Zawiera także wiele składników mineralnych, wśród których należy wyróżnić: potas, fosfor, mangan, żelazo i selen. Ponadto posiada w swoim składzie witaminę C, witaminy z grupy B oraz flawonoidy i kwasy fenolowe [3, 32]. Zawartość organicznych związków siarki zależy od tego, w jakiej postaci występuje czosnek, w przypadku ząbków nienaruszonych występują głównie sulfotlenki cysteiny i γ-glutamylcysteina, a w czosnku, który uległ zmiążdżeniu, allina ulega przekształceniu do allicyny w obecności enzymu allinazy [20]. Charakterystyczny zapach i smak czosnku uzależniony jest od zawartości allicyny, która wykazuje szerokie działanie prozdrowotne [30, 40]. Allicyna natomiast przekształ-

ca się w siarczki i disiarczki diallilu oraz w ajoen [26].

Zastosowanie

Prozdrowotne działanie czosnku poznano już w starożytności. Spożywano go głównie w naturalnej formie. Obecnie na rynku surowiec czosnku dostępny jest w różnych postaciach, np. mielonej, granulowanej, w postaci płatków, jak również jako olejki, wyciągi czy soki. Mnogość produktów oferowanych w sprzedaży świadczy o popularności tego warzywa. Jest wykorzystywany w wielu gałęziach przemysłu jako lekarstwo czy przyprawa (fot. 2).

Stanowi doskonały dodatek do wyrobów mięsnych, zup i pikantnych potraw. W Azji popularność zyskał także czarny czosnek, który pod wpływem wysokiej temperatury i działania fermentacji nabiera ciemnej barwy [8, 24]. Czarny czosnek dodawany jest do napojów energetyzujących, a nawet lodów i czekolad [9, 10].

Ze względu na właściwości lecznicze czosnek wykorzystywany jest jako lekar-

Tabela 1. Charakterystyka porównawcza najważniejszych odmian czosnku [39, 14].

Odmiana	Typ	Pęd kwiatostanowy	Barwa łuski okrywającej	Wielkość główki	Liczba ząbków w główce	Ułożenie ząbków	Barwa łuski okrywającej ząbki
Arkus	ozimy	tak	fioletowa	średnia	5-6	pierścieniowe	fioletowa do brązowej
Harnaś	ozimy	tak	biała	duża (60-80 g)	8-13	promieniste	fioletowa
Huzar	ozimy	nie	szara	mała lub średnia		nieregularne	jasnokremowa
Mega	ozimy	tak	biała	średnia	5	pierścieniowe	jasnofioletowa
Zawrat	ozimy	tak	białoczerwona	duża		pierścieniowe	jasnobrązowa
Cyryl	jary	nie	biała	mała	do 20	regularne	różowo-brązowa
Jarus	jary	nie	biała	mała	7-12	regularne	beżowa

Prof. dr hab. Agnieszka JAMIOŁKOWSKA
Katedra Ochrony Roślin,
Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ORCID 0000-0003-4121-5318

stwo przeciwko infekcjom [27]. Jego mechanizm działania polega na podwyższeniu odporności poprzez aktywację takich czynników jak fagocyty, które wchłaniają nieprzyjazne dla człowieka patogeny [2]. Czosnek posiada właściwości przeciwwirusowe, m.in. przeciwko wirusowi grypy typu A i B czy rotawirusom [34] oraz antyoksydacyjne [31]. Substancje zawarte w czosnku przeciwdziałają problemom z układem trawiennym [29], jak również w przypadku problemów z krążeniem krwi [36]. Badania wskazują, że zapobiega utlenianiu się tłuszczów we krwi, a tym samym hamuje przywieranie ich do ścianek żył. Zawarte w nim glikozydy steroidowe powodują, że czosnek jest naturalnym lekarstwem naskórowym oraz antygrzybiczym. Obniża poziom homocysteiny, który jest wskaźnikiem informującym o zachorowaniu na miażdżycę [2].

Według Koshfi i Olson [19] czosnek pospolity jest naturalnym i bogatym źródłem siarkowodoru (H2S), który wykazuje wiele właściwości leczniczych. Siarkowodór produkowany jest m.in. z allicyny i jej pochodnych: dwusiarczku diallilu i trisiarczku diallilu. Ponadto substratami do produkcji H2S są różne pochodne cysteiny. Czosnek w układzie sercowo-naczyniowym wykazuje działanie przeciwmiażdżycowe, antyoksydacyjne, zapobiega hiperlipidemii oraz agregacji płytek krwi.

Według przeprowadzonych badań stwierdzono, że czosnek to doskonały antybiotyk [22], który skutecznie leczy zakażenia groźnymi bakteriami *Helicobacter pylori* [28], *Bacillus anthracis* oraz *Escherichia coli* O157 [33]. Zakażenie bakterią *Helicobacter pylori* objawia się problemami pokarmowymi, chorobami żołądka i dwunastnicy [7]. Ponadto czosnek korzystnie wpływa na walkę z pasożytami organizmu [25], używa się go do odtrucia organizmu po zażyciu szkodliwej dawki ołowiu [21], a także posiada działanie antynowotworowe [13]. Wykazano, że ekstrakt z czosnku hamuje rozwój raka piersi, raka pęcherza moczowego, jelita grubego, przełyku, żołądka i płuc. Spożywany w formie naturalnej zwiększa aktywność komórek odpornościowych, natomiast związki czosnku wstrzyknięte w miejsce zainfekowane nowotworem powodują aktywację przeciwciał [2].

Bezpieczną dawką do spożycia jest jeden ząbek czosnku (ok. 4 g) w ciągu doby. Przeciwskazaniem do przyjmowania czosnku i preparatów czosnkowych jest

alergia, stosowane leki rozrzedzające krew oraz planowane zabiegi operacyjne [37].

Podsumowanie

Czosnek jest ogólnie dostępnym surowcem zielarskim, który można pozyskać z uprawy lub zakupić w sklepie. Najczęściej używa się go w okresie jesienno-zimowym, w czasie nasilenia infekcji górnych dróg oddechowych, przy spadku odporności. Na podstawie licznych dowodów naukowych surowiec czosnku pospolitego zalicza się do obniżających stężenie lipidów czy węglowodanów we krwi. Charakteryzuje się również działaniem przeciwzapalnym. Najlepsze efekty w profilaktyce chorób dietozależnych (miażdżyca, cukrzyca) można osiągnąć poprzez włączenie czosnku do codziennej diety.

Literatura

[1] Adamczewska-Sowińska K., 2000. Polowa uprawa warzyw. Szczecin, BRASIKA.
[2] Amagase H., Petesch B.L., Matsuura H., Kasuga S., Itakura Y., 2001. Intake of Garlic and Its Bioactive Components. J. Nutrition. 131, 3, 955-962.
[3] Babatunde F. E., Mofoke A. L. E., Udom G. N., Mohammed G. U., 2009. Influence of nutrient source on the elemental composition of irrigated garlic. J.Tropical Agriculture 8(1): 45-50
[4] Banach K., Rutkowska B., Glibowski P., 2017. Polska „superżywność” w prewencji chorób nowotworowych. Bromat. Chem. Toksykol. – L, 2, 106-114.
[5] Buchwald W., Dedio I., Szczygiewska D., 2000. Rośliny zielarskie w apteczce domowej i kuchni. Wiad. Ziel. 11: 14-15.
[6] Bratman S., 2000. Your Complete Guide to Herbs. Prima Publishing. California.
[7] Brown L., 2000. *Helicobacter pylori*: epidemiology and routes of transmission. Epidemiologic Reviews. 22(2): 283-297.
[8] Choi I.S., Cha H.S., Lee Y.S., 2014. Physicochemical and antioxidant properties of black garlic. Molecules, 19(10), 16811-16823.
[9] Czerwińska D., 2006. Dwa ząbki dziennie. Przegląd Gastronomiczny, 60(12): 12-13.
[10] Czerwińska D., 2011. Antidotum na zły smak. Przegląd Gastronomiczny, 1: 6-7.
[11] Doruchowski R., 2006. Warto uprawiać czosnek. Warszawa, HORTPRESS Sp. z o. o.
[12] Golian J.2021. Metodyka integrowanej ochrony czosnku. Materiały dla producentów Instytut Ogrodnictwa, Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach.
[13] Grajek W., 2004. Rola przeciwwutleniaczy w zmniejszeniu ryzyka wystąpienia nowotworów i chorób układu krążenia. Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 1(38): 3-11.
[14] <https://doi.org/10.12775/HERB.2025.005>
[15] <https://stonecreekhealthessentials.com/products/garlic-odorless-gel-caps>
[16] <https://www.google.com/search?q=garlic+granules&sc>
[17] <https://www.naturalexpert.pl/czosnek-suszony-w-platkach-1kg-p-1881.html>;

[18] Kania-Dobrowolska M., Baraniak J., Górská A., Wolek M., Bogacz A., 2020. Imbir i czosnek – surowce roślinne obniżające poziom cholesterolu i glukozy. Post. Fitoter. 21(3), 169-176.
[19] Kashfi K., Olson K. R., 2002. Biology and therapeutic potential of hydrogen sulfide and hydrogen sulfide-releasing chimeras. Biochem. Pharmacol. 85, 689–703.
[20] Kędzia A., 2009. Olejek czosnkowy – skład chemiczny, działanie farmakologiczne i lecznicze. Postępy Fitoterapii, 3: 198-203.
[21] Khan MSH., Mostofa M., 2008. Effect of garlic and vitamin B-complex in lead acetate induced toxicities in mice. Bangladesh. J. Vet Med. 6(2), 203-210.
[22] Khorshed A., Obydul H., Shahab U., 2016. Medicinal plant *Allium sativum*. J. Medicinal Plants Studies, 4(6): 72-79
[23] Kilgori M. J., Magaji M. D., Yakubu A. I., 2007. Productivity of Two Garlic cultivars as affected by different levels of nitrogenous and phosphorous fertilizers in Sokoto, Nigeria. American-Eurasian J. Agric & Environ. Sci., 2(2): 158-162
[24] Kimura S., Tung Y.C., Pan M.H., Su N.W., Lai Y.J., Cheng K.C., 2017. Black garlic: A critical review of its production, bioactivity and application. J. Food Drug Analysis, 25(1): 62-70
[25] Kwiecień M., Winiarska-Mieczan A., 2011. Czosnek jako zioło kształtujące właściwości prozdrowotne. Problem. Hig. Epidemiol., 92(4): 810-812.
[26] Lis I., 2013. Zastosowanie czosnku w profilaktyce chorób układu sercowo naczyniowego. Via Medica. 4(4), 210-215.
[27] Lutomski J., 2000. Właściwości lecznicze czosnku. Wiad. Ziel.,42(2): 15-17.
[28] Lutomski J., 2001. Fascynacja czosnkiem – wczoraj i dziś. Postępy Fitoterapii, 5: 7- 14.
[29] Majewska T., 2005. Siła działania czosnku. Indyk Polski, 12-17.
[30] Omer S.H., Al-Wabel N.A., 2010. Organosulfur compounds and possible mechanism of garlic in cancer. Saudi Pharmaceut. J. 18, 51-58.
[31] Rahman M.M., Fazlic V., Saad N.W., 2012. Antioxidant properties of raw garlic. Inter.Food Research Journal, 19(2): 589-591
[32] Re R., 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biol. Med., 26(9-10): 1231-123.7
[33] Sasaki J., 2006. Bioactive phytocompounds and products traditionally used in Japan. ModernPhytomedicine. Weinheim. 79-96
[34] Singh V.K, Singh D.K, 2008. Pharmacological effects of garlic (*Allium sativum* L.). Annal Review of Biomedical Sciences 10, 6-26.
[35] Steinbrich J., 1993. Czosnek – skuteczny lek i cenna przyprawa. Wiad. Ziel. 4: 5-7
[36] Świderski F., 2007. Bioactive substances of garlic and their role in dietoprophyllaxis and dietotherapy. Roczn. Państ. Zakł. Hig.,58(1): 41-46.
[37] Tadeusiewicz J., Krysztofiak A., Olas B., 2014. Czosnek – panaceum na choroby układu krążenia. KOSMOS Problemy Nauk Biologicznych, 63/1 (302), 37-44.
[38] Wierzbicka B., Martyniak-Przybyszewska B., 2003. Biologia i odmianoznawstwo roślin warzywnych. Olsztyn, Wyd. Uniw. Warmińsko-Mazurski.
[39] www.rynek-rolny.pl/artukul/czosnek-jarus/
[40] Zaremba Ł., 2018. Czosnek – warzywo z przyszłością? Hasło Ogrodnicze, 50-53.

Zielone lekarstwo

Green medicine

Moringa olejodajna jest ważną rośliną ziołową pochodzącą z północno-zachodnich Indii i Pakistanu. W czasach starożytnych stosowana była w ziołolecznictwie jako środek w leczeniu bezsenności, ran, bólu, wrzodów, chorób wątroby, chorób serca i stanów zapalnych. Najnowsze badania farmakologiczne wykazały, że różne wyciągi z *M. oleifera* wykazują działanie przeciwdrobnoustrojowe, przeciwzapalne, antyoksydacyjne, przeciwnowotworowe i wspomagające płodność. Moringa zawiera wiele ważnych witamin i minerałów i jest również cenionym składnikiem kosmetyków ze względu na właściwości przeciwzapalne i nawilżające, a jej olej jest stosowany w produktach do pielęgnacji skóry i włosów.

Słowa kluczowe: Moringa olejodajna, roślina ziołowa, ziołolecznictwo, działanie przeciwzapalne, działanie antyoksydacyjne, działanie przeciwdrobnoustrojowe, działanie przeciwnowotworowe, wspomaganie płodności, pielęgnacja skóry i włosów

Moringa olejodajna (*Moringa oleifera*) znana również jako „drzewo życia” lub „cudowne drzewo”, jest klasyfikowana jako ważna roślina ziołowa ze względu na jej ogromne korzyści lecznicze i niemedyczne. Jej historia sięga 150 r. p.n.e., kiedy to twierdzono, że monarchowie spożywali jej liście i owoce, aby zachować czujność umysłową i zdrową skórę. Donoszono również, że starożytni wojownicy mauretańscy pili ekstrakt z liści *M. oleifera* jako eliksir na dodatkową energię i w celu uśmierzania bólu podczas wojny. Drzewo to pochodzi z regionu subhimalajskiego na północy Indii, Pakistanu, Afryki, Azji Mniejszej i Arabii, gdzie jego różne części były i nadal są wykorzystywane jako żywność i lek. Obecnie jest uprawiane we wszystkich tropikalnych i subtropikalnych regionach świata. Drzewo dorasta do 10 metrów wysokości, ma luźną, opadającą koronę i liście o eliptycznym kształcie. Wytwarza białe kwiaty zebrane w wiechy oraz zielone, długie strąki (Fot.1). Jest odporne na suszę, ale źle znosi mróz, a jego korzenie mają smak przypominający chrzan.

Już od czasów starożytnych ludzie na całym świecie włączali *M. oleifera* do swojej diety. Tradycyjnie roślina jest stosowana w leczeniu ran, bólu, wrzodów, chorób w



Fot. 1. Moringa olejodajna (*M. oleifera*)

Fot. Wikipedia

troby, chorób serca, nowotworów i stanów zapalnych. Leki wytwarzane z tej rośliny mają etnomedyczne właściwości leczenia chorób i były stosowane od wieków. Każda część rośliny (liść, strąk, kora, guma, kwiat, nasiona, olej nasion i korzeń) była wykorzystywana w medycynie do leczenia różnych chorób. Liście były przydatne dla pacjentów cierpiących na bezsenność i leczenie ran,

a w starożytnym Egipcie prawdopodobnie używano jej do przygotowywania maści skórnych. Obecnie Moringa wykorzystywana jest również w szerokim zakresie fitofarmaceutycznym. Okłady z liści są lekarstwem na stany zapalne (zapalenie gruczołów, ból głowy, zapalenie oskrzeli). Strąki leczą zapalenie wątroby i łagodzą bóle stawów. Korzenie są konwencjonalnie

stosowane w leczeniu kamieni nerkowych, chorób wątroby, stanów zapalnych, wrzodów i bólu związanego z uchem czy zębem. Kora łądygi jest stosowana w leczeniu ran i infekcji skóry. Hindusi używają również gumy wyekstrahowanej z rośliny do leczenia gorączki. Nasiona rośliny działają jako środek przeczyszczający i są stosowane w leczeniu guzów, problemów z prostatą oraz pęcherzem (Gandji i in. 2018).

Najnowsze badania farmakologiczne wykazały, że różne wyciągi z *M. oleifera* wykazują działanie przeciwdrobnoustrojowe, przeciwgrzybicze, przeciwzapalne, antyoksydacyjne, przeciwnowotworowe, wspomagające płodność i gojące rany. Moringa zawiera wiele ważnych witamin i minerałów. Liście zawierają mniej więcej tyle samo potasu co banan i mniej więcej taką samą ilość witaminy C jak pomarańcza. Zawierają także wapń, białko, żelazo i aminokwasy, które pomagają organizmowi leczyć i budować mięśnie. Roślina zawiera wiele związków o charakterze przeciwutleniającym (np. witaminę E), które mogą chronić komórki przed uszkodzeniem i wzmacniać układ odpornościowy. Istnieją dowody na to, że niektóre z tych przeciwutleniaczy mogą obniżyć ciśnienie krwi i zredukować zawartość tłuszczu we krwi. Do tej pory scharakteryzowano ponad sto różnych związków biologicznie aktywnych, zawartych w różnych częściach *M. oleifera*, w tym alkaloidy, flawonoidy, antrachinony, witaminy, glikozydy i terpeny. Ponadto w roślinie zidentyfikowano nowe komponenty, takie jak muramozyd A i B oraz niazymina A i B, które wykazują silne działanie antyoksydacyjne, przeciwnowotworowe, przeciwnadciśnieniowe, hepatoprotekcyjne, antycholesterolowe i odżywcze. Liście Moringi są bardzo pożywne i powinny być stosowane przez osoby z niedoborami żywieniowymi (Gopalakrishnan i in. 2016, Divya i in. 2024). Włączenie tej rośliny do diety jest promowane jako strategia ochrony zdrowia i samoleczenia różnych chorób. Jedno z badań naukowych wykazało, że przyjmowanie 1,5 łyżeczki (7 gramów) proszku z liści Moringa codziennie przez trzy miesiące zmniejsza poziom cukru we krwi na czczo średnio o 13,5% (Fot. 2). Inne badanie z udziałem osób chorych na cukrzycę wykazało, że dodanie 50 gramów liści Moringa do posiłku zmniejszyło wzrost poziomu cukru we krwi o 21%. Zanim jednak preparaty na bazie liści *M. oleifera* będą mogły zostać zalecone jako leki



Fot. 2. Proszek z liści Moringa.

