

Jerzy Polaczek*, Ewa Śmigiera
 Łukasiewicz – Instytut Chemii Przemysłowej, Warszawa

*Chemistry 4.0. Challenges and barriers.
 Part 1. Conditions and fundamentals*

Chemia 4.0. Wyzwania i bariery. Cz. I. Uwarunkowania i podstawy

DOI: 10.15199/62.2026.3.1

A necessity for modernization of chem. processes by practical implementing the sustainable development, circular economy and digitalization was evidenced. In particular, the assumptions of the development phase and its effects were presented and discussed. The global BASF company was selected as an example of the project-commercializing enterprises. The Polish point of view was also taken into consideration.

Keywords: sustainable development, solar energy, hydrogen, circular economy, waste conversion, BASF, digitalization

Wykazano konieczność modernizacji procesów chemicznych poprzez praktyczne wdrażanie zasad zrównoważonego rozwoju, gospodarki obiegu zamkniętego i ich cyfryzacji. W szczególności przedstawiono i przedyskutowano założenia i perspektywy tej fazy rozwoju przemysłu chemicznego. Jako przykład przedsiębiorstwa komercjalizującego ten projekt wybrano globalny koncern BASF. Wzięto pod uwagę również polski punkt widzenia.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, energia słoneczna, wodór, gospodarka obiegu zamkniętego, konwersja odpadów, BASF, cyfryzacja

Liczba ludności na planecie Ziemia rośnie szybciej, niż to przewidywano w 2013 r. i przekroczyła już 8 mld osób (rys. 1). Szybkość tego wzrostu zmaleje dopiero w drugiej połowie XXI w. Wprawdzie w krajach rozwiniętych spada dzietność rodzin, ale wydłuża się przeciętna długość życia ludzi. W krajach rozwijających się wzrost liczby mieszkańców jest gwałtowny. Wszystkich trzeba będzie nakarmić, ubrać i leczyć. Wszyscy będą chcieli podróżować i uczyć się. Standardy poziomu życia są wprawdzie silnie zróżnicowane w zależno-

ści od regionu geograficznego i część ludzi żyje na skraju ubóstwa i nędzy, ale wszyscy dążą do tego, by żyć coraz lepiej. Jak długo naturalne zasoby Ziemi wystarczą na to, by spełniać te oczekiwania?

Dotychczas było to możliwe dzięki „zielonej rewolucji”^{2, 3)}, która za sprawą ONZ dokonała się w połowie XX w., a która polegała na zwiększeniu produktywności rolnictwa w krajach rozwijających się poprzez zastosowanie wydajniejszych odmian roślin uprawnych i postęp w agrotechnice (nawadnianie, stosowanie nawozów sztucznych i pestycydów)²⁾. Ta „zielona rewolucja” miała swoje negatywne następstwa (wprowadzanie monokultur rolnych, nadmierne zużycie wody, zanieczyszczenie środowiska nawozami i pestycydami, obecność pestycydów w produktach rolnych, problemy z magazynowaniem nadwyżek żywności) i osiągnęła już dopuszczalne granice swego stosowania. Również stały

postęp w przemyśle wydobywczym i przetwórczym umożliwił lepsze wykorzystanie zasobów naturalnych i lepsze zaspokajanie potrzeb ludności. W szczególności ważny był postęp w produkcji i przetwórstwie tworzyw sztucznych⁴⁻⁶⁾, gdyż wykonywane z nich opakowania umożliwiły dłuższe przechowywanie żywności, włókna sztuczne przedłużyły okresy użytkowania tkanin ubraniowych, a kompozyty polimerowe w przemyśle samochodowym i lotnictwie umożliwiły zmniejszenie masy pojazdów i tym samym zmniejszenie zużycia energii. Polimery w medycynie umożliwiły poprawę efektywności leczenia^{7, 8)}. W dużej mierze do osiągnięcia tego sukcesu przyczynił się przemysł chemiczny.