Fot. A. Jamiłowska

zapobiegające lub leczące cukrzycę czy choroby układu krążenia, konieczne jest dokładniejsze ustalenie naukowych podstaw ich skuteczności, terapeutycznych sposobów ich podawania i możliwych skutków ubocznych. Moringa jest również cenionym składnikiem kosmetyków ze względu na właściwości przeciwzapalne i nawilżające, a jej olej jest stosowany w produktach do pielęgnacji skóry i włosów. Olej Moringa nawilża skórę, tworząc film ochronny, łagodzi podrażnienia, wspomaga regenerację komórek i redukuje oznaki starzenia. Włosom zapewnia nawilżenie, miękkość i blask (Pareek i in. 2023).

Podsumowując, *M. oleifera*, jak sama nazwa wskazuje, jest „cudownym drzewem” i wydaje się być fitofarmaceutykiem oraz żywnością funkcjonalną, która spożywana codziennie może potencjalnie leczyć różne choroby przewlekłe u ludzi i mogłaby być stosowana przez lekarzy jako bezpieczniejsza alternatywa w leczeniu różnych schorzeń.

Literatura

[1] Divya S., Pandey V.K., Dixit R., Rustagi S., Suthar T., Atuahene D., Nagy V., Ungai D., Ahmed A.E.M., Kovács B., et al. 2024. Exploring the Phytochemical, Pharmacological and Nutritional Properties of *Moringa oleifera*: A Comprehensive Review. *Nutrients*. 2024, 16(19), 3423. <https://doi.org/10.3390/nu16193423>

[2] Gandji K., Chadare F.J., Idohou R., Salako V.K., Assogbadjo A.E., Glèlè R.L.K. 2018. Status and utilisation of *Moringa oleifera* Lam: A review. *Afr. CropSci. J.* 2018, 26, 137–156.

[3] Gopalakrishnan L., Doriya K., Kumar D.S. 2016. *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Sci. Hum. Wellness*. 2016, 5, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001>

[4] Pareek A., Pant M., Gupta M.M., Kashania P., Ratan Y., Jain V., Pareek A., Chuturgoon A.A. 2023. *Moringa oleifera*: An Updated Comprehensive Review of Its Pharmacological Activities, Ethnomedicinal, Phytopharmaceutical Formulation, Clinical, Phytochemical, and Toxicological Aspects. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023, 24(3), 2098. <https://doi.org/10.3390/ijms24032098>

Czas letni do poprawki

Jeżeli chcemy mieć realny pożytek z OZE oraz żyć zdrowo zgodnie z naturą, warto wdrożyć zupełnie inne strefy czasowe w Europie. Latem nasza cywilizacja jest przesunięta względem cyklu słońca co najmniej o kilka godzin i to w stronę niekorzystną dla działania sieci energetycznej oraz naszych własnych organizmów.

Przez połowę roku, od początku kwietnia do końca września, na początku i na końcu tego okresu, słońce wschodzi około 6 rano, a na przełomie czerwca i lipca zaraz po 4. Większość z nas budzi się dopiero 2-3 godziny po tym, jak na świecie jest już zupełnie jasno. Wyjątkiem są mieszkańcy np. Zalesia Górnego pod Warszawą, gdzie popularne jest trzymanie kogutów, chociaż miejscowość nie ma charakteru agrarnego.

Budzik cywilizacji spóźniony o kilka godzin

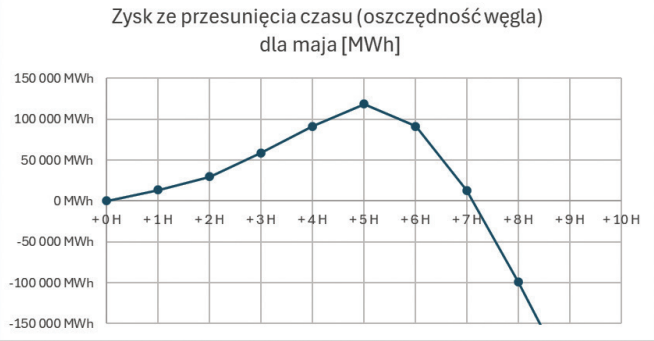
Nasza cywilizacja „budzi się” się jeszcze później, po kolejnych dwóch godzinach. Przedsiębiorstwa, instytucje i szkoły zaczynają pracę około 8-9, co wyraźnie widać na załączonych, dobowych wykresach zużycia prądu w Polsce, czyli średnio 3-5 godzin po wschodzie słońca. W ten sposób, przez jaśniejszą połowę roku, marnujemy każdego dnia kilka godzin naturalnego światła, które, poza oświetleniem, generuje energię elektryczną. Wieczorem robimy dokładnie odwrotnie – nie chodzimy spać w zgodzie z naturą, czyli razem z przysłowiowymi kurami, lecz wygaszamy nasze funkcjonowanie dopiero kilka godzin po zachodzie słońca. Tym razem doświetlając nasz świat prądem, który nie pochodzi z OZE.

Wszyscy wiemy, że ostatnie 4-6 godzin przed snem nasz gatunek poświęca głównie na aktywności domowe, zużywając przy tym ogromne ilości energii na gotowanie, pranie, ładowanie pojazdów, pracę telewizorów lub komputerów. Wszystko to dzieje się w czasie, gdy słońce jest tuż nad lub tuż pod horyzontem, a panele fotowoltaiczne dawno śpią. To dlatego każdego wieczoru polska sieć energetyczna, zasilana wtedy już tylko węglem (i odrobiną wody), przeżywa swój codzienny kryzys przeciążenia. Warto zajrzeć czasem na stronę www.ZieloneGodziny.pl lub oficjalną stronę PSE, aby zobaczyć, jak to wygląda na dobowych wykresach.

Nasza cywilizacja funkcjonuje z wielogodzinnym poślizgiem względem głównego źródła jej energii, jakim jest macierzysta gwiazda. Dlatego w naszej fundacji (Demok.pl) postanowiliśmy, w ramach projektu ZieloneGodziny.pl wdrożyć niewielki projekt symulacyjno-badawczy, mający na celu przeliczenie, jaki wpływ na sieć energetyczną kraju mogłoby mieć skorygowanie godzin naszej aktywności cywilizacyjnej i jakie korzyści ekonomiczne i ekologiczne (redukcja emisji CO₂) mogłoby to przynieść.

Fotowoltaika pracuje, gdy nikogo nie ma w domu

Zanim omówimy szczegóły, chcielibyśmy podzielić się jeszcze jedną obserwacją na temat nieracjonalnych zachowań naszego gatunku. Sportem narodowym w Polsce jest od dekady instalowanie na dachach domów lub obok nich elektrowni słonecznych. Praktycznie wszystkie są skierowane na południe, pod kątem ok. 30 stopni wyrażającym średnią roczną wysokość górowania słońca (wysokości w stopniach nad horyzontem około godziny 12). Takie ustawienie ma sprzyjać „złapaniu” jak największej ilości



(kWh) prądu w ciągu dnia i tym samym powoduje, że elektrownie te generują największą moc w godzinach 10-14, czyli dokładnie wtedy, gdy większość domów jest pusta i nie ma komu skorzystać z tej energii. Jest to sytuacja absurda, bo gdy dach domu dostarcza 5-10 kW mocy, to lodówka w kuchni potrzebuje w tym czasie jedynie 100 Watów (czyli 1-2% tej produkcji).

Z resztą prądu nie wiadomo, co począć, bo trudna sztuka magazynowania energii (choćby do wieczora) jest w powijakach. Ustawianie paneli na południe, czyli maksymalizacja dziennego „urobku” kilowatogodzin miałyby sens, gdyby całość tej energii trafiała do magazynu prądu – baterii lub w formie ciepła trafiała do wielkiego zbiornika z piaskiem ukrytego w piwnicy domu. Takie implementacje są jednak dopiero wdrażane, głównie przez hobbystów. Programy wspierające inwestowanie w magazyny energii są spóźnione względem dotacji na panele słoneczne przynajmniej o 5-10 lat.

Kolejną konsekwencją ustawiania wszystkich paneli „na południe” jest oczywiście nadpodaż produkcji energii w godzinach okołopołudniowych i codzienna (przynajmniej latem) klęska urodzaju oraz wynikające z niej ujemne ceny energii, a często też automatyczne odłączanie od sieci części elektrowni słonecznych i zwykajne marnowanie tej energii.

Trudno zrozumieć, dlaczego tak niewielu właścicieli fotowoltaiki wpada na pomysł, aby część paneli skierować na wschód, część na południe, a część na zachód i dysponować prądem



Jeśli zaczniemy używać sprzętów gospodarstwa domowego zasilanych prądem w określonych godzinach, to możemy przyczynić się do ochrony naszego środowiska.

Fot. Schutterstock

przez cały dzień. Do rzadkości należą instalacje umieszczone pionowo na zachodnich ścianach domów, stodoł czy magazynów, które produkują 4-5 razy mniej prądu niż te skierowane na południe, ale czynią to w tych godzinach, gdy prąd jest potrzebny domownikom, bo wrócili już do domów. Może lepiej jest produkować mniej energii ale wieczorem, gdy prąd jest relatywnie drogi? Absolutnym unikatem na tej skali są panele wyposażone w systemy śledzenia słońca, które w ciągu dnia mogłyby grać wodę lub piasek a wieczorem produkować prąd na bieżące potrzeby domu.

Zachód słońca „na żądanie” – czas do poprawki

Jednak żadne ustawienie paneli słonecznych nie poprawi sytuacji, gdy słońce już zaszło, dlatego wróćmy do głównej tematu i sprawmy, aby słońce zachodziło kilka godzin później! Gdy nałożymy na siebie wykres dobowego zużycia prądu przez typowe gospodarstwo domowe w Polsce oraz wykres produkcji prądu przez fotowoltaikę wyraźnie widzimy, że przesunięcie wykresu produkcji w prawo pomogłoby zaspokoić część wieczornego szczytu zapotrzebowania na prąd.

Sytuacja w reszcie Europy jest podobna, chociaż im dalej na zachód, tym później zachodzi słońce, sprzyjając wieczornym potrzebom energetycznym. Najlepsza sytuacja jest w Portugalii, najgorzej to wypada u nas. Czas urzędowy różni się o jedną godzinę, ale różnica w długości geograficznej wynosi około 30 stopni, co oznacza, że czas astronomiczny różni się o 2 godziny – słońce jest w zenicie nad Lizboną o 2 godziny później niż nad Warszawą (30/360 stopni x 24 godziny = 2 godz.), zatem fotowoltaika pracuje tam dłużej niż w Polsce. Stąd też postulat o przesunięciu czasu letniego w Polsce (ewentualnie też reszcie Europy) o 4-5 godzin „naprzód”, tak aby słońce zachodziło dużo później.

Realizacja tego pomysłu spowodowałaby również wzrost wykorzystania energii wiatru, który w rytmie dobowym jest skorelowany w pewnej części z energią słońca (w wyniku nagrzewania atmosfery i lądu). Wszyscy żeglarze i piloci wiedzą, że na godzinę przed zachodem wiatr zazwyczaj cichnie (no chyba, że przez kraj przechodzi właśnie jakiś poważny front). Dlatego wraz z zachodem słońca żagłówki i szybowce tracą napęd, a balony i małe samoloty mają komfortowe warunki do latania bez turbulencji. Jest to o tyle istotne, że produkcja energii wiatru jest nawet większa (ok. 25 TWh) od produkcji energii ze słońca (ok. 15 TWh, obie wielkości w skali roku, w Polsce). Ta ostatnia oczywiście byłaby większa, co najmniej o kilka TWh, gdyby była magazynowa i nie dochodziło do jej wyłączania w słoneczne letnie weekendy i „nie wpuszczania” do sieci.

Dzięki bazom danych, jakie gromadził serwis ZieloneGodziny.pl przez kilka lat, obejmującym konsumpcję i produkcję prądu, przeprowadziliśmy wiele symulacyjnych obliczeń, aby oszacować, jakie znaczenie ilościowe miałyby „opóźnienie” zachodu słońca w Polsce przez zmianę czasu o kilka godzin.

Ile prądu odzyskamy, jeśli zaczniemy żyć z kurami?

Wstępne podsumowanie tych wyliczeń, dla samej fotowoltaiki, jest widoczne na wykresie poniżej. Okazuje się, że przesunięcie czasu o 4 godziny pozwala na zmniejszenie produkcji prądu z węgla w maju (a więc i sierpniu) o ok. 100 GWh, ponieważ o tyle będą większe dostawy z elektrowni słonecznych. Jeśli uwzględ-



Na dachach 17-piętrowych budynków Poznańskiej Spółdzielni Mieszkaniowej Winogrody działa instalacja fotowoltaiczna złożona ze 1148 paneli solarnych. Rocznie ta rozproszona elektrownia PV produkuje 350 MWh energii.
Fot. Planet Partners



Edukacja Polaków, w jakim czasie dnia włączać i wyłączać urządzenia, do których funkcjonowania jest potrzebna energia elektryczna, będzie mieć znaczący udział w oszczędności jej ze źródeł kopalnych.
Fot. Schutterstock

nimy jeszcze energię wiatrową, to skala oszczędności, w skali roku, przy stałym rosnącym udziale OZE w bilansie energetycznym może wynieść 2-3 TWG. Oszczędności polegającej na dostarczeniu tej energii z wiatru i słońca zamiast z węgla. Dokładne wyniki symulacji i obliczeń przedstawimy w następnych publikacjach, pod koniec roku. Poziom 2-3 TWG to zaledwie około 2 procent rocznej produkcji energii w Polsce, więc jest to ilość marginalna, jednak może mieć znaczenie dla chronicznego, wieczornego przeciążenia sieci energetycznej w kraju, szczególnie, że ta dodatkowa energia będzie produkowana i zużywana lokalnie, często w obrębie tego samego domu lub najbliższych sąsiadów, wyraźnie redukując prywatne rachunki za prąd.

Kto wie, może więc warto rozważyć zmianę czasu letniego na bardziej radykalną wersję albo przynajmniej dostosować nasz prywatny rozkład dnia na bardziej zgodny z ruchem obrotowym Ziemi i pozycją naszej macierzystej gwiazdy na niebie? Wymagałoby to społecznego i biznesowego konsensusu, co do wcześniejszego rozpoczynania (i kończenia) dnia pracy – razem z kurami i w zgodzie z naturą! Na pewno byłoby to też korzystne dla naszego zdrowia!

Piotr KRUPA-LUBAŃSKI

Prognozy do 2050 roku

Polska doświadcza coraz szybszego ocieplenia klimatu – lądy (w tym Europa i nasz kraj) ogrzewają się szybciej niż powierzchnia oceanów. Wzrost temperatur przekłada się na coraz dotkliwsze zmiany środowiskowe. W ostatnich dekadach średnia temperatura w Polsce wzrosła już o ponad 2°C w porównaniu z początkiem XX wieku, podczas gdy globalnie ocieplenie wyniosło ok. 1,1°C względem epoki przedindustrialnej. Obecnie klimat naszego kraju przypomina klimat Niziny Węgierskiej z XIX wieku, położonej znacznie bardziej na południe. Eksperci podkreślają, że Polska i cała Europa Środkowo-Wschodnia ocieplają się szybciej niż średnia światowa.

Tempo ocieplenia obserwowane w Polsce i regionie jest wyższe od średniej dla całego globu z kilku powodów związanych z cechami lądów i specyfiką naszej części świata. Kluczowe mechanizmy atmosferyczne, geograficzne i regionalne wpływające na szybszy wzrost temperatur w Polsce to, że globalne ocieplenie nie rozkłada się równomiernie – lądy ogrzewają się znacznie szybciej niż oceany. Polska, jako kraj śródlądowy, odczuwa tę dysproporcję. Po drugie położenie na średnich szerokościach geograficznych oznacza klimat umiarkowany kontynentalny, mniej łagodzony przez ocean. Innymi słowy, układy atmosferyczne coraz częściej układają się tak, że nad środkową Europą zalegają stabilne wyży (bezhmurna pogoda i silne nasłonecznienie) lub napływa rozgrzane powietrze znad Afryki czy Bliskiego Wschodu.

Kolejna przyczyna, to zmiany pokrycia terenu i wilgotności atmosfery. Badania wskazują, że istnieje silne sprzężenie zwrotne cieplejszy klimat – „suchsza gleba”, co dodatkowo przyspiesza ocieplenie lądów. Nie mały wpływ na to ma urbanizacja miast. Ich dynamiczny rozwój powoduje lokalny wzrost temperatur niezależnie od globalnego trendu. W centrach miast temperatura bywa wyższa o kilka stopni niż na terenach podmiejskich. W skali całego kraju efekt urbanizacji ma mniejszy wpływ niż czynniki globalne, ale dokłada się do danych pomiarowych. Jak przewidują naukowcy, z Międzyrządowego Zespołu



Koryto Wisły w okolicach Góry Kalwarii.

Fot. Pixabay

ds. Zmian Klimatu (IPCC), ocieplenie w miastach będzie silniejsze od średniej regionalnej więc rosnące temperatury są dotkliwie odczuwalne właśnie w zurbanizowanych obszarach.

Te zjawiska odczuwany nie tylko w Polsce, bo Europa jako całość jest obecnie najszybciej ocieplającym się kontynentem na Ziemi. Od połowy lat 90. średnia temperatura w Europie rosła w tempie ok. +0,53°C na dekadę, czyli około dwa razy szybciej niż średnio na świecie, a szczególnie w jej środkowej i wschodniej części.

Co nas czeka?

Modele klimatyczne, w tym scenariusze przedstawiane przez IPCC, jednoznacznie wskazują, że ocieplenie naszego kontynentu potrwa co najmniej do połowy obecnego stulecia. Oznacza to, że w najbliższych dekadach temperatury będą nadal rosły. Jak to będzie wielkość zależy od emisji gazów cieplarnianych, ale nawet przy wysiłkach ograniczających emisje pewien dalszy wzrost jest już „wbudowany” w system klimatyczny.

Podobnie będzie w Polsce. Zarówno globalne, jak i regionalne opracowania przewidują dalszy wzrost średniej temperatury. Szacunki wskazują, że do około 2050 roku średnia roczna temperatura w Polsce wzrośnie o kolejny 1°C. Obecnie średnia ta wynosi ok. 9°C, a w połowie stulecia może osiągnąć 10°C. Dalsze ocieplenie spodziewane jest w drugiej połowie XXI wieku, ale dopiero pod koniec stulecia, zwłaszcza jeśli nie powstrzymamy emisji gazów cieplarnianych. Wówczas średnia temperatura w naszym kraju może przekroczyć 12°C. Jeśli jednak świat ograniczy emisje zgodnie z Porozumieniem Paryskim, istnieje szansa na ustabilizowanie ocieplenia na niższym poziomie. W optymistycznym scenariuszu globalne ocieplenie udałoby się zatrzymać poniżej 2°C.

Prognozy klimatyczne dla Europy Środkowo-Wschodniej wskazują nie tylko wzrost średnich temperatur, ale także na istotne zmiany w częstotliwości ekstremów pogodowych. To, co dawniej zdarzało się rzadko, może stać się dużo częst-



Deszcze coraz częściej będą przybierać formę ulew i nawałnic, a to będzie zwiększać ryzyko podtopień i powodzi błyskawicznych.

Fot. Canva

sze. Już teraz obserwujemy wydłużenie i nasilenie fal gorąca, a modele sugerują, że w przyszłości trend ten będzie się pogłębiać.

Ekstremalne zjawiska

Obecnie dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C występują w Polsce średnio kilka razy w roku, a prognozy są niepokojące. Do 2050 roku modele wskazują, że na przeważającym obszarze kraju będzie ponad 10 dni upałów rocznie, np. Kotlinie Sandomierskiej nawet 20 dni, a do końca XXI w. liczba dni z temperaturą powyżej 30°C może przekroczyć 20 i w najgorętszych regionach Polski południowej sięgnąć 30, czyli pełnego miesiąca upałów. Dla porównania – w końcu XX wieku takich dni było zaledwie kilka w roku. Coraz częstsze będą też rekordowe wartości maksymalne temperatur; fale upałów mogą trwać dłużej i obejmować większe obszary, a wraz z nimi noce tropikalne, w trakcie których temperatura minimalna nie spadnie poniżej 20°C. Zjawisko to będzie najbardziej odczuwalne w dużych miastach, gdzie efekt wyspy ciepła podnosi temperatury nocą.

Wystąpią również inne ekstremalne zjawiska. Ciepłsza atmosfera może pomieścić więcej pary wodnej, co sprzyja bardziej gwałtownym opadom. Modele dla naszego regionu przewidują, że deszcze będą przybierać częściej formę ulew i nawałnic, a to będzie zwiększać ryzyko podtopień i powodzi błyskawicznych. Jednocześnie większe parowanie i możliwe zmiany cyrkulacji mogą powodować dłuższe okresy bezdeszczowe, powodujące susze w centralnych obszarach kraju. Oznacza to, że już trzeba myśleć jak nawadniać uprawy, jak zarządzać gospodarką wodną, miejską ochroną przed powodziami i chłodzeniem miast oraz ochroną zdrowia podczas fal gorąca.

Czy to koniec umiarkowanie ciepłych lat?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, trzeba zastanowić się, jaka jest różnica między trendami klimatycznymi a naturalną zmiennością pogody. Pojedynczy chłodniejszy sezon lub rok nie oznacza zatrzymania globalnego ocieplenia. Eksperci podkreślają, że choć polskie lato może się zdarzyć niezbyt gorące, tak jak to miało miejsce w tym roku, to nie świadczy to o zahamowaniu negatywnego trendu ocieplenia. Klimat nadal się ogrzewa – po prostu rozkład ocieplenia nie jest równomierny i zdarzają się odchylenia od średniej.

Polska leży w strefie, gdzie warunki sezonowe są silnie uzależnione od układów atmosferycznych. W jednym roku latem może dominować cyrkulacja przynosząca chłodniejsze i wilgotniejsze masy powietrza znad Atlantyku, podczas gdy w innym roku przewagę zdobędzie gorące powietrze z południa. Taka naturalna zmienność pogody sprawia, że umiarkowanie ciepłe lata mogą się jeszcze sporadycznie zdarzać nawet w ocieplającym się klimacie. Warto jednak zauważyć, że na tle wieloletnich trendów będą one coraz rzadsze i chłodniejsze w porównaniu do nowej normy klimatycznej, a nie dawnych standardów. Przykładem może być tegoroczny lipiec i sierpień. Temperatury w tych miesiącach w Polsce okazały się dość łagodne i bliskie dawnym normom z ubiegłego stulecia, podczas gdy równocześnie wiele krajów Europy doświadczało rekordowych upałów. Nie oznacza to, że zmiana klimatu „ominęła” Polskę – po prostu pogoda w tym sezonie ułożyła się dla nas korzystnie, chroniąc nas przed ekstremami. Jednak



Susza rolnicza w bieżącym roku wystąpiła w 16 województwach. Najtrudniejsza sytuacja była w województwach mazowieckim i podlaskim oraz w części województwa lubelskiego. Największe straty spowodowała w uprawach rzepaku, zbóż jarych, a także kukurydzy (na zdjęciu).

Fot. krstrbrt/Shutterstock



Jezioro Jańsko. Z ponad 2 metrów tafla wody zmniejszyła się tu do 60 cm.

Fot. Wikipedia

z globalnej perspektywy trend ocieplenia jest jednoznaczny i nawet jeśli jeden rok jest u nas względnie chłodniejszy, kolejne lata na świecie mogą bić rekordy.

Obecny umiarkowany pod względem upałów rok można uznać za statystyczny wyjątek na tle długoterminowego ocieplenia. Podobne chwilowe odchylenia mogą się zdarzać w przyszłości, ale to nie oznacza, że każdy kolejny rok będzie rekordowo gorący wszędzie. Jednak prawdopodobieństwo występowania bardzo ciepłych, rekordowych lat będzie rosło, a szansa na powtórzenie się dłuższej serii chłodniejszych sezonów będzie malała wraz z postępem globalnego ocieplenia. Klimat w Polsce będzie coraz gorętszy i suchszy w ujęciu średniookresowym, choć naturalne wahania, chłodniejsze, deszczowe lato bądź surowsza zima, nadal mogą występować. W świetle prognoz musimy jednak przygotować się na to, że przyszłe lata częściej będą przypominać te rekordowo gorące niż te umiarkowane.

Marek TOMAKA

W poszukiwaniu przekonujących wyjaśnień

In search of convincing explanations

Jeśli zależności pomiędzy interesującymi nas zjawiskami nie są liniowe i nie zmieniają się zawsze proporcjonalnie, to poszukuje się prostszych mechanizmów składowych, które by tłumaczyły ten wynik, bo zazwyczaj chcielibyśmy, żeby zmiany były łatwe do interpretacji. Z tego względu korzysta się z różnych wzorów, takich jak słynny ipat – tożsamość arytmetyczna, która wyjaśnia presję na środowisko jako efekt wzrostu demograficznego i oddziaływania przez przeciętnego człowieka. Można to podejście uczynić bardziej złożonym, rozpatrując kilka aspektów owego oddziaływania. Z pomocą prostych przekształceń formalnych udaje się dostrzec zależności, które bez tego byłyby trudniejsze do zaobserwowania.

If the relationships between phenomena of interest are not linear and do not change proportionally, simple mechanisms that could explain the existing patterns are sought, since everything is typically expected to move in a way that is easy to interpret. For this reason, the famous ipat formula was developed to explain pressure on the environment as the product of demographic growth and the impact of the average person. One can make this approach more complex by looking into several aspects of the relationship. Simple arithmetic transformations allow to capture relations that would otherwise be difficult to determine.

Arytmetyka utwierdza nas w przekonaniu, że każdą liczbę można podzielić i pomnożyć przez cokolwiek (byleby nie przez zero!) i nic się nie zmieni. Innymi słowy,

$$x = x * y/y.$$

W miejsce dowolnej liczby y wolno wstawić b/c, czyli najpierw pomnożyć przez b/c, a następnie przez to podzielić (czyli pomnożyć przez c/b). Można to jeszcze powtórzyć kilka razy, byleby każda dopisana liczba (różna od zera) raz pojawiła się w liczniku, a raz w mianowniku, czyli żeby wszystko dało się skrócić. Na przykład

$$x = (d/e) * (f/d) * (e/f) * x$$

i tak dalej.

Wykorzystanie wzoru IPAT

Po raz pierwszy podejście to rozpropagował w latach 1970-tych amerykański biolog, Paul Ehrlich. Posłużył się następującym wzorem:

$$I = P * A * T,$$

gdzie I (*Impact*) interpretuje się jako wpływ na środowisko, np. jako emisję jakiegoś zanieczyszczenia w tonach, P (*Population*) to liczba ludności w mieszkańcach, A (*Affluence*) to zamożność mierzona za pomocą PKB *per capita* i T (*Technology*) to technologia mierzona za pomocą emisji tegoż zanieczyszczenia przypadającą na jednostkę PKB. Ostatecznie więc, zgodnie z tym wzorem, emisja zależy od liczby ludności, PKB i obciążenia owego PKB przez zanieczyszczenia. Paul Ehrlich bał się, że wzrost demograficzny jest najbardziej zabójczy dla środowiska, bo w połowie XX wieku myśłano, że liczba ludności będzie wzra-



Obfite zużycie paliw kopalnych – znikome przed XIX wiekiem – pozwoliło na bezprecedensowy wzrost PKB w wielu krajach w ciągu ostatnich dwóch stuleci.

Fot. Wikipedia

stała nieograniczenie. Obecnie, kiedy ta liczba osiągnęła 8 miliardów i według aktualnych prognoz nigdy nie przekroczy 11 miliardów, zmienna P w tym wzorze wzrośnie najwyżej o kilkadziesiąt procent. Tymczasem światowy PKB ma tendencję do wzrostu nieporównanie gwałtowniejszego; wystarczy porównać roczny PKB *per capita* w Szwecji, wynoszący około 70 000 USD, z PKB *per capita* w Indiach – około 11 000 USD. Znając uzasadnione aspiracje krajów słabo rozwiniętych, można się spodziewać

presji na wzrost zamożności wielokrotnie przekraczającej presję demograficzną.

Podejście zastosowane we wzorze IPAT zostało wykorzystane przez japońskiego ekonomistę Yoichi Kaya i jest często opisywane jako tożsamość jego imienia (*Kaya Identity*). W tym ujęciu wzór ma postać:

$$F = P * G/P * E/G * F/E,$$

gdzie F oznacza emisję dwutlenku węgla, P – liczbę ludności, G – PKB, zaś E – zużycie energii.

W pewnym sensie wzory tego typu są tautologiami i relacjonują same oczywistości. Wiadomo przecież na przykład, że zbiory dowolnego produktu rolnego stanowią iloczyn powierzchni zasiewów i plonów z hektara. W Polsce powierzchnia zasiewów zbóż zbliża się do 7 mln ha, ich plony wynoszą przeciętnie 5 t/ha, więc produkcja osiąga 35 mln t. Gdyby plony się nie zmieniły, a powierzchnia zasiewów wzrosła 2 razy, to i produkcja wzrosłaby 2 razy, do 70 mln t. Albo gdyby powierzchnia zasiewów była wciąż taka sama, a plony wzrosły o 20%, czyli do 6 t/ha, to produkcja wzrosłaby też o 20%, czyli do 42 mln t. Są to oczywiste dywagacje, które wzór typu IPAT tylko powtarza. Można więc zawyrokować, że tego typu wzory niczego mądrego nie są w stanie wniesić.

Ale byłaby to opinia przedwczesna. Przede wszystkim wzory pozwalają na ocenę stopnia ważności różnych czynników. Np. klasyczny wzór IPAT sugeruje spojrzenie na presję na środowisko przez pryzmat wzrostu demograficznego, wzrostu zamożności i technologii. Skoro wzrost demograficzny okazał się ustabilizowany, a światowy wzrost zamożności bywa traktowany jako nieunikniony, to ograniczenie tej presji jest możliwe tylko przez odpowiednio skuteczną poprawę technologii. W ujęciu proponowanym w tożsamości Kayi, wybór dotyczy w zasadzie tylko czynników E/G i F/E, bo czynnik P jest ustabilizowany, a G/P musi rosnąć (światowy PKB per capita wynosi około 25 000 USD, a skoro trudno oczekiwać, żeby w krajach najbogatszych zmalał w sposób istotny, to trudno też oczekiwać, żeby w kilkudziesięciu krajach biedniejszych od Indii nie wzrósł kilkukrotnie, znacznie podnosząc tę średnią).

Praktyczne wskazówki dla polityki

Próby obniżenia czynnika E/G sprowadzają się do obniżenia energochłonności PKB. W Polsce, po odejściu od systemu socjalistycznego, udało się tę energochłonność obniżyć z niemal 4 kWh/\$ w 1991 r. do 1 kWh/\$ w 2023 r. (szacowaną w tzw. dolarach międzynarodowych z 2011 r.). Tendencję malejącą zaobserwowano również w innych krajach, więc można się spodziewać pewnej poprawy na świecie pod tym względem.

Obniżka F/E powszechnie jest kojarzona z dekarbonizacją energii (Aura 7/2022). Radykalna poprawa w tym zakresie musi polegać na wyeliminowaniu paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny. Jest to proces długotrwały, ale w sumie możliwy do realizacji. Obfite zużycie tych paliw – zniskome przed XIX wiekiem – pozwoliło na bezprecedensowy wzrost PKB w ciągu ostatnich

dwóch stuleci. Dekarbonizacja energii przez zastępowanie paliw kopalnych źródłami odnawialnymi postępuje dość szybko, choć wolniej, niżby sobie życzyły osoby, którym zależy na ochronie klimatu albo zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego. Nawet w gospodarce polskiej, która w wyjątkowym (jak na Europę) stopniu uzależniona jest od spalania węgla, w 1990 r. na 1 kWh elektryczności przypadała emisja dwutlenku węgla w wysokości 1,3 t, a w 2023 r. wskaźnik ten wynosił już tylko 0,6 t. W wielu regionach planuje się osiągnięcie wskaźnika F/E w wysokości 0, choć można mieć obawę, że faktyczna emisja dwutlenku węgla zostanie nie tyle wyeliminowana, co raczej ukryta gdzie indziej (Aura 3/2023).

Analizy ekonomiczne

Wzory typu IPAT pozwalają więc na pewne uporządkowanie analiz polityki ochrony środowiska. Ale pozwalają również na analizę innych ciekawych zjawisk, włącznie z tzw. ekologiczną krzywą Kuznetsa (Aura 3/2013). Pod tą nazwą kryje się proces polegający na tym, że dewastacja środowiska zazwyczaj rośnie wraz ze wzrostem zamożności, choć tylko do pewnego poziomu. Wraz z dalszym jego wzrostem nie tylko nie rośnie, ale się wręcz obniża. Np. w USA – gdzie najłatwiej można znaleźć wiarygodne statystyki długookresowe – roczna emisja dwutlenku siarki w przeliczeniu na jednego mieszkańca wynosiła około 100 kg w początku XX wieku. Maksimum – które odnotowano w roku 1973 – wyniosło około 150 kg. Obecnie emisja przypadająca na jednego mieszkańca spadła niemal do zera (wynosi poniżej 5 kg).

Taki proces może dziwić osoby, które oczekują, że jeśli coś rośnie, to rośnie zawsze,

a jeśli spada, to spada zawsze. Z pomocą przychodzi dekompozycja badanego zjawiska według wspomnianej na wstępie zasady. Przypuśćmy, że chcemy w prosty sposób wyjaśnić, dlaczego DEW/P (gdzie DEW jest jakimś wskaźnikiem dewastacji środowiska, np. emisją zanieczyszczenia, a P – jak zwykle – liczbą ludności) ma taki dziwny nieliniowy przebieg. Jeśli PKB/P (czyli PKB *per capita*, poziom zamożności) pomnożyć i podzielić przez tę samą liczbę, to wynik się nie zmienia. Niech PKB/STR (gdzie STR charakteryzuje strukturę gospodarczą – np. udział przemysłu w gospodarce) będzie tą liczbą. Wtedy

$$\text{DEW/P} = \text{DEW/P} * \text{PKB/STR} * \text{STR/PKB},$$

a po oczywistych przekształceniach arytmetycznych:

$$\text{DEW/P} = \text{DEW/STR} * \text{STR/PKB} * \text{PKB/P}.$$

Badany wskaźnik – DEW/P – zostaje zatem wyjaśniony przez poziom zamożności (PKB/P) pomnożony przez dwa czynniki: DEW/STR oraz STR/PKB. A jeśli owe czynniki rosną albo spadają nawet stale, lecz w różnych tempach – jak to często bywa – to DEW/P właśnie może najpierw rosnąć, a potem spadać.

Tak więc wzory typu IPAT nie powinny być dyskredytowane jako tautologiczne i zbędne. Pozwalają na ustalenie ważności różnych aspektów presji na środowisko. Np. presja demograficzna – stanowiąca przedmiot szczególnej troski w drugiej połowie XX wieku – nie wydaje się być obecnie kluczowa dla przyszłości ochrony środowiska. Natomiast presja na wzrost zamożności ma znaczenie bardziej istotne, bo nie można przecież wyperswadować ubogim, żeby pozbyli się swoich aspiracji materialnych.

Niby to wszystko jest oczywiste, ale arytmetyka pomaga racjonalnie wyjaśnić zjawiska obserwowane na świecie.



Gospodarka polska, która w wyjątkowym, jak na Europę, stopniu uzależniona jest od spalania węgla, w 1990 r. na 1 kWh elektryczności emitowała 1,3 t CO₂, a w 2023 r. wskaźnik ten wynosił już tylko 0,6 t. Fot. Pixabay

Wpływ globalnego ocieplenia na produkcję pierwotną: krytyczna rola i zagrożenia dla *Prochlorococcus marinus*

The Impact of Global Warming on Primary Production: The Critical Role and Vulnerability of *Prochlorococcus marinus*

Prochlorococcus marinus to najmniejsza i najliczniejsza cyjanobakteria oceaniczna, odpowiedzialna za znaczną część fotosyntezy w tropikalnych wodach i kluczowa dla globalnej sekwestracji węgla. Postępujące ocieplenie się oceanów zagraża jej stabilności – badania terenowe wykazują gwałtowny spadek liczebności powyżej 28°C, a modele przewidują redukcję biomasy o 17-51% do końca wieku. Konsekwencją mogą być zakłócenia w łańcuchach pokarmowych, zmniejszona produkcja tlenu i osłabienie biologicznej pompy węglowej. Wpływ dodatkowych czynników, takich jak deoksygenacja czy konkurencja ze strony *Synechococcus*, pogłębia to zagrożenie, co podkreśla potrzebę dalszych badań i monitoringu populacji *Prochlorococcus*.

Słowa kluczowe: *Prochlorococcus*, ocieplenie oceanów, produkcja pierwotna, fitoplankton morski

Prochlorococcus marinus is the smallest and most abundant oceanic cyanobacterium, responsible for a significant share of photosynthesis in tropical waters and essential for global carbon sequestration. The ongoing warming of the oceans threatens its stability – field studies show a rapid decline in abundance above 28°C, and models predict a 17-51% reduction in biomass by the end of the century. The consequences may include disruptions in marine food webs, reduced oxygen production, and a weakened biological carbon pump. Additional factors, such as deoxygenation and competition from *Synechococcus*, intensify this threat, highlighting the need for continued research and monitoring of *Prochlorococcus* populations.