Biblijny nakaz: *Bądźcie płodni i rozmnażajcie się, abyście zaludnili Ziemię i uczynili ją sobie poddaną*⁹⁾ powinien być jednak realizowany w sposób rozważny, tak aby nie powodował rabunkowego



Fig. 1. Increase in number of Earth inhabitants in 1995 to 2024 and forecast up to 2100¹⁾, billions
 Rys. 1. Zmiany liczby mieszkańców Ziemi w latach 1995–2024 i prognozy ONZ do 2100 r.¹⁾, mld

* Adres do korespondencji:
 polaczekjerzy@o2.pl

zużycia zasobów naturalnych i dewastacji środowiska przyrodniczego planety. Niestety, postęp techniczny wprowadzany był w przeszłości w sposób ekstensywny, tolerujący rozrzutność w zużyciu materiałów i energii, co miało wiele niekorzystnych następstw. Towarzyszył mu nieokiełzany konsumpcjonizm, marnotrawstwo żywności i drapieżna reklama. Nastąpił monstrialny wzrost zużycia energii, wykorzystywanej przy tym w mało efektywny sposób. Sprawność energetyczna silników spalinywych i odrzutowych (transport samochodowy i lotniczy), kotłów parowych (elektrownie) oraz centralnych systemów grzewczych jest niska i znaczna część wytwarzanej energii ulega rozproszeniu w środowisku przyrodniczym w postaci odpadowego ciepła, przyczyniając się do niekorzystnych zmian klimatycznych. Produkcja energii z surowców mineralnych (spalanie) wiąże się z równoległą emisją ditlenku węgla i wielu polityków uznało, że emisja ta jest przyczyną ocieplania się atmosfery ziemskiej^{10,11}). W rzeczywistości o zmianach klimatu decyduje aktywność Słońca, choć zapewne przyczynia się do tych zmian również monstrialna dyssypacja energii cieplnej, również tej, która pozyskiwana jest w sposób bezemisyjny (odnawialne źródła energii, termiczne wykorzystanie odpadów, elektrownie jądrowe). Ten strumień rozpraszanego ciepła zasilany jest również przez stałocieplne organizmy żywe (człowiek, zwierzęta hodowlane).

Pierwszym krokiem w kierunku racjonalizacji światowej energetyki było sięgnięcie po odnawialne źródła energii (OZE). To przede wszystkim energia promieniowania słonecznego, ale również energia wiatru i cieków wodnych (rzeki, pływy oceaniczne) oraz energia zawarta w biomasie i odpadach. Słońce jest niewyczerpywalnym (w skali tysięcy lat) źródłem energii, która dociera na Ziemię od początku jej historii w ilościach wielokrotnie przekraczających zapotrzebowanie współczesnej cywilizacji. Steven Chu, amerykański laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w 1997 r. i US Secretary of Energy w latach 2009–2013, w swoim wygłoszonym w 2015 r. referacie *Solar resources in the world* przedstawił mapę świata z rozkładem gęstości energii promieniowania słonecznego (SolarGIS) i zaznaczył na niej małym kwadratem obszar Afryki, na który pada promieniowanie słoneczne niosące energię świetl-

Table 1. Production capacities of solar and wind farms in 2015 in outstanding countries, GW

Tabela 1. Moce produkcyjne farm słonecznych i wiatrowych zainstalowanych w przodujących krajach w 2025 r., GW