Keywords: *Prochlorococcus*, ocean warming, primary production, marine phytoplankton

Liczba gatunków zamieszkujących Ziemię jest wciąż w dużej mierze nieznana. Szacuje się, że może ich być od kilkunastu do nawet 100 milionów [3], ale nauka opisała dotąd zaledwie około 1,9 miliona [9]. Jednym z organizmów, które w znaczący sposób zmieniły nasze rozumienie ekosystemów morskich, jest *Prochlorococcus marinus* – niewielka cyjanobakteria odkryta dopiero w 1988 roku dzięki cytometrii przepływowej [1]. Mimo swoich mikroskopijnych rozmiarów (0,5-0,7 μm), *Prochlorococcus* należy do najważniejszych organizmów funkcjonujących na planecie.

Biologia i ekologia *Prochlorococcus marinus*

Prochlorococcus marinus występuje w strefie 40°N-40°S w wodach oligotroficznych oceanów [7]. Potrafi zasiedlać wody sięgające nawet 200 m głębokości, co zawdzięcza zróżnicowaniu na liczne ekotypy adaptowane do odmiennych warunków świetlnych. Badania Martiny'ego i współautorów wykazały istnienie trzech głównych grup ekotypów – jednych dominujących w silnie naświetlonych wodach

powierzchniowych, oraz dwóch żyjących w warstwie słabego światła [6].

Co szczególnie istotne, *Prochlorococcus* jest wykrywalny nawet w wodach afotycznych, gdzie trafia dzięki procesom fizycznego transportu – np. falom wewnętrznym. Odkrycie „głębokiego *Prochlorococcus*” (deep *Prochlorococcus*) przedstawione w publikacji Jiao i współautorów wskazuje, że organizm ten odgrywa rolę także w eksporcie węgla do głębokiego oceanu [5].

W tropikalnych oceanach *Prochlorococcus* może odpowiadać nawet za 80% fotosyntezy prowadzonej w warstwie powierzchniowej. Całkowita liczebność tych bakterii jest szacowana na 2,8-3,0 × 10²⁷ komórek [4]. Analiza globalnego rozmieszczenia przedstawiona w pracy Flombauma potwierdza, że największe zagęszczenia występują w oligotroficznych wodach Pacyfiku i Oceanu Indyjskiego. Organizm ten nie tylko produkuje tlen, lecz także wiąże tego węgla w głąb oceanów. Jak wykazały badania Jiao i współautorów, *Prochlorococcus* nawet po wyniesieniu poza strefę eufotyczną pozostaje fizjologicznie aktywny, co zwiększa jego udział w sekwestracji węgla [5].

Ocieplenie się oceanów – procesy i konsekwencje

Oceany pochłaniają ponad 90% nadmiaru energii cieplnej zatrzymywanej przez atmosferę wskutek wzrostu stężenia gazów cieplarnianych. Od lat 80. XX wieku średnia temperatura powierzchni mórz rośnie nieprzerwanie, a ostatnia dekada przyniosła rekordowe anomalie cieplne. Według badań opublikowanych przez Ribaletti współautorów, przyszła temperatura powierzchni tropikalnych oceanów może regularnie przekraczać 30°C [8].

Wzrost temperatury prowadzi do silniejszej stratyfikacji termicznej, ograniczenia mieszania pionowego, zmniejszenia dopływu składników odżywczych z głębin, a także przesunięcia struktur biogeograficznych fitoplanktonu. Zmiany te szczególnie uderzają w gatunki o wyspecjalizowanych niszach termicznych – takie jak *Prochlorococcus* [8].

Termiczne granice wzrostu *Prochlorococcus marinus*

Przez wiele lat zakładano, że ogrzewanie oceanów będzie sprzyjać wzrostowi populacji *Prochlorococcus*, ponieważ laboratoryjne krzywe wzrostu sugerowały, że ich tempo podziału

zwiększa się wraz z temperaturą (np. do 30°C). Jednak dane te pochodziły z hodowli prowadzonych w warunkach sztucznych, z ograniczoną różnorodnością szczepów. Na podstawie danych terenowych zaobserwowano trzy kluczowe przedziały odpowiedzi populacji. Poniżej 19°C obserwuje się gwałtowny wzrost liczebności wraz z temperaturą. W przedziale temperatur 19-28°C dochodzi do stabilizacji liczebności mimo wzrostu tempa podziału (co sugeruje wzrost śmiertelności). Natomiast powyżej 28°C odnotowywano szybki spadek liczebności [8].

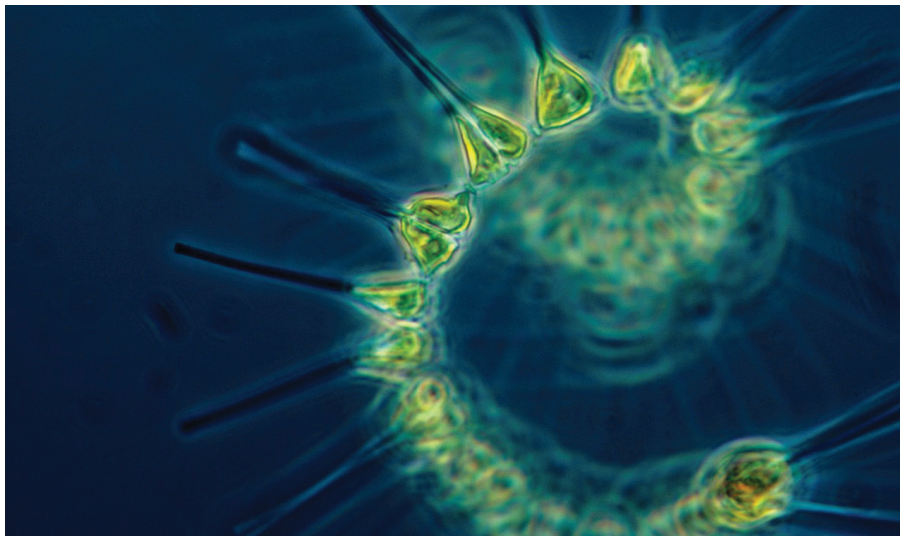
Wieloletni projekt opisany przez Ribalet et al. (2025) wykorzystał ciągłą cytometrię przepływową SeaFlow, która pozwoliła przeanalizować w warunkach naturalnych około 800 miliardów komórek fitoplanktonu. Najważniejsze wnioski jakie uzyskano w tych badaniach to:

- Tempo podziału *Prochlorococcus* rośnie wyłącznie do ok. 28°C.
- Powyżej tej temperatury tempo podziału drastycznie spada (o ok. 3× przy 31°C).
- Maksymalne tempa wzrostu nigdy nie przekraczały 1,6 podziału dziennie – znacznie mniej niż przewidywały modele laboratoryjne.

Projekcje na przyszłość. Konsekwencje ekologiczne spadku liczebności *Prochlorococcus*

Ribalet i współautorzy opracowali modele ekosystemowe, integrujące ich dane z prognozami klimatycznymi (RCP 4.5 i RCP 8.5). Wyniki są bardzo niepokojące. Przewiduje się spadek produkcji biomasy *Prochlorococcus* w tropikach nawet o 17-51% do końca XXI wieku. W rejonie zachodniego Pacyfiku możliwy jest niemal całkowity zanik populacji. Spadki wynikają bezpośrednio z przekroczenia granicy temperatury 28°C, nie z niedoborów składników odżywczych. Ponieważ *Prochlorococcus* stanowi podstawę wielu łańcuchów pokarmowych, jego spadek może wywołać tzw. efekt domina [8]. To znane powszechnie zjawisko w ekosystemach, że gdy zanika organizm będący podstawą sieci pokarmowej, konsekwencje są nieuchronne i poważne.

Skoro *Prochlorococcus* odpowiada za około połowę tlenu wytwarzanego w oceanach, jego spadek może w skali globalnej wpłynąć na atmosferyczną równowagę tlenową. Choć oceany mają dużą pojemność, długoterminowe zmiany składu fitoplanktonu mogą mieć znaczenie klimatyczne. Spadek liczebności *Prochlorococcus* oznaczać będzie że mniej CO₂ zostanie związane przez fotosyntezę. Mniejszy będzie eksport węgla do niższych warstw oceanu [5]. Powyż-



Fitoplankton dostarcza od 50% do nawet 80% tlenu trafiającego co roku do atmosfery Ziemi.

Fot. Pixabay

sze oznacza osłabienie globalnego systemu stabilizującego klimat.

Czynniki dodatkowe i możliwe scenariusze adaptacyjne

Ocieplanie oceanów powoduje silniejszą stratyfikację, ograniczając transport azotu, fosforu i żelaza z głębi. Fitoplankton, w tym *Prochlorococcus*, staje się bardziej narażony na niedobory. Jednocześnie cieplejsze wody gorzej rozpuszczają tlen, co potęguje deoksygenację i rozszerza strefy OMZ (strefa minimalnego stężenia tlenu). W najgorętszych wodach dominację często przejmują sinice *Synechococcus*, co obserwowano w rejonach >30°C. Choć mogą częściowo kompensować utratę *Prochlorococcus*, to nie wspierają łańcuchów pokarmowych w identyczny sposób [2].

Badania wskazują na możliwość częściowej adaptacji termicznej, ale tempo ocieplenia może przewyższyć tempo zmian ewolucyjnych. Spadek *Prochlorococcus* osłabi zdolności oceanów do wiązania węgla. Mniejsza fotosynteza i zwiększona deoksygenacja mogą prowadzić do zmian w cyrkulacji oceanicznej, sieciach troficznych i globalnym bilansie tlenowym [8].

Rekomendacje badawcze

Aby zrozumieć i przewidzieć reakcje *Prochlorococcus marinus* na szybkie ocieplenie się oceanów, konieczny jest długoterminowy monitoring, umożliwiający śledzenie zmian liczebności i aktywności metabolicznej populacji w czasie. Z kolei badania genomiczne i metagenomiczne umożliwią identyfikację potencjalnych mechanizmów adaptacji termicznej oraz różnorodności ekotopowej *Prochlorococcus* w tropikach. Ważnym jest też tworzenie sce-

nariuszy biogeochemicznych, integrujących dane o przyszłym osłabieniu biologicznej pompy węglowej i jego wpływie na globalny obieg węgla oraz klimat [8]. A modelowanie wielogatunkowe, uwzględniające interakcje między *Prochlorococcus*, *Synechococcus* i innymi grupami fitoplanktonu, pozwala prognozować zmiany w strukturze ekosystemów [2].

Bibliografia

- [1] Chisholm S. W., Olson R. J., Zettler E. R., Waterbury J. B., Goericke R. et al. 1988. A novel free-living prochlorophyte occurs at high cell concentrations in the oceanic euphotic zone. *Nature* 334: 340–343. doi: 10.1038/334340a0
- [2] Coello-Camba A., Agustí S. 2024. Seawater temperature drives the diversity of key cyanobacteria (*Synechococcus* and *Prochlorococcus*) in a warming sea. *Frontiers in Marine Science* 11. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1456799
- [3] Ehrlich P. R., Wilson E. O. 1991. Biodiversity Studies: Science and Policy. *Science* 253: 758–762. DOI: 10.1126/science.253.5021.758
- [4] Flombaum P., Gallegos J. L., Gordillo R. A., Rincón J., Zabala L. L. et al. 2013. Present and future global distributions of the marine Cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 9824–9829. https://doi.org/10.1073/pnas.1307701110
- [5] Jiao N., Luo T., Zhang R., Yan W., Lin Y. et al. 2014. Presence of *Prochlorococcus* in the aphotic waters of the western Pacific Ocean. *Biogeosciences* 11: 2391–2400. https://doi.org/10.5194/bg-11-2391-2014
- [6] Martiny A. C., Coleman M. L., Chisholm S. W. 2009. Taxonomic resolution, ecotypes and biogeography of *Prochlorococcus*. *Environmental Microbiology* 11: 823–832. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01803.x
- [7] Partensky F., Hess W. R., Vaulot D. 1999. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63(1): 106–127. https://doi.org/10.1128/MMBR.63.1.106-127.1999
- [8] Ribalet F., Dutkiewicz S., Monier E., Armbrust E. V., Lindell D. et al. 2025. Future ocean warming may cause large reductions in *Prochlorococcus* biomass and productivity. *Nature Microbiology* 10: 2441–2453. https://doi.org/10.1038/s41564-025-02106-4
- [9] Weiner J. 2020. Życie i ewolucja biosfery. Podręcznik ekologii ogólnej. PWN, Warszawa.

Rezyliencja gospodarstw biodynamicznych wyzwania i szanse

The resilience of biodynamic farms: challenges and opportunities

W obliczu globalnych kryzysów środowiskowych i demograficznych coraz większego znaczenia nabiera koncepcja rezyliencji systemów żywnościowych. Artykuł analizuje rolę, jaką w tym kontekście mogą odegrać gospodarstwa biodynamiczne – jeden z najbardziej konsekwentnych modeli rolnictwa ekologicznego, oparty na zasadach samowystarczalności, zamkniętych obiegów i równowagi ekosystemowej. Na podstawie przeglądu literatury oraz analiz strategicznych [2, 7] wskazano, że biodynamika ma potencjał wzmocnienia zdolności adaptacyjnych i transformacyjnych rolnictwa. Jednocześnie wymaga dalszych badań dotyczących wydajności i skalowalności. Gospodarstwa biodynamiczne – mimo ograniczeń – mogą odegrać istotną rolę w procesie transformacji rolnictwa w kierunku zrównoważonego systemu żywnościowego.

Słowa kluczowe: rezyliencja systemów żywnościowych, rolnictwo biodynamiczne, rolnictwo ekologiczne, samowystarczalność, zrównoważone rolnictwo

In the face of global environmental and demographic crises, the concept of food system resilience is becoming increasingly important. This article analyses the role that biodynamic farms can play in this context. Biodynamic farming is one of the most consistent models of organic farming, based on the principles of self-sufficiency, closed cycles and ecosystem balance. Based on a review of the literature and strategic analyses [2, 7], it has been shown that biodynamics has the potential to strengthen the adaptive and transformative capacities of agriculture. At the same time, further research on its efficiency and scalability is needed. Biodynamic farms, despite their limitations, can play an important role in the transition of agriculture towards a sustainable food system.

Keywords: food system resilience, biodynamic agriculture, organic farming, self-sufficiency, sustainable agriculture

Wprowadzenie

Rezyliencja, czyli odporność systemów na zmiany przy jednoczesnym zachowaniu zdolności do dalszego rozwoju, staje się kluczową kategorią analizy współczesnych wyzwań cywilizacyjnych. Od poziomu jednostki po skalę planetarną, zasady rezyliencji pozostają zaskakująco spójne.

Choć koncepcja ta nie jest nowa, to w ostatnich latach zyskuje szczególne znaczenie w kontekście globalnego systemu żywnościowego. System ten coraz silniej wpływa na przekroczenie granic planetarnych, czyli limitów, które określają, ile środowisko naturalne jest w stanie wytrzymać bez krytycznych zakłóceń. Jednocześnie pozostaje kluczowy dla bezpieczeństwa żywnościowego i źródło utrzymania miliardów ludzi.

Odporność systemów żywnościowych

Naukowcy z Potsdam Institute for Climate Impact Research szacują, iż obecny system żywnościowy jest w stanie wyżywić, w zrównoważony sposób, jedynie 3,4 miliardy ludzi [2]. Zrównoważony, czyli respektujący granice planetarne, zdefiniowane pierwot-

nie w 2009 roku przez Stockholm Resilience Center [6]. Liczby te wskazują na całkowity brak równowagi pomiędzy możliwościami dzisiejszego systemu żywnościowego w kontekście zrównoważonego rozwoju, a populacją ludzkości, która przekroczyła już 8 miliardów i zmierza w stronę 10 miliardów przed końcem XXI wieku [10].

W tym kontekście istotne staje się pytanie, jak budować odporność systemów żywnościowych na przyszłe wstrząsy i wyzwania.

Zdolności rezyliencyjne

OECD opisuje trzy podstawowe zdolności rezyliencji: absorpcyjną, adaptacyjną i transformacyjną. Ponieważ wszystkie trzy zdolności mogą być rozwijane poprzez działania rolników, innych podmiotów prywatnych oraz rządu jeszcze przed wystąpieniem szoków, zdolność przygotowania można uznać za czwartą kluczową zdolność rezyliencji [5].

Współczesne działania koncentrują się głównie na aspektach adaptacyjnych (zmiana struktury upraw, nawadnianie) i absorpcyjnych (systemy ubezpieczeń, infrastruktura). Tymczasem przyszłość zrównoważonego rolnic-

twa wymaga rozwoju zdolności transformacyjnych – systemowych, długofalowych zmian.

Współczesne wyzwania systemów żywnościowych

OECD definiuje tzw. potrójne wyzwanie systemów żywnościowych [4]:

- 1) zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego,
- 2) ochrona środowiska naturalnego, oraz
- 3) utrzymanie źródeł dochodu dla setek milionów ludzi pracujących w rolnictwie.

W odniesieniu do dwóch pierwszych badań Gerten et al. wskazują pięć głównych kierunków transformacji [2], które mogą zapewnić zdolność systemów żywnościowych do wyżywienia, w zrównoważony sposób, 10 miliardów ludzi:

- zwiększenie wydajności upraw,
- ograniczenie zużycia nawozów i wody,
- zmiana nawyków żywieniowych,
- redukcja marnotrawstwa żywności,
- usprawnienie handlu międzynarodowego.

Dwa pierwsze wyzwania dotyczą bezpośrednio rolnictwa. Spośród trzech pozostałych, handel i straty wymagają rozwiązań odnoszących się do całego łańcucha dostaw,

Dr hab. inż. Grzegorz WAŁOWSKI, prof. ITP-PIB
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy
Państwowy Instytut Badawczy w Falentach
Zespół Badawczy Odnawialnych Źródeł Energii,
oddział w Poznaniu
ORCID: 0000-0001-8874-2399

Biogazyfikacja złoża węgla brunatnego – badania eksperymentalne przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego w kontekście neokarbonizacji

Biogasification of brown coal deposits – experimental studies using a polydisperse substrate in the context of neocarbonization

Przemiana substancji węglowodanowych in situ została przedstawiona w kontekście powstawania metanu (CH₄) przez metanogeny. Metody konwersji węgla in situ zostały scharakteryzowane ze względu na korzystny wpływ niekonwencjonalnego wydobycia węgla stanowiąc neokarbonizację. Badania przeprowadzono na węglach mniej dojrzałych, o niższym stopniu karbonizacji materii organicznej, ponieważ są one bardziej efektywne w konwersji do gazu bioenergetycznego, który można wykorzystać do wszelkich działań proekologicznych. Oryginalna koncepcja badań eksperymentalnych została przedstawiona poprzez połączenie właściwości polidispersyjnego substratu, jakim jest gnojowica ściśńska i wykorzystanego do biogazyfikacji węgla brunatnego (fermentacji beztlenowej) w dwóch układach złożów węgla brunatnego. W tym celu opracowano laboratoryjny reaktor monosubstratowy do fermentacji gnojowicy ściśńskiej w złożu lignitu. Celem badań przedstawionych w artykule jest ocena ilości biogazu rolniczego wytwarzanego w procesie mezofilowej fermentacji metanowej z wykorzystaniem polidispersyjnego substratu z wykorzystaniem złoża węgla brunatnego umieszczonego w fermentorze. Nowością artykułu są wyniki badań wskazujące na praktyczne wykorzystanie gnojowicy ściśńskiej w złożu węgla brunatnego, dla którego intensywna produkcja biogazu odbywa się na złożu lignitowym. W badaniach zaobserwowano również zjawisko inhibicji i dynamikę procesu podczas produkcji biogazu w złożu węgla brunatnego.

Słowa kluczowe: biogaz, złożo lignitowe, węgiel brunatny, biodegradacja, mikroorganizmy metanogenne

Wprowadzenie

Lignit (węgiel brunatny) może być wykorzystywany nie tylko do produkcji energii elektrycznej, ale także do produkcji różnych związków chemicznych, w tym paliw ciekłych i gazowych. Kierunek wykorzystania tego surowca z pewnością będzie determinowany przez warunki ekonomiczne w przyszłości. Gazyfikacja to proces chemiczny polegający na przekształceniu paliwa stałego lub ciekłego w gaz palny, który może być wykorzystywany do produkcji ciepła lub energii elektrycznej lub jako surowiec do produkcji produktów chemicznych, takich jak wodor, metanol lub gaz syntetyczny. Badania

przeprowadzone w ramach programu foresight realizowanego przez Poltegor-Institut wykazały ekonomiczną opłacalność tego procesu [1]. Metoda biogazyfikacji ma dwie główne zalety, które jednocześnie mogą być jej dużymi ograniczeniami. Pierwszą z nich jest konieczność wykorzystania w procesie biogazyfikacji węgla brunatnego o wysokiej zawartości wilgoci (powyżej 40%). Środowisko wodne jest niezbędne dla życia mikrobiologicznego. Po drugiebiogazyfikację można stosować tylko do młodych i nie w pełni dojrzałych lignitów, które są bliższe strukturą pierwotnym składnikom organicznym niż wysokokalorycznemu węglowi [2].

Metoda biogazyfikacji pokładu węgla nie została jeszcze zastosowana na skalę przemysłową. Obecnie trudno jest ocenić jej wpływ na środowisko wodne. Wyniki badań prawdopodobnie nie będą znane przez kilka lat [3]. Biogazyfikacja jest innowacyjną technologią podziemnej konwersji lignitu na gaz przy użyciu określonych grup mikroorganizmów [4]. Na większą skalę – poza skalą laboratoryjną – proces biogazyfikacji węgla nie został jeszcze przetestowany. Powodem może być to, że biogazyfikacja jest trudnym zjawiskiem, wymagającym interakcji ogromnej liczby mikroorganizmów i ściśle określonych warunków. Wykaza-

natomiast zmiana nawyków żywnościowych jest w dużym stopniu zmienną zewnętrzną, na który pewien wpływ ma część łańcucha dostaw mająca bezpośredni kontakt z klientem, czyli przede wszystkim handel. Rolnictwo – jako pierwsze ogniwo łańcucha – wymaga fundamentalnej zmiany sposobu osiągania wydajności. Intensywne rolnictwo konwencjonalne (przemysłowe) dążąc do zwiększenia wydajności upraw jest kosztowne środowiskowo. Alternatywą są systemy ekologiczne, które zmniejszają zużycie zasobów, ale cechują się niższą produktywnością [7].

Rolnictwo biodynamiczne

Na tym tle warto przyjrzeć się rolnictwu biodynamicznemu – jednej z pierwszych świadomych prób stworzenia modelu samowystarczalnego, zgodnego z rytmem przyrody. Rolnictwo biodynamiczne czerpie z dorobku całej historii rolnictwa, łącząc tradycyjne doświadczenia z wyzwaniami współczesnego świata w ramach holistycznej koncepcji, sformułowanej w 1924 roku przez Rudolfa Steinera [8]. Co ciekawe, rolnictwo biodynamiczne powstało w czasie, kiedy ludność świata nie przekroczyła jeszcze 2 miliardów i wymiar ekologiczny nie był tak niezbędny jak dzisiaj. Dało to jednak czas kilku pokoleniom rolników stosującym zasady rolnictwa biodynamicznego na naukę, testowanie i rozwój rozwiązań w praktyce. Rozwiązania stosowane w rolnictwie biodynamicznym odnoszą się zarówno do aspektu bezpieczeństwa żywnościowego jak i wymiaru społecznego dotyczącego osób zatrudnionych w rolnictwie biodynamicznym. Jest to więc koncepcja wielowarstwowa, próbująca holistycznie rozwiązać problemy niezwykle złożonego systemu jakim jest gospodarka rolna – kluczowy element systemu żywnościowego. Choć początkowo było ruchem niszowym, to dziś – po stu latach praktyki – staje się ważnym źródłem inspiracji. W kontekście poruszanych wyzwań warto podkreślić dwa kluczowe aspekty modelu biodynamicznego. Pierwszym z nich jest koncepcja salutogenezy [1] zaczerpnięta z medycyny i zdrowia publicznego. Salutogeneza koncentruje się nie na przyczynach chorób, lecz na źródłach zdrowia – czyli na pytaniu: co sprawia, że ludzie pozostają zdrowi. Rolnictwo biodynamiczne, kierując uwagę na wzmacnianie pozytywnych mechanizmów systemu, podąża podobną ścieżką. Salutogeneza w rolnictwie stara się identyfikować i wzmacniać czynniki sprzyjające zdrowiu, dobrostanowi i odporności – również na poziomie gospodarstw. Zamiast koncentrować się

wyłącznie na zagrożeniach i deficytach, bada ona mechanizmy pozwalające utrzymać równowagę w złożonym systemie produkcji rolnej. Podejście to wyraźnie różni się od modelu rolnictwa konwencjonalnego, opartego na eliminowaniu zjawisk patogennych, niesprzyjających plonowaniu (np. poprzez stosowanie chemii rolniczej czy intensywną obróbkę gleby). Salutogeneza proponuje rozwiązania zakorzenione w naturalnych mechanizmach rezyliencji ekosystemowej, które możemy zaobserwować w przyrodzie. Stąd m.in. nacisk na bioróżnorodność w obrębie gospodarstwa. Zależność od warunków pogodowych to stały czynnik ryzyka w rolnictwie. W tym kontekście bioróżnorodność, która w gospodarstwach biodynamicznych i ekologicznych powinna obejmować co najmniej 10% areалу (choć niektóre gospodarstwa zwiększają ten udział nawet do 20%), odgrywa rolę bufora. Pomaga ona łagodzić skutki ekstremalnych zjawisk pogodowych, ogranicza fluktuacje plonów i zwiększa przewidywalność produkcji. Poprawa stabilności stanowi podstawowy mechanizm budowania samowystarczalności w gospodarstwach funkcjonujących w systemie biodynamicznym. Choć nie rozwiązuje w pełni problemu wydajności, to koncentrując się na większej przewidywalności produkcji, poprawia możliwości planowania i rozwoju gospodarstwa.

Samowystarczalność i ekonomia asocjacyjna

Model samowystarczalnego, niezależnego ekonomicznie gospodarstwa znacząco różni się od obecnie dominującego systemu opartego na interwencjonizmie państwowym i jest drugim kluczowym aspektem modelu biodynamicznego. System dopłat i regulacji cen zapewnia wprawdzie funkcjonalność ekonomiczną na poziomie pojedynczego gospodarstwa, lecz nie prowadzi do jego samodzielności ani rezyliencji. W efekcie zaburza również równowagę w ramach całego systemu żywnościowego – znaczna część rentowności przesuwana jest w stronę przetwórców i hurtowych dystrybutorów, którzy czerpią największe korzyści z interwencji centralnych, m.in. przez sztucznie zaniżone ceny surowców. Ekonomia asocjacyjna, rozwinięta przez Rudolfa Steinera [9], proponuje inny model współpracy gospodarczej – oparty nie na wolnym rynku ani na centralnym planowaniu, lecz na dobrowolnym porozumieniu (asocjacji) pomiędzy producentami, handlowcami i konsumentami. Wpisuje się to bezpośrednio w postulat sprawiedliwego łańcucha wartości

i godziwych dochodów dla rolników, zawarty w strategii Unii Europejskiej „Od pola do stołu” [3]. Ekonomia asocjacyjna może stanowić praktyczną propozycję wdrożenia tego postulatu. Oba przedstawione elementy – wkomponowanie gospodarstwa w lokalne środowisko naturalne oraz jego ekonomiczną samowystarczalność – stanowią fundamenty metody biodynamicznej. Choć zostały sformułowane ponad sto lat temu, pozostają niezwykle aktualne wobec współczesnych wyzwań globalnych systemów żywnościowych. Z perspektywy transformacyjnej, metoda biodynamiczna oferuje wzorzec zmieniający paradygmat myślenia: od produkcji maksymalnej ku zrównoważonej i samoregulującej. Tym samym wpisuje się w podejście systemowe, traktujące rolnictwo jako integralny element ekosystemu.

Podsumowanie

Oczywiście, model biodynamiczny nie rozwiązuje wszystkich problemów. Niższa wydajność, potrzeba głębszej wiedzy opartej na doświadczeniu oraz ograniczona skalowalność to realne bariery. Niemniej jednak, jako część szerszej mozaiki rozwiązań, może odegrać istotną rolę w odbudowie odporności systemów żywnościowych.

Literatura

[1] Antonovsky A. 1996. „The Salutogenic Model as a Theory to Guide Health Promotion”, *Health Promotion International* 11 (1): 11–18.
[2] Gerten D., Heck V., Jägermeyr J., Bodirsky B. L., Fetzer I., Jalava M., ...&Schellnhuber H. J. 2020. „Feeding Ten Billion People Is Possible within Four Terrestrial Planetary Boundaries”, *Nature Sustainability* 3 (3): 200–208.
[3] European Commission. 2020. *Farm to Fork Strategy: For a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 381: 1–9.
[4] OECD. 2021. *Making Better Policies for Food Systems*. Paris: OECD Publishing.
[5] OECD (2025), „Practical approaches to develop resilience strategies for food systems”, OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 217, OECD Publishing, Paris. OECD. 2025. „Practical Approaches to Develop Resilience Strategies for Food Systems”, *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, no. 217. Paris: OECD Publishing.
[6] Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin III F. S., Lambin E., ... & Foley J. 2009. „Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity”, *Ecology and Society* 14 (2).
[7] Seufert V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. 2012. „Comparing the Yields of Organic and Conventional Agriculture”, *Nature* 485 (7397): 229–32.
[8] Steiner R. 1924. *Kurs Rolniczy*.
[9] Steiner R. (1922) 2002. *Nationalökonomischer Kurs*. GA 340.
[10] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2022. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*.

no, że lignity lub węgiel subbitumiczny w lignicie mogą mieć hamujący wpływ na fermentację metanową [5]. Arctech Inc. [6] udowodnił, że może osiągnąć dobrą wydajność procesu biogazyfikacji węgla poprzez dobór odpowiednich mikroorganizmów i warunków procesu. Oprócz produkcji gazu, doskonale wykorzystuje również pośrednie produkty procesu do produkcji nawozów. Mikroflora wyizolowana z jelit termitów została wykorzystana do rozkładu lignitu. Prowadzone są również badania nad fermentacją produktów zgazowania węgla do metanu – z 4 moli wodoru, uzyskano 2,5 g metanu poprzez fermentację metanową, prowadzoną przez bakterie przygotowane i wyizolowane przez firmę komercyjną [7]. Oprócz bakterii, w procesie biogazyfikacji powierzchniowej wykorzystywane są również pleśnie, które są zdolne do enzymatycznego rozkładu materii organicznej, będącej składnikiem lignitu (tabela 1). W drugim etapie przeprowadzany jest proces fermentacji beztlenowej.

Biogazyfikacja to wieloetapowy rozkład złożonej węglowej matrycy organicznej [5]. Proces ten obejmuje upłynnienie i hydrolizę nierozpuszczalnych związków oraz gazyfikację powstałych produktów pośrednich. Towarzyszy temu częściowa lub całkowita mineralizacja materii organicznej. Charakterystyczną cechą fermentacji metanowej jest jej fazowanie. Proces ten składa się z czterech etapów, przeprowadzanych przez różne grupy bakterii, które muszą ściśle ze sobą współpracować [9]. Pierwsza faza obejmuje hydrolizę polimerycznych związków organicznych. Druga faza to acidogeneza (faza kwasowa), podczas której pod wpływem bakterii beztlenowych powstają proste kwasy organiczne i alkohole. Procesowi temu towarzyszy uwalnianie dwutlenku węgla i wodoru. W trzeciej fazie kwasy organiczne i alkohole są przekształcane w kwas octowy, dwutlenek węgla i wodór. Faza ta nazywana jest acetogenezą (faza octanowa). Zarówno reakcje acidogenezy, jak i acetogenezy mogą zachodzić swobodnie, jeśli wodór wytwarzany w tych reakcjach zostanie usunięty ze środowiska. Wodór jest usuwany przez bakterie metanowe, które w czwartej fazie wykorzystują wodór i dwutlenek węgla do syntezy metanu. Metan może być również wytwarzany bezpośrednio z kwasu octowego. Badania pokazują, że około 70% metanu powstaje podczas fermentacji metanowej z kwasu octowego, a około 30% z wodoru i dwutlenku węgla. Kluczowym etapem procesu fermentacji metanowej jest faza aktywności bakterii metanogennych. Bakterie te decydują o ilości, jakości i szybkości uwalniania biogazu. Charakteryzują się wysoką wrażliwością nie tylko na substancje toksyczne, które mogą być wprowadzane z substratem, ale także na

Tabela 1. Przykłady mikroorganizmów mających zdolność biokonwersji węgla [8].

Królestwo	Klasa	Rodzaj węgla – stopień uwęglenia
Grzyby	Basidiomycetes Coriolus versicolor Phanerochaete chrysosporium Poria placenta Piptoporus betulinus Coprinus sclerotigenis	wysoki lub niski stopień uwęglenia lignitów, lignit, węgiel bitumiczny
	Deuteromycetes Trichoderma atroviride Fusarium oxysporum Aspergillus sp.	niski stopień karbonizacji, głównie lignity, węgiel brunatny i węgiel podbitumiczny
	Saccharomyces Candida sp.	niski stopień uwęglenia węgla brunatnego i sub-bitumicznego
Bakterie	Actinomycetales Streptomyces badius Streptomyces setonii	niski stopień uwęglenia węgla brunatnego i sub-bitumicznego
	Firmicutes Bacillus sp. Proteobacteria Pseudomonas sp.	niski stopień uwęglenia węgla brunatnego i sub-bitumicznego

związki chemiczne, które mogą powstawać w wyniku przemian biochemicznych w różnych fazach procesu. Metoda biogazyfikacji in situ ma dwie główne zalety [5]: wykorzystanie lignitu o wysokiej zawartości wilgoci w procesie biogazyfikacji oraz możliwość zastosowania procesu do młodych i nie w pełni dojrzałych węgli, które mają strukturę bliższą pierwotnym składnikom organicznym niż do węgla wysokokalorycznych.

W ramach projektu badawczego realizowanego w Polsce w latach 2013-2016 przez KGHM Cuprum wspólnie z Narodowym Centrum Nauki (UMO-2011/03/D /ST8/04467) pt.: „Badania procesu mikrobiologicznego rozkładu węgla brunatnego do metanu w celu określenia możliwości zagospodarowania małych, pozabilansowych złóż”, kierowanego przez kierownika projektu, dr inż. Agnieszkę Szubert, osiągnięto następujące wyniki [10]:

- wyizolowano, zbadano i zaadaptowano rodzime konsorcjum mikroorganizmów zdolne do przetwarzania węgla brunatnego na biogaz o wysokiej zawartości metanu do 72% objętości;
- przeprowadzono eksperyment biogazyfikacji polskiego węgla brunatnego z dwóch różnych złóż (w tym kopalni Turów) z wykorzystaniem wyizolowanego konsorcjum mikroorganizmów;
- określono podstawowe parametry procesu biogazyfikacji;
- opracowano kryteria umożliwiające stosowanie metody biogazyfikacji w rzeczywistych warunkach;
- opracowano ogólną koncepcję procesu z oceną najważniejszych aspektów procesu.

Jednak do rozpoczęcia metanogenezy wymagane są pewne odpowiednie warunki [11], tj. zawartość wilgoci, stosunek C:N:P:S, reakcja i temperatura otoczenia, całkowity brak tlenu, bardzo niski potencjał redoks (około 240 mV) i istnienie końcowych akceptorów. Większość tych warunków można znaleźć w złożach lignitu, podczas degradacji kompleksu wymagane są związki chemiczne – składniki węgla muszą uzyskać wystarczającą ilość małych cząsteczek końcowych akceptorów. W tym celu potrzebne są inne mikroorganizmy, które są degradowane w lignicie [12, 13, 14, 15]. Tylko niektóre z nich można wykorzystać w środowisku depozycyjnym, w szczególności te, które mogą być degradowane w warunkach beztlenowych. To zasadniczo zmniejsza spektrum dostępnych mikroorganizmów, które potencjalnie nadają się do takiego zastosowania. Tutaj obiecującymi grzybami beztlenowymi wydają się być *Neocallimastigales* [16], które żyją w przewodzie pokarmowym roślinożerców i mogą pozostawać w symbiozie z metanogennymi *Archaea*. Wykorzystanie takich grzybów byłoby alternatywną drogą do rozwiązania proponowanego przez firmę Arctech [17] wykorzystującego beztlenowe mikroorganizmy wyekstrahowane z termitów należących do rodzajów *Zootermopsis* i *Nasutitermes* do degradacji związków organicznych.