Kraj	Moc farm słonecznych ¹⁶⁾	Moc farm wiatrowych ¹⁷⁾
Chiny	887,9	664,2
USA	177,5	156,7
Indie	97,4	51,7
Niemcy	89,9	74,6
Japonia	91,6	b.d.
Brazylia	53,1	35,0
Hiszpania	38,6	32,6
Australia	38,5	15,4
Włochy	36,0	12,9
Polska	23,9 ¹⁸⁾	10,4 ¹⁹⁾

w tym kierunku jest już robiony. Energia ta magazynowana będzie w postaci wodoru, który rurociągiem będzie transportowany do Europy (rys. 4). To przedsięwzięcie konsorcjum niemieckich, austriackich i włoskich firm energetycznych, wspierane dotacjami z funduszy unijnych^{14,15}). Rurociąg będzie miał długość 3300 km i zostanie oddany do użytku w 2030 r. Wodór do transportu rurociągiem do Europy będzie pochodził z dużej wytwórni zielonego wodoru, którą firma ACWA Power Co z Arabii Saudyjskiej wybuduje w Tunezji. W tej sprawie podpisała ona z rządem tunezyjskim memorandum MoU (*memorandum of understanding*), w którym przewidziany jest eksport wodoru do Europy. Wytwórnia będzie zasilana zieloną energią i będzie miała własną stację odsalania wody, zbiorniki magazynowe

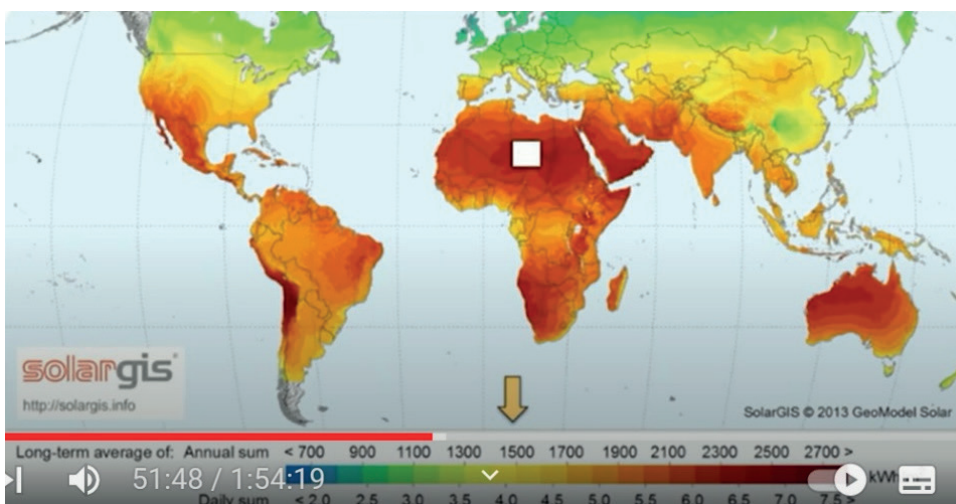


Fig. 2. World map with distribution of solar energy density (SolarGIS)¹²⁾

Rys. 2. Mapa świata z rozkładem gęstości energii promieniowania słonecznego (SolarGIS)¹²⁾

ną w ilości wystarczającej do pokrycia całego światowego zapotrzebowania na energię elektryczną (rys. 2). Już w 2018 r. zostały podjęte pewne działania w kierunku wykorzystania tych możliwości i w Maroku na Saharze wybudowano 3 duże farmy solarne Noor-Ouarzazate I, II i III (czwarta jest w budowie), w których energia słoneczna zamieniana jest w gorącą stopioną sól i które zapewniają zaopatrzenie w energię elektryczną dla ponad 1 mln okolicznych mieszkańców (rys. 3). Powierzchnia farm to 450 ha, a nominalna ich moc wynosi ok. 2 GW. Koszt budowy wyniósł 2,5 mld USD.

Globalne wykorzystanie tej energii wiąże się jednak z koniecznością jej transportu z Sahary do strefy umiarkowanej, gdzie jest ona najbardziej potrzebna. Pierwszy krok

i rurociągi transportowe oraz elektrolizery o mocy 12 GW. W początkowej fazie inwestycji zdolność produkcji wodoru wyniesie 200 tys. t/r (moc elektrolizerów 2 GW). Budowę wytwórni będzie realizowało joint venture Neom Green Hydrogen Project, utworzone przez ACWA Power, Air Products i Neom. Rząd Tunezji już wcześniej podpisał podobne memorandum z joint venture utworzonym przez francuski koncern energetyczny TotalEnergies, Eren Groupe z Luksemburga oraz austriacki koncern energetyczny Verbund.