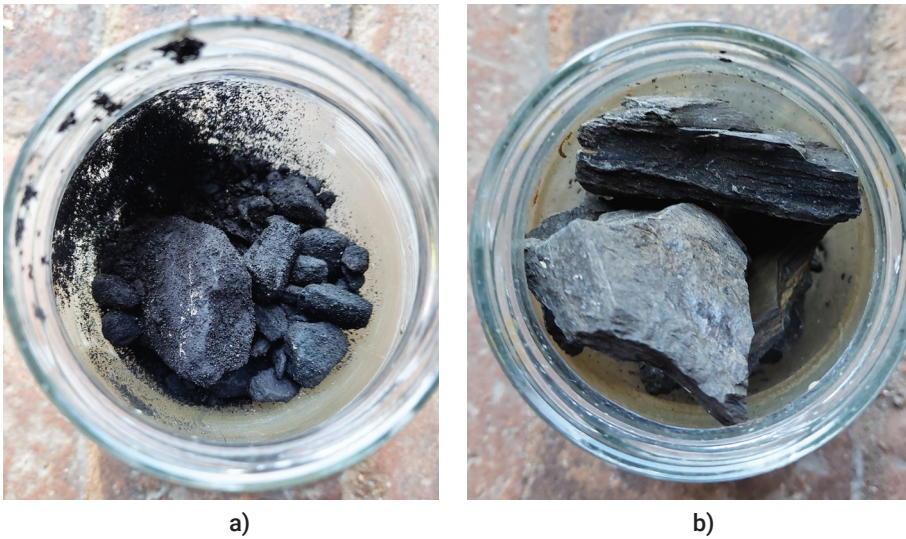
Zaprezentowane technologie z pewnością można zaliczyć do „czystych technologii węglowych”. Umożliwiają one zwiększenie efektywności produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego, wychwytywanie i składowanie CO₂, czy wykorzystanie węgla brunatnego do produkcji biogazu. Wydaje się, że w niedale-

kiej przyszłości wyznaczą one kierunek rozwoju polskiej energetyki opartej na węglu brunatnym. Polska powinna również wykorzystać możliwości, jakie dają technologie naziemnego zgazowania węgla brunatnego, co umożliwi rozwój energetyki i chemii bazującej na krajowych zasobach surowcowych. W przypadku podziemnego zgazowania węgla brunatnego, pomimo że metoda ta jest badana od kilkadziesiąt lat, wyniki nie pozwalają jeszcze na stwierdzenie, że jest to metoda w pełni opanowana pod kątem przebiegu procesu zgazowania węgla w złożu. Dlatego też postuluje się jak najszybsze przeprowadzenie badań i eksperymentów na krajowych złożach węgla brunatnego i kamiennego. Zastosowanie tej technologii na powszechną skalę umożliwiłoby budowę rozproszonego systemu zasilania w energię, co przyczyniłoby się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju [6].

Coraz lepsza znajomość mikrobiologicznych, biochemicznych i termodynamicznych podstaw fermentacji metanowej skutkuje wzrostem wydajności procesu i znacznym rozszerzeniem stosowanych substratów organicznych. Oprócz tradycyjnych substratów (ścieki z przemysłu spożywczego i papierniczego), coraz częściej przeprowadza się beztlenową biodegradację fenoli, surfaktantów, a nawet produktów petrochemicznych. Obecnie w warunkach beztlenowych nie ulegają biodegradacji wcale lub bardzo powoli jedynie węglowodory nienasycone i niektóre tworzywa sztuczne [18, 19]. Uważa się, że w przyszłości klasyczne wydobycie i spalanie węgla zostanie częściowo wyeliminowane na rzecz niekonwencjonalnych technologii przetwarzania węgla bezpośrednio w złożu, takich jak podziemne zgazowanie (produkcja gazu syntezowego) lub mikrobiologiczne uwodornienie (produkcja metanu). Choć procesy biogazyfikacji są obecnie dopiero w fazie badań, budowa instalacji pilotażowych na starannie wyselekcjonowanych złożach wydaje się być dziś wysoce uzasadniona.

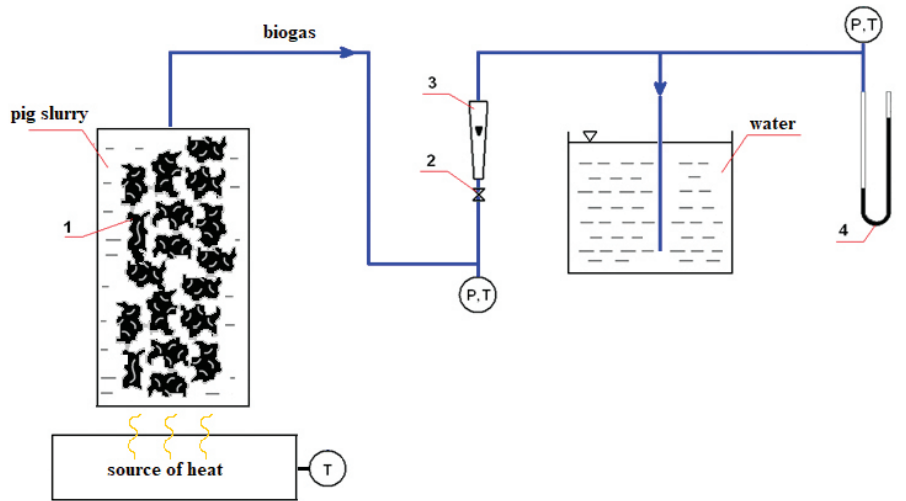
Głównym składnikiem biogazu rolniczego i węgla biokonwertowanego jest metan, czyli gaz energetyczny, który jest również zaliczany do gazów cieplarnianych (podobnie jak dwutlenek węgla). Jego produkcja wiąże się zatem z koniecznością zapewnienia odpowiednich warunków szczelności nadkładu. Wyniki sugerują, że węgle mniej dojrzałe, z mniejszą ilością zwęglonej materii organicznej, są bardziej sprzyjającym środowiskiem dla rozwoju mikroorganizmów. Stąd wynika, że ta grupa węgla będzie bardziej efektywna w konwersji na gaz bioenergetyczny, który może być wykorzystany do wszelkich działań proekologicznych.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje przedstawione na podstawie dotychczas prze-



Rys.1. Próbką badawczą lignitu: a) rozdrobniona, miękka, duża powierzchnia do unieruchomienia; b) grudkowata, twarda (kawałki), mała powierzchnia do unieruchomienia.

Fot. Grzegorz Wałowski



Rys. 2. Produkcja biogazu rolniczego w złożu węgla brunatnego z wykorzystaniem substratu polidispersyjnego – schemat: 1 – złożo węgla brunatnego (próbka), 2 – zawór regulacyjny, 3 – rotametr, 4 – manometr różnicy ciśnień, P – manometr, T – termometr.

(opracowanie własne)

prowadzonych badań na świecie – artykuł przedstawia łączone właściwości polidispersyjnego substratu, jakim jest gnojowica świńska, stosowanego w biogazyfikacji węgla brunatnego. Problemem tym zainteresował się Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy w Polsce, a mianowicie Zespół Badawczy Odnawialnych Źródeł Energii w Poznaniu.

Cel i zakres

Opracowano laboratoryjny reaktor monosubstratowy do fermentacji gnojowicy świńskiej w złożu węgla brunatnego metanowego. Celem badań przedstawionych w artykule jest ocena ilości biogazu rolniczego wytwarzanego

w procesie mezofilowej fermentacji metanowej z polidispersyjnego substratu, przy użyciu złoża węgla brunatnego umieszczonego w fermentorze. Podjęto próbę ustalenia warunków procesu dla immobilizacji na złożu węgla brunatnego (w zależności od struktury fragmentacji), co pozwala na zwiększenie powierzchni czynnej dla flory bakterii fermentacyjnych, wpływając tym samym na ilość wytwarzanego biogazu.

Materiały i metody

Materiałem polidispersyjnym była gnojowica świńska wyprodukowana w gospodarstwie ze 1100 tucznikami DanBred [20] utrzymywanymi w systemie rusztowym [21]. Sposób żywienia świń w zasadzie determinuje produkcję

substratu (obornika świńskiego). Zastosowane żywienie w postaci Superkoncentratu 600 plus jest mieszkanką paszową składającą się ze śruty poekstrakcyjnej: śruty sojowej, śruty rzepakowej, węgla wapnia, fosforanu, mieszanki zielonej, suplementu dla tuczników powyżej 30 kg z dodatkiem fitobiotyku i zakwaszacza – zawartość składników analitycznych w 1 kg [21]. Badania przeprowadzono na złożu węgla brunatnego z Kopalni Węgla Brunatnego w Bełchatowie, Polska.

Przygotowanie próbki

Sposób przygotowania substratu, produkujący surowy biogaz, charakteryzuje się tym, że w szklanym naczyniu (fermentorze) o objętości 0,001 m³ zbudowano złożo w postaci węgla brunatnego. Po wykonaniu złoża do wysokości 1/2 fermentora, wypełniono je polidispersyjnym substratem (obornikiem świńskim) do wysokości 3/4 fermentora. Po uszczelnieniu fermentora, z fermentora poprowadzono elastyczny wąż do otwartego zbiornika zalanego wodą. W ten sposób przygotowano dwie próbki testowe: próbkę dla złoża węgla brunatnego rozdrobnionego i próbkę dla złoża węgla brunatnego grudkowego (płaskie fragmenty złoża) – rys. 1.

Stanowisko badawcze

Produkcja laboratoryjna biogazu rolniczego w złożu węgla brunatnego z wykorzystaniem substratu polidispersyjnego przedstawiona jest na rys. 2.

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, którego głównym elementem było szklane naczynie (fermentor) służące do produkcji biogazu w procesie mezofilowym. Fermentor eksploatowano w warunkach wymiany ciepła z otoczeniem. Stanowisko laboratoryjne wyposażono w konwekcyjne źródło ciepła, termometr do pomiaru ciepła i rotametr do pomiaru przepływu biogazu w zakresie (45-80)% CH₄.

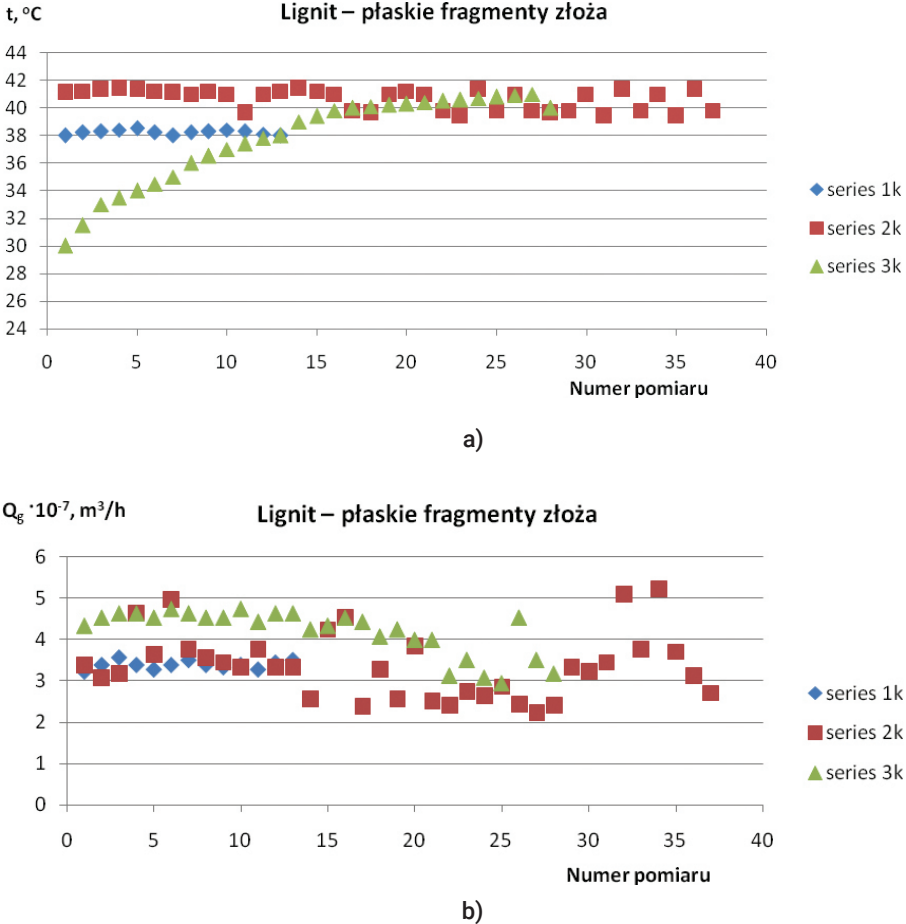
Zakres i metodologia badań

Metodyka badań koncentrowała się na:

- 1) badaniach reologicznych gnojowicy świńskiej;
- 2) liczbie bakterii heterotroficznych w połączeniu gnojowicy świńskiej z węglem brunatnym;
- 3) pomiarze temperatury i szybkości przepływu biogazu.

Badania eksperymentalne dotyczyły oceny pomiaru ilości biogazu w warunkach procesu biogazyfikacji węgla brunatnego (złożo granulowane) z wykorzystaniem polidispersyjnego substratu.

Złożo węgla brunatnego wykorzystano do dwóch niezależnych układów badawczych,



Rys. 3. Zmiany parametrów procesu fermentacji mezofilowej z wykorzystaniem polidispersyjnego substratu dla lignitu – płaskie fragmenty złoża do produkcji biogazu rolniczego: a) zależność strumienia gazu od pomiaru; b) zależność temperatury od pomiaru (opracowanie własne)

po wcześniejszym przygotowaniu próbek badawczych. Do stanowiska badawczego doprowadzono strumień ciepła, który powodował przemieszczanie się gazu w postaci pęcherzyków na powierzchni fermentującego węgla brunatnego. Biogaz przemieszczający się ku górze w fermentorze był transportowany przewodem elastycznym do otwartego zbiornika, w którym obserwowano bulgotanie. Nadciśnienie biogazu w fermentorze pokonuje opór pomiędzy fragmentami węgla brunatnego a medium ciekłym w postaci polidispersyjnego substratu. Testy procesowe przeprowadzono dla każdego złoża (materiału badawczego) w trzech seriach, każda seria składała się z maksymalnie 40 pomiarów (temperatury i strumienia biogazu). Następnie porównano dwa materiały badawcze dla każdej serii testów, biorąc pod uwagę natężenie przepływu biogazu, w celu analizy produkcji biogazu i przepuszczalności gazu stanu złoża lignitu.

Rezultaty i dyskusja

Wyniki biodegradacji węgla brunatnego podczas fermentacji metanowej

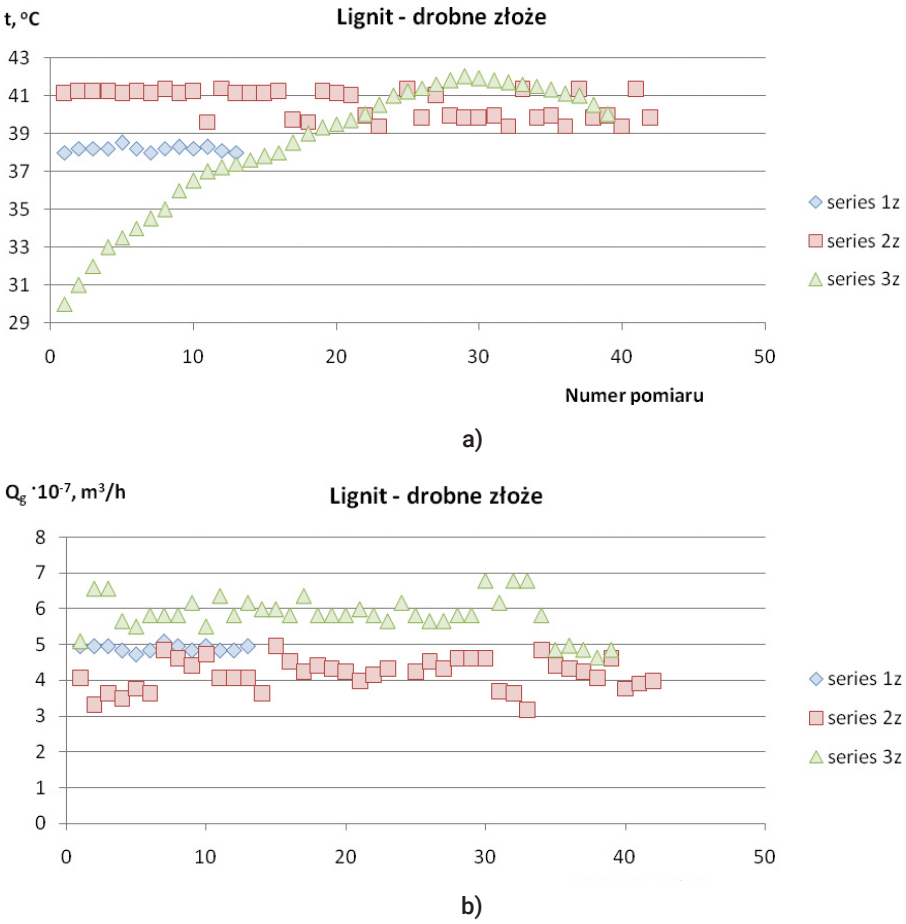
W połączeniu (1:1) gnojowicy świńskiej i węgla brunatnego liczbę bakterii heterotroficznych określono metodą rozcieńczeń seryjnych: 10 gramów próbki zawieszono w sterylnym roztworze soli fizjologicznej (0,85% roztwór NaCl; sterylizowano w temperaturze 121°C) i rozcieńczono do 10-12. Próbkę umieszczono w głębokich płytkach Petriego (90 mm), pokryto agarem nu-trient (Merck) i hodowano w temperaturze 28°C przez 72 godziny. Hodowlę odczytano za pomocą oceny makroskopowej, a następnie potwierdzono automatycznym licznikiem kolonii Scan 500. Liczbę bakterii heterotroficznych przeliczono na gram próbki i wyrażono w jednostkach tworzących kolonie, co wynosi 278·10⁵ jtk/g [22]

Badania eksperymentalne dotyczyły układu pomiarowego do oceny ilości biogazu w złożu granulowanym w warunkach mezofilowych dla procesu produkcji biogazu. Podstawą oceny produkcji biogazu jest przebieg zmian strumienia biogazu w zależności od temperatury. Interpretując rys. 3 należy wskazać, że dla złoża lignitu (węgla brunatnego) zawierającego płaskie fragmenty przy wzroście tempera-

tury od 30°C do 38°C (rys. 3a, seria 3k, pomiar nr 15), strumień biogazu z rys. 3b jest stabilny w zakresie od 4,1·10⁻⁷ do 5·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Natomiast powyżej temperatury 38°C do 41°C strumień biogazu z serii 3k charakteryzuje się tendencją spadkową w zakresie od 4·10⁻⁷ do 3·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Jest to spowodowane nadmiernym przegrzaniem mieszaniny polidispersyjnej, w którym zachodzi hamowanie procesu. Mikroorganizmy metanogenne dla serii 1k zachowują się prawidłowo – można wyraźnie zaobserwować, że dla temperatury 38°C produkcja biogazu waha się od 3·10⁻⁷ do 3,5·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Ciekawostką są piki (numery pomiarów: 4, 6, 15, 16, 18, 20, 32, 34) w serii 2k, dla strumienia biogazu o tendencji spadkowej w zakresie od 3,2·10⁻⁷ do 2,5·10⁻⁷ m³·h⁻¹, przy spadku temperatury od 41°C do 39°C – jest to niewątpliwie spowodowane obecnością w złożu węgla brunatnego zawierającego płaskie fragmenty składników odżywczych wspomagających proces dynamiki produkcji biogazu.

Interpretując rys. 4, należy wskazać, że dla złoża węgla brunatnego zawierającego drobne fragmenty przy wzroście temperatury od 30°C do 38°C (rys. 4a seria 3z, pomiar nr 15) strumień biogazu z rys. 4b jest stabilny w zakresie od 5,0·10⁻⁷ do 6,3·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Natomiast powyżej temperatury 38°C do 42°C strumień biogazu z serii 3k charakteryzuje się tendencją spadkową w zakresie od 5·10⁻⁷ do 4,8·10⁻⁷ m³·h⁻¹ – sytuacja procesowa jest prawidłowa jak dla lignitu – płaskie fragmenty złoża. Podobne zachowanie mikroorganizmów metanogennych można zaobserwować również dla serii 1z i 2z, jak i dla serii 1k i 2k – z wyjątkiem pików, które dla złoża węgla brunatnego zawierającego drobne fragmenty nie były tak obfite w składniki odżywcze wspomagające proces dynamiki produkcji biogazu.

Porównując przepływy strumienia biogazu dla każdej serii w odniesieniu do dwóch różnych układów złożów węgla brunatnego, intensywność produkcji biogazu można zaobserwować na rys. 5. Na rys. 5a przepływ biogazu można zaobserwować na poziomie 5·10⁻⁷ m³·h⁻¹ dla węgla brunatnego – złożo drobne, natomiast dla węgla brunatnego – płaskie fragmenty złoża, przepływ biogazu kształtuje się na poziomie 3,5·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Na rys. 5b średni przepływ biogazu można zaobserwować na poziomie 4,2·10⁻⁷ m³·h⁻¹ dla węgla brunatnego - złożo drobne, natomiast dla węgla brunatnego – płaskie fragmenty złoża, przepływ biogazu kształtuje się na poziomie 3,2·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Na rys. 5c średni przepływ biogazu można zaobserwować na poziomie 5,9·10⁻⁷ m³·h⁻¹ dla lignitu – złoża drobnego, natomiast dla lignitu – płaskich fragmentów złoża przepływ biogazu kształtuje się na poziomie 4·10⁻⁷ m³·h⁻¹. Należy stwierdzić,



Rys. 3. Zmiany parametrów procesu fermentacji mezofilowej z wykorzystaniem polidispersyjnego substratu dla lignitu – drobne złożo do produkcji biogazu rolniczego: a) zależność strumienia gazu od pomiaru; b) zależność temperatury od pomiaru (opracowanie własne)

że dla lignitu – złoża drobnego występuje większa wymiana fazowa, gdyż układ złoża zapewnia więcej miejsca na adhezję mikroorganizmów metanogennych. Natomiast dla lignitu – płaskich fragmentów złoża występuje mniejsza wymiana fazowa, czyli mniejsza produkcja biogazu.

Podsumowanie

Podstawą sukcesu produkcji biogazu jest przede wszystkim dostępność substratów. Kluczowym zagadnieniem związanym z rozwojem sektora biogazu jest poszukiwanie nowych i lepszych technologii umożliwiających intensyfikację procesu produkcji biogazu. W gospodarce światowej pojawiają się nowe koncepcje i tendencje dotyczące niekonwencjonalnych Czystych Technologii Energetycznych, których działania mają na celu ograniczenie szkodliwych skutków procesów, racjonalizację wykorzystania paliw i surowców odnawialnych oraz unieszkodliwienie odpadów, takich jak gnojowica świńska.

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych nad wykorzystaniem polidispersyjnego substratu (gnojowicy świń-

skiej) na potrzeby produkcji biogazu z wykorzystaniem złoża węgla brunatnego. Wykonano skojarzenie immobilizacji dla lignitu – złoża drobnego w stosunku do lignitu – płaskich fragmentów złoża, wraz z polidispersyjnym substratem charakteryzującym się właściwościami metanowymi – stanowi to ukierunkowanie na neokarbonizację.

Wykazano, że:

- opracowany system biogazyfikacji węgla brunatnego z udziałem substratu polidispersyjnego w fermentorze (naczyniu laboratoryjnym) zapewnia produkcję biogazu w warunkach braku izolacji termicznej fermentora;
 - dla złoża węgla brunatnego strumień biogazu jest stabilny wraz ze wzrostem temperatury; natomiast powyżej temperatury 38°C do 42°C strumień biogazu charakteryzuje się tendencją spadkową.
- Porównując przepływy strumienia biogazu można zaobserwować:
- intensywność produkcji biogazu dla węgla brunatnego (mniejsze złożo), następuje większa wymiana fazowa, ponieważ układ złoża zapewnia więcej miejsca na adhezję mikroorganizmów metanogennych,

Dr inż. Anita KONIECZNA

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy
Zespół Badawczy Analiz Ekonomicznych i Energetycznych, Oddział w Warszawie
ORCID: 0000-0001-8874-2399

■ z kolei w przypadku węgla brunatnego (płaskich fragmentów złoża) występuje mniejsza wymiana fazowa, czyli mniejsza produkcja biogazu.

Wykonane badania reologiczne gnojowicy świńskiej dowiodły właściwości pieniące się substratu przy 25°C i 500 rpm dla lepkości kinematycznej 27,5 mPa. Charakterystyczne właściwości pieniące przejawia układ polidispersyjny, jakim jest gnojowica świńska.

Literatura

[1] Bednarczyk, J. Development of underground coal gasification technology and prospects for its industrial implementation. 5th International Brown Coal Mining Congress. Mining and Geoengineering 2007, 31, 2, Kraków

[2] Kasztelewicz, Z.; Polak, K.; Zajączkowski, M. Methods of lignite mining and processing in the first half of the 21st century. Węgiel Brunatny nr 65, Bogatynia, 2008

[3] Kasztelewicz, Z.; Polak, K.; Zajączkowski, M. Possibilities of implementing clean coal technologies in the lignite industry in Poland. Mining and Geoengineering 2009, 33, 2, 233-240

[4] Faulkousa, R.M.; Hofrichter, M. Biotechnology and microbiology of coal degradation. Applied Microbiology and Biotechnology 1999, 52, 25–40

[5] Iciek, J.; Ziemiński, K.; Zawadzka, A.; Kowalska, M. Alternative methods of obtaining energy from lignite. Mining and Geoengineering 2009, 33, 2, 151-157

[6] Biological Coal Gasification. Available online: <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasification/biological-coal-gasification> (dostęp: 20.05.2021)

[7] Wise, D.L.; Cooney, C.L.; Augenstein, D.C. Anaerobic fermentation of CO₂, H₂ and CO to methane. Biotechnology and Bioengineering 2008, 20, 8, 1153–1172

[8] Johnson, E.R.; Klasson, K.T.; Basu, R.; Volkwein, J.C.; Clausen, E.C.; Gaddy, J.L. Microbial conversion of high-rank coals to methane. Applied Biochemistry and Biotechnology 1994, 5, 329–338

[9] Han, W.; Hai, L.; Yingbo, D.; Mengqi, S.; Yangzi, L. Experiments on the gas production of brown coal degraded by exogenous methanogens. Petrplrum Exploration and Development 2012, 39, 6, 813-817

[10] Król, M. Coal gasification – conditions for industrial implementation. Presentation from the Meeting of the Parliamentary Group for Mining and Energy, KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Research and Development Center, Warsaw, May 10, 2017

[11] Janiga, M.; Kapusta, P.; Kania, M.; Szubert, A. Microbiological coal biogasification under laboratory conditions – biogas quantity and quality. NAFTA-GAZ, Year LXXIV, 2018, 9/2018, 647- 654. DOI: 10.18668/NG.2018.09.03

[12] Cohen, M.S.; Gabriele, P.D. Biodegradation of coal by the fungi Polyporous versicolor and Poria placenta. Appl. Environ. Microbiol. 1982, 44, 23–27

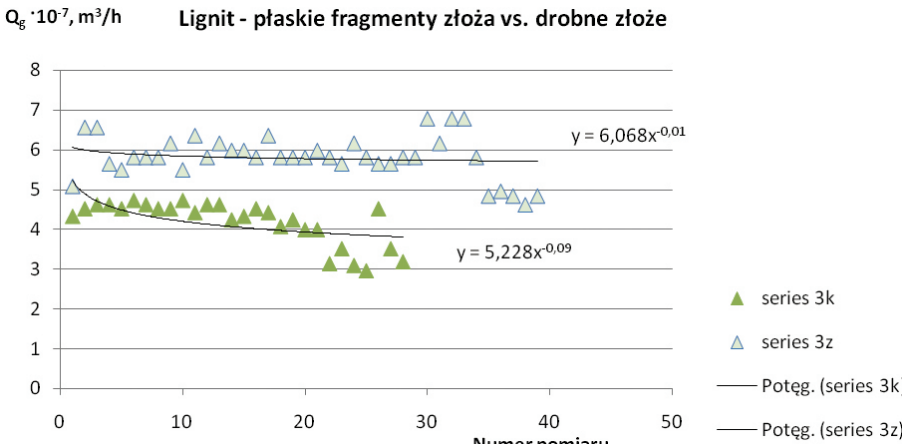
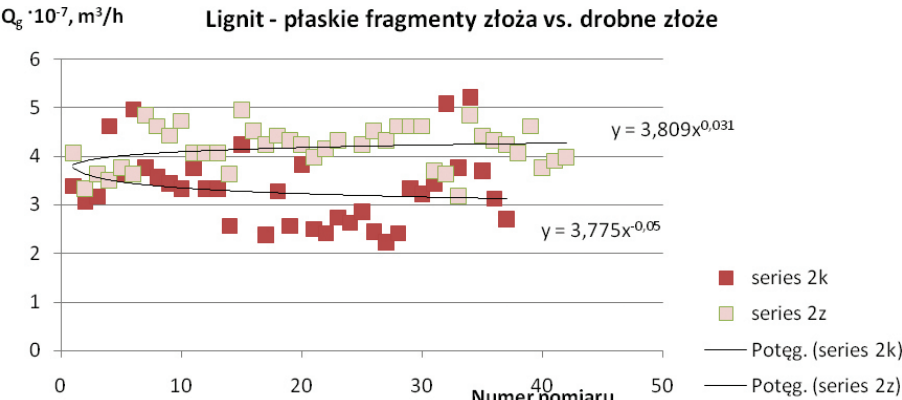
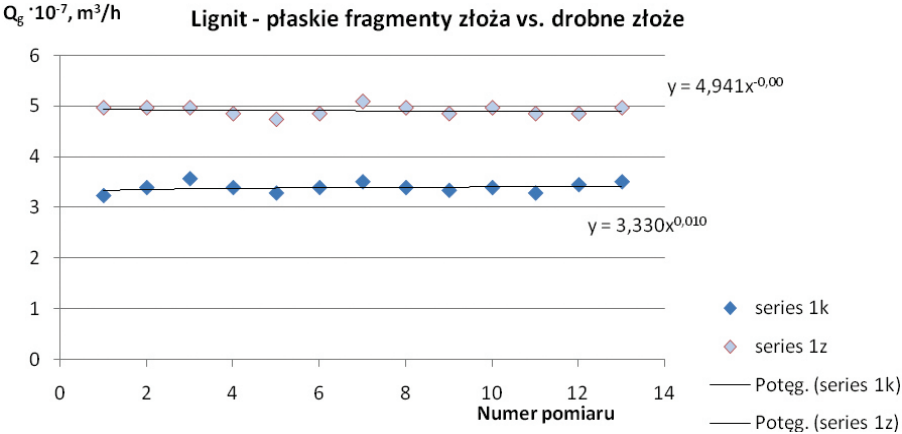
[13] Machnikowska, H.; Pawelec, K.; Podgórska, A. Microbial degradation of low rank coals. Fuel Proces. Technol. 2002, 77–78, 17–23, doi: 10.1016/S0378-3820(02)00064-4

[14] Mochimaru, H.; Yoshioka, H.; Tamaki, H.; Nakamura, K.; Kaneko, N.; Sakata, S.; Imachi, H.; Sekiguchi, Y.; Uchiyama, H.; Kamagata, Y. Microbial diversity and methanogenic potential in a high temperature natural gas field in Japan. Extremophiles 2007, 11, 453–461, doi: 10.1007/s00792-006-0056-8

[15] Osipowicz, B.; Jablonski, L.; Siewinski, A.; Augustyn, D.; Rymkiewicz, A. Screening tests on the biodegradation of organic coal extract by selected fungi. Bioresour. Technol. 1996, 55, 195–200, doi: 10.1016/0960-8524(96)00193-9

[16] Fliegerova, K.; Mrazek, J.; Hoffmann, K.; Zabranska, J.; Voigt, K. Diversity of anaerobic fungi within cow manure determined by ITS1 analysis. Folia Microbiol (Praha) 2010, 55, 319–325, doi: 10.1007/s12223-010-0049-y

[17] Boldrin A., Baral K.R., Fitamo T., Vazifekhoran A.H., Jensen I.G., Kjaergaard I., Lyng K.-A., Nguyen Q.V., Nielsen L.S., Triolo J.M. Optimised biogas production from the codigestion of sugar beet with pig slurry. Integrating energy, GHG and economic accounting. Energy 2016, 112, 606–617.



Rys. 5. Intensywność produkcji biogazu w zależności od rozmieszczenia złoża węgla brunatnego: a) seria 1; b) seria 2; c) seria 3 (opracowanie własne)

[18] Voytovych, I.; Malovany, M.; Zhuk, V.; Mukha, O. Facilities and problems of processing organic wastes by family-type biogas plants in Ukraine. J. Water Land Dev. 2020, 45, 185–189

[19] [19] Wałowski G. Assessment of polydisperse substrate flow in a fermentor for computational fluid dynamics modeling. J. Water Land Dev. 2022. No. 56 (X–XII): p. 1–7, DOI: 10.24425/jwld.2022.143715

[20] Wałowski G. Development of biogas and bioraffinery systems in Polish rural communities. J. Water Land Dev. 2021. No. 49 p. 156–168. DOI 10.24425/jwld.2021.137108.wDanbred Genes for Global Pig Production. Available online: www.danbred.com (accessed on 20 May 2021).

[21] Klimek, K.; Kaplan, M.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Anders, D.; Dybek, B.; Karwacka, A.; Wałowski, G. Production of Agricultural Biogas with the Use of a Hydrodynamic Mixing System of a Polydisperse Substrate in a Reactor with an Adhesive Bed. Energies 2021, 14, 3538. <https://doi.org/10.3390/en14123538>

[22] Analysis report issued by the Microbiology Research Laboratory, Department of Grasslands, Institute of Technology and Life Sciences in Falenty, 2020, unpublished material

Emisje gazów cieplarnianych i amoniaku w modelowych technologiach uprawy zbóż jarych i ozimych – kontynuacja badań

Greenhouse gas and ammonia emissions from spring and winter cereal crops – further study

Oszacowano emisje poszczególnych gazów cieplarnianych (N₂O, CH₄, CO₂) i amoniaku (NH₃) z opracowanych we wcześniejszym etapie badań wariantów technologicznych uprawy żyta i jęczmienia jarego. Rozpatrywano emisje z nawożenia i z zużycia paliwa. Ilości przeliczono zgodnie z potencjałem cieplarnianym poszczególnych gazów (GWP – *global warming potential*) w celu wykazania ilości ogółem w analizowanych wariantach w jednostce ekwiwalentnej, co umożliwia ich porównywanie ze względu na ilości emisji GHG (*greenhouse gases*) do atmosfery. Do szacowania emisji amoniaku zastosowano bardziej dokładną metodę Tier 2 uwzględniającą warunki glebowe i strefę klimatyczną. Obliczone ilości emisji zanieczyszczeń odniesiono do jednostki powierzchni (hektar) uprawy żyta i jęczmienia jarego oraz do jednostki plonu (tona).

Słowa kluczowe: produkcja roślinna, technologie uprawy żyta, technologie uprawy jęczmienia jarego, nawożenie NPK, emisje gazów cieplarnianych, efekt cieplarniany, emisje amoniaku

Emissions of individual greenhouse gases (N₂O, CH₄, CO₂) and ammonia (NH₃) were estimated for the technological variants of spring barley and rye cultivation developed in the earlier stage of the study. Emissions from fertilization and fuel consumption were considered. The amounts were converted according to the global warming potential (GWP) of each gas to determine the total emissions in the analyzed variants in CO₂-equivalent units, which allows for comparison of greenhouse gas (GHG) emissions to the atmosphere. For ammonia emissions, a more accurate Tier 2 method was used, which takes into account soil conditions and climate zone. The calculated emission amounts were related to the unit area (hectare) of rye and spring barley cultivation as well as to the unit of yield (ton).

Keywords: tillage system, conventional tillage, conservation tillage, reduced tillage, no-tillage, humus

Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne to obecnie jeden z największych problemów stanowiący przedmiot badań w wielu dziedzinach nauki. Tylko interdyscyplinarne podejście do tematu może przynieść oczekiwane korzyści w postaci stabilizacji tempa zachodzących zmian i zmniejszenia ich negatywnych skutków oddziaływania na środowisko naturalne, zdrowie i komfort życia ludzi. Wzrost temperatury o 2°C w stosunku do ery przedindustrialnej zwiększa ryzyko wystąpienia nieodwracalnych zmian globalnie. Są to przesłanki do intensyfikacji kontynuowanych i podejmowanych nowych działań na rzecz ograniczenia tego wzrostu do 1,5°C. Średnia temperatura na świecie w 2024 roku była wyższą o 1,55°C od poziomu temperatury sprzed okresu rewolucji przemysłowej. Średnia temperatura ostatniej dekady – lata 2015-2024 – jest najwyższa w historii. Za globalne ocieplenie odpowiedzialne są emisje ze

źródeł naturalnych, takich jak zmiany promieniowania słonecznego, aktywności wulkanów. Oszacowano, że emisje ze źródeł naturalnych w latach 1850-2019 były przyczyną ogólnego wzrostu temperatury o mniej niż ±0,1°C. Postęp cywilizacyjny, naukowo-techniczny i idący za tym rozwój gospodarczy powodują ciągły wzrost zużycia energii elektrycznej i paliw transportowych na całym świecie, czego skutkiem jest wzrost stężenia zanieczyszczeń, degradacja środowiska – wody, gleby, powietrza. Emisje ze źródeł związanych z działalnością człowieka odpowiedzialne są za wzrost temperatury w tempie 0,25°C na dziesięć lat. Do wzrostu emisji (GHG) przyczyniają się głównie: spalanie paliw kopalnych (węgla, ropy i gazu), w wyniku czego powstaje CO₂ i N₂O, wylesianie – podczas wycinania lasów pochłonięty CO₂ i zmagazynowany w drzewach węgiel ponownie trafia do atmosfery przyczyniając się do efektu cieplarnianego. Za

emisje z działalności rolniczej odpowiadają zarówno produkcja zwierzęca, jak i roślinna. Na potrzeby sprawozdawcze sporządzane są krajowe inwentaryzacje emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery, które w rozumieniu międzynarodowym są zestawem danych informujących o rocznej emisji poszczególnych substancji w kraju. W Polsce, instytucją zajmującą się obliczaniem i raportowaniem emisji na potrzeby konwencji międzynarodowych, zobowiązań europejskich oraz na potrzeby krajowe jest Zespół Inwentaryzacji Emisji w Krajowym Ośrodku Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym, nadzorowany przez Ministra Środowiska. Spośród wielu dziedzin działalności człowieka duży udział w emisji GHG, zwłaszcza dwutlenku węgla (CO₂), metanu (CH₄) i podtlenku azotu (N₂O) do atmosfery

ma rolnictwo. W sektorze tym wyodrębniamy strumienie emisji GHG z produkcji roślinnej i zwierzęcej. Głównymi źródłami emisji GHG w sektorze rolnictwa są:

- fermentacja jelitowa (emisja CH₄),
- odchody zwierzęce (emisja CH₄),
- odchody zwierzęce (emisja N₂O),
- emisja bezpośrednia z gleb (emisja N₂O), w tym m. in.: stosowanie nawozów mineralnych, organicznych, resztki poźniwne,
- emisja podtlenku azotu z odchodów zwierząt na pastwiskach i wygonach,
- emisja pośrednia z gleb (emisja N₂O); z depozycji związków azotu z atmosfery do gruntu i pochodzącej z wymywania azotu z gruntu,
- spalanie odpadów roślinnych (emisja CH₄ i N₂O).

W celu oszacowania emisji GHG i NH₃ oraz w poszukiwaniu możliwości redukcji, niezbędna jest analiza źródeł emisji w poszczególnych technologiach produkcji rolniczej w tym także roślinnej. Uprawa roślin ma szczególne znaczenie w pokryciu zapotrzebowania na cele konsumpcyjne i paszowe oraz w coraz większym zakresie, energetyczne.

Zakres badań

W Polsce, roślinami o największym znaczeniu w produkcji roślinnej są okopowe, zboża i oleiste. Spośród zbóż największe powierzchnie pod uprawę zajmują: pszenica, pszenżyto, żyto i jęczmień, które mogą być uprawiane jako jare lub ozime (ok. 56% upraw ogółem). Opracowano modelowe technologie dla uprawy zbóż ozimych na przykładzie żyta i jarych na przykładzie jęczmienia z racji ich znacznego udziału w strukturze użytków rolnych w Polsce. W latach 2010-2020 areał uprawy żyta zajmował średnio 944 813 ha, a średnie plony w tych latach to 2,78 t•ha⁻¹. Średni plon odmian jarych jęczmienia w analizowanym okresie w Polsce wyniósł 3,60 t•ha⁻¹, a średnia powierzchnia to 875 771 ha [1].

Na podstawie wyznaczonych ilości składników pokarmowych N, P₂O₅, K₂O zgodnie z zaleceniem IUNG [2] dla otrzymania prognozowanego plonu oraz wybranego asortymentu nawozów (jedno- i wieloskładnikowych) opracowano po cztery modelowe warianty technologii uprawy żyta i jęczmienia jarego. Nadano im symbole, odpowiednio:

Tabela 1. Źródła emisji i rodzaje zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery z analizowanych wariantów uprawy. (opracowanie własne)

Źródło emisji	Rodzaj zanieczyszczenia			
	Gazy cieplarniane GHG			NH ₃
	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	
Nawozy nieorganiczne, w tym mocznik	+			+
		+		
Nawozy wapniowe		+		
Zużycie paliwa	+	+	+	

Tabela 2. Potencjał cieplarniany gazów. (opracowanie własne na podstawie [5])

	Przelicznik do równoważnika CO ₂
CO ₂	1
N ₂ O	265
CH ₄	28

Tabela 3. Zawartość N i wskaźniki emisji N₂O, CO₂, NH₃ dla najczęściej stosowanych nawozów nieorganicznych. (opracowanie własne na podstawie [6])

Rodzaj/nazwa nawozu	Zawartość N, %	Wskaźnik emisji EF		
		N ₂ O-N	CO ₂ -C	NH ₃ , g NH ₃ •kg N ⁻¹
Saletra amonowa	34	0,01		16
Fosforan amonu	18	0,01		51
Siarczan amonu	21	0,01		92
Mocznik	46	0,01	0,2	159
Nawozy wieloskładnikowe (NPK)		0,01		67
Węglan wapnia			0,12	
Wapno dolomitowe			0,13	

dla żyta:

- plon średni z plonów niższych od średniej – 2,52 t•ha⁻¹ (wariant ZN),
- plon średni – 2,78 t•ha⁻¹ (wariant ZS),
- plon średni z plonów wyższych od średniej – 3,17 t•ha⁻¹ (wariant ZW),
- plon – 6,00 t•ha⁻¹ (wariant Z6),

dla jęczmienia jarego:

- plon średni z plonów poniżej średniej – 3,32 t•ha⁻¹ (wariant JN),
- plon średni – 3,60 dt•ha⁻¹ (wariant JS),
- plon średni z plonów powyżej średniej – 4,12 t•ha⁻¹ (wariant JW),
- plon – 7,00 t•ha⁻¹ (wariant J7) [1].

Metodyka badań

Emisje zanieczyszczeń do atmosfery z rolnictwa, to oprócz nawożenia, także zanieczyszczenia pochodzące z spalania paliwa w silnikach ciągników i maszyn rolniczych wykorzyst-

wanych do wielu zabiegów i czynności agrotechnicznych wykorzystywanych w etapach polowej produkcji roślinnej. Ilość zużytego paliwa uzależniona jest od ilości przeprowadzanych zabiegów, wielkości plonu (zbiór).

Analizy przeprowadzono na podstawie danych o ilości zastosowanych nawozów nieorganicznych, wapniowych i mocznika oraz ilości zużytego paliwa. Rodzaje rozpatrywanych zanieczyszczeń z badanych źródeł zamieszczono w tabeli 1.

Metodyka szacowania emisji GHG i NH₃

Wyliczenia ilości emisji bezpośredniej CO₂ i N₂O z aplikacji nawozów dokonano w oparciu o metodykę IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [3]. W szacowaniu emisji GHG:

N₂O i CO₂ otrzymane wyniki emisji poszczególnych zanieczyszczeń przeliczono zgodnie z ich potencjałem cieplarnianym w celu wykazania łącznej ilości emisji GHG w jednostce ekwiwalentnej – uwzględniającej potencjał cieplarniany poszczególnych gazów (GWP – *global warming potential*). Jednostka ta została utworzona w celu umożliwienia porównywania emisji gazów [4]. Potencjał cieplarniany gazów wyraża ilość kilogramów węgla, która w czasie 100 lat daje taki sam efekt globalnego ocieplenia, co 1 kg analizowanego gazu cieplarnianego. W celu obliczenia emisji wyrażonych w ekwiwalencie CO₂ posłużono się wytycznymi IPCC 2014 [5]. Wartości potencjału globalnego ocieplenia, dla CO₂, N₂O, a także CH₄ (występuje w przypadku nawożenia naturalnego) zostały przedstawione w tabeli 2.

Analizie zostały poddane po 4 warianty uprawy żyta i jęczmienia jarego zróżnicowane pod względem otrzymywanych plonów. W uprawach rozważono warianty z nawożeniem wyłącznie mineralnym. Na potrzeby oszacowania emisji GHG i NH₃, każdy z wariantów został scharakteryzowany pod względem ilości zastosowanych nawozów nieorganicznych (w tym mocznika) i wapniowych – zastosowano wapno dolomitowe o 55% zawartości CaO. Ponieważ zabieg wapnowania wykonywany jest raz na 4-5 lat uwzględniono dawkę przypadającą na ha na rok. Obliczono ilość dostarczonego azotu i węgla w poszczególnych źródłach. Do obliczeń wykorzystano wskaźniki (tab. 3).

Według aktualnych wytycznych EEA 2019 [6] do szacowania emisji NH₃ można zastosować metodę Tier 1 lub bardziej dokładną – Tier 2. Metoda Tier 1 – w tej najprostszej metodzie szacowania emisji amoniaku z nawozów nieorganicznych wskaźnik emisji EF(NH₃) ma wartość stałą = 0,05 kg NH₃ na jeden kilogram azotu (N) w aplikowanym nawozie nieorganicznym, niezależnie od rodzaju nawozu. W metodzie Tier 2 wskaźniki emisji EF(NH₃) ze stosowanych mineralnych nawozów azotowych mają wartość zależną od rodzaju nawozu, odczynu gleby (pH) i warunków klimatycznych (temperatury). Dla polskich warunków w analizach zastosowano wartości wskaźników (tab. 3) zgodnie z wytycznymi EEA 2019 [6] dla gleb o pH poniżej 7, które cechuje

Tabela 4. Emisje GHG w odniesieniu do powierzchni uprawy, kg•ha⁻¹. (obliczenia własne)

Rodzaj uprawy	Plon, t•ha ⁻¹	Emisja GHG, kg CO ₂ eq•ha ⁻¹			
		nawozy mineralne	spalanie ON		razem
			CO ₂	razem	
Żyto	2,52	278,6457	234,5620	238,4415	517,0872
	2,78	312,5777	244,3664	248,4081	560,9858
	3,17	353,9704	243,1469	247,1684	601,1388
	6,00	700,1569	285,1446	289,8607	990,0176
Jęczmień jary	3,32	244,4984	212,3479	215,8601	460,3584
	3,60	281,6765	222,8452	226,5309	508,2074
	4,12	339,1922	225,3971	229,1250	568,3173
	7,00	692,1979	295,0121	299,8915	992,0894

Tabela 5. Emisje GHG w odniesieniu do powierzchni plonu, kg•t⁻¹. (obliczenia własne)

Rodzaj uprawy	Plon, t•ha ⁻¹	Emisja GHG, kg CO ₂ eq•t ⁻¹			
		nawozy mineralne	spalanie ON		razem
			CO ₂	razem	
Żyto	2,52	110,5737	93,0801	94,6196	205,1933
	2,78	112,4380	87,9016	89,3554	201,7935
	3,17	111,6626	76,7025	77,9711	189,6337
	6,00	116,6928	47,5241	48,3101	165,0029
Jęczmień jary	3,32	73,6441	63,9602	65,0181	138,6622
	3,60	78,2435	61,9014	62,9253	141,1687
	4,12	82,3282	54,7080	55,6129	137,9411
	7,00	98,8854	42,1446	42,8416	141,7271

89% gleb Polski [7] oraz to, że Polska zalicza się do strefy klimatu umiarkowanego.

Ze względu na ilość emisji zanieczyszczeń do atmosfery powstających na etapie produkcji polowej istotne jest również oszacowanie ilości zużytego paliwa, co uzależnione jest od ilości przeprowadzanych zabiegów, wielkości plonu i dostarczenia niezbędnych ilości składników pokarmowych dla jego uzyskania, zastosowanych środków ochrony roślin. Na podstawie ilości zużytego paliwa w analizowanych modelowych wariantach uprawy żyta i jęczmienia jarego (po 4 warianty) oszacowano ilość emisji GHG: CO₂, N₂O, CH₄ powstające w wyniku spalania oleju napędowego przez silniki ciągników i maszyn rolniczych. W obliczeniach zastosowano wskaźniki emisji wymienionych gazów, które wynoszą [8]:

- EF_{ON}CO₂P – wskaźnik emisji potencjalnej CO₂ = 3 170g•kg⁻¹ON,

- EF_{ON}CH₄ – wskaźnik emisji CH₄ = 0,19g•kg⁻¹ON,
- EF_{ON}N₂O – wskaźnik emisji N₂O = 0,16g•kg⁻¹ON.

Wyniki

Zgodnie z przyjętą metodyką badań oszacowano ilości emisji GHG (CO₂, N₂O, CH₄) i NH₃ z analizowanych źródeł, przypadające na 1 ha uprawy badanych gatunków (tab. 4, tab. 6) oraz na 1 t plonu (tab. 5, tab. 7). W przypadku gazów cieplarnianych, w celu możliwości porównywania ilości ich emisji, przeliczono i wyrażono w jednostce ekwiwalentnej – ECO₂eq.

Emisje GHG w technologiach uprawy żyta wyniosły od 517,09 kg CO₂eq•ha⁻¹ dla założonego plonu 2,52 t•ha⁻¹ do 990,02 kg CO₂eq•ha⁻¹ dla plonu 6 t•ha⁻¹ (tab. 4). Emisje GHG w technologiach uprawy jęczmienia jarego wyniosły od 460,36 kg CO₂eq•ha⁻¹ dla założonego plonu 3,32 t•ha⁻¹ do 992,09 kg CO₂eq•ha⁻¹ dla plonu 7 t•ha⁻¹ (tab. 4).

Zastosowanie nawożenia oraz zużycie ON w wariantach uprawy żyta dla plonu 2,52 t·ha⁻¹ powodowało emisje 205,19 kg CO₂eq·t⁻¹. W przypadku plonu 6 t·ha⁻¹ wyprodukowanie jednostki plonu (1 t) żyta powodowało wyemitowanie do atmosfery 165,00 kg CO₂eq gazów cieplarnianych (tab. 5). Dla wariantów uprawy jęczmienia jarego były to wartości z zakresu od 138,66 kg CO₂eq·t⁻¹ (plon – 3,32 t·ha⁻¹) do 141,73 kg CO₂eq·t⁻¹ (plon – 7 t·ha⁻¹).

Oszacowane ilości emisji NH₃, analogicznie do wyników emisji GHG, odniesiono do jednostki powierzchni (ha) (tab. 6) i jednostki plonu (t) (tab. 7). Oszacowane emisje NH₃ z zastosowania nawozów mineralnych – w odniesieniu do jednostki powierzchni – wyniosły od 4,75 kg·ha⁻¹ dla plonu 2,52 t·ha⁻¹ do 16,86 kg·ha⁻¹ dla plonu 6 t·ha⁻¹ w uprawach żyta oraz od 3,29 kg·ha⁻¹ do 16,42 kg·ha⁻¹ w uprawach jęczmienia jarego (tab. 6). Na wyprodukowanie 1 t plonu żyta przypadało od 1,89 kg NH₃ przy plonie 2,52 t·ha⁻¹ do 2,81 kg NH₃ przy plonie 6 t·ha⁻¹ (tab. 7). Na wyprodukowanie 1 t plonu jęczmienia jarego przypadało od 0,99 kg NH₃ przy plonie 3,32 t·ha⁻¹ do 2,35 kg NH₃ przy plonie 7 t·ha⁻¹ (tab. 7).

Podsumowanie

W strukturze udziału w emisji GHG w produkcji roślinnej znaczącym źródłem tego zanieczyszczenia jest stosowanie nawozów mineralnych. Duży wpływ na oszacowane emisje GHG ogółem ma N₂O – w związku z jego wysokim potencjałem cieplarnianym – z aplikacji nawozów azotowych. Mając powyższe na uwadze, mineralne nawożenie azotem jest obszarem, w którym poszukiwać należy najbardziej obiecujących praktyk w ograniczaniu emisji N₂O. W związku z tym, że największy udział w emisji amoniaku ma rolnictwo, środki mające na celu zmniejszenie emisji amoniaku z tego sektora gospodarki odgrywają znaczący wpływ na całkowitą emisję. Wszelkie środki zaradcze odgrywają istotną rolę w unikaniu zagrożenia zarówno dla środowiska, jak i życia ludzkiego.

Szczegółowe analizy rodzajów zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery i ich ilość, uzależniona od rodzaju uprawy, regionalnego zróżnicowania uprawianych powierzchni i plonów są niezbędnym elementem stanowiącym

Tabela 6. Emisje NH₃ w odniesieniu do powierzchni uprawy, kg·ha⁻¹. (obliczenia własne)

Rodzaj uprawy	Plon, t·ha ⁻¹	Emisja NH ₃ , z nawożenia mineralnego kg·ha ⁻¹
Żyto	2,52	4,7535
	2,78	5,7085
	3,17	6,8634
	6,00	16,8623
Jęczmień jary	3,32	3,2894
	3,60	4,3886
	4,12	6,0098
	7,00	16,4222

Tabela 7. Emisje NH₃ w odniesieniu do 1 tony plonu, kg·t⁻¹. (obliczenia własne)

Rodzaj uprawy	Plon, t·ha ⁻¹	Emisja NH ₃ , z nawożenia mineralnego kg·t ⁻¹
Żyto	2,52	1,8863
	2,78	2,0534
	3,17	2,1651
	6,00	2,8104
Jęczmień jary	3,32	0,9908
	3,60	1,2190
	4,12	1,4587
	7,00	2,3460

podstawę do analiz, w dokonywaniu wyborów rozwiązań właściwych dla danej uprawy, w zakresie podejmowania potencjalnych działań ograniczających ich powstawanie z poszczególnych źródeł, redukcję emisji GHG do atmosfery i łagodzenie zmian klimatycznych. Zaplanowano zamodelowanie technologii uprawy z uwzględnieniem metod oraz technik redukcyjnych emisje GHG i NH₃, co umożliwi zaproponowanie praktyk rolniczych służących ograniczeniu ich powstawania.

Literatura

[1] Konieczna, A. 2025. Zapotrzebowanie na składniki pokarmowe zbóż jarych i ozimych w modelowych technologiach uprawy dla uwarunkowań rolnictwa w Polsce. AURA 10/2025.

[2] Jadczyszyn, T., Kowalczyk, J., Lipiński, W. 2010. Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych. Materiały szkoleniowe, 95. Puławy: IUNG-PIB

[3] Buendia, E. et al. (eds.) 2019. *Agriculture, forestry and other land use. Vol. 4. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>

[4] Eggleston, H.S et al. (eds.) 2006. *Agriculture, forestry and other land use. Vol. 4. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IPCC. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html

[5] IPCC 2014. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

[6] EEA 2019. „3.D Crop production and agricultural soils” in *EMEP/ EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report*, 13, pp. 1–38. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/4-agriculture/3-d-crop-production-and/view>

[7] GUS 2018. *Ochrona środowiska. Wykorzystanie i ochrona powierzchni ziemi*. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5484/1/19/1/ochrona_srodowiska_2018.pdf

[8] Radzimirski, S. and Taubert, S. 2009. *Inwentaryzacja emisji wybranych zanieczyszczeń sektora transportu drogowego w 2008 r. Praca Instytutu Transportu Samochodowego*, 7904

PRENUMERATA 2026

**Prenumerata drukowana i cyfrowa
– rzetelna wiedza na wyciągnięcie ręki**

Prenumeruj w wygodnej dla siebie wersji!

Cena 1 egzemplarza: 36 zł

PRENUMERATA CYFROWA

Cena: 312 zł brutto

PRENUMERATA PAPIEROWA

Cena: 384 zł brutto + koszt rocznej wysyłki 42 zł

PAKIET PLUS (papier + cyfra + archiwum)

Cena: 480 zł brutto (koszty wysyłki pokrywa wydawca)

Ceny prenumeraty całorocznej dotyczą wyłącznie zamówień składanych w Zakładzie Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT.



ZAMÓWIENIA:

☎ 22 840 35 89 lub 22 840 30 86
✉ prenumerata@sigma-not.pl
🌐 www.sigma-not.pl



WYDAWNICTWO SIGMA-NOT