Nie ma jednak przeszkód, aby energię słoneczną akumulować w sposób rozproszony w Europie i wykorzystywać lokalnie na potrzeby ludności i gospodarki, chociaż nasłonecznienie jest tam mniejsze niż na Saharze. W tabeli 1 zostały zestawione



Fig. 3. Solar farm in Noor-Quarzazate, Sahara, Morocco¹³⁾
 Fot. 3. Farma słoneczna Noor-Ouarzazate na Saharze, Maroko¹³⁾

dane dotyczące mocy produkcyjnych farm słonecznych i wiatrowych zainstalowanych w przodujących krajach.

Ograniczeniem w stosowaniu ogniw fotowoltaicznych był w przeszłości wysoki koszt materiałów półprzewodnikowych (krzem) stosowanych do ich produkcji. Znaczny postęp zapewniła tu chemia, która umożliwiła opracowanie ogniw III generacji. Zastosowano w nich tanie perowskity o wzorze ogólnym ABX_3 (analogi tytanianu wapnia) do barwnikowego uczulania materiałów półprzewodnikowych. Ideę tę sformułowali już w 2009 r. japońscy naukowcy z University of Tokyo²⁰⁾, ale w Polsce została ona opracowana i przygotowana do zastosowania w skali przemysłowej w 2021 r. przez wrocławską firmę Saule Technologies²¹⁾ w postaci ultracienkich, ultralekkich, elastycznych i transparentnych ogniw fotowoltaicznych. Niestety, rozpoczęcie tej produkcji opóźnia się wskutek sporów kompetencyjnych²²⁾.

Inną możliwość wykorzystania OZE stworzyły farmy wiatrowe (tabela 1). W rozwoju tej dziedziny energetyki odnawialnej miała również swój udział chemia, która dostarcza materiały niezbędne do budowy wiatraków (rys. 5). To lekkie łopaty wykonywane z kompozytów polimerowych²³⁾.

Farmy solarne i wiatrowe nie są jednak niezawodnym i pewnym dostawcą energii, gdyż pracują one skutecznie jedynie wówczas, gdy odpowiednio intensywnie świeci Słońce (bezchmurne dni) lub gdy wieje silny wiatr. Ponadto zintegrowanie ich z krajowymi sieciami energetycznymi stwarza często poważne problemy. Z tego też względu trudno spodziewać się, by tego typu rozwiązania stały się dominujące

w produkcji energii elektrycznej. Obecnie jedynie w Niemczech ich udział w bilansie energii elektrycznej przekracza 10%.

Postęp techniczny zaowocował lawiną odpadów poużytkowych. Stały się one przekleństwem współczesnej cywilizacji. Odpady biomasy rolniczej są wprawdzie biodegradowalne i ulegają samoistnemu rozkładowi, ale odpady komunalne nie ulegają w swej masie biodegradacji i są gromadzone na wysypiskach śmieci (rys. 6) lub, co gorsze, „łądują” w lasach lub ciekach wodnych, skąd trafiają do mórz i oceanów, powodując nieodwracalne zanieczyszczenie środowiska przyrodniczego. Ma to miejsce przeważnie w krajach rozwijających się, gdzie brak jest systemów składowania i utylizacji odpadów. Szczególne zagrożenie stanowią tu nieulegające biodegradacji odpady z tworzyw sztucznych (opakowania i inne produkty jednorazowego użytku, urządzenia elektroniczne, części pojazdów, maszyn i urządzeń gospodarstwa domowego, tekstylia).

Składowiska odpadów komunalnych były często miejscami groźnych pożarów, wywoływanych nie tylko celowymi podpaleniami (to najgorszy dla środowiska i dla człowieka sposób rozwiązywania problemu odpadów!), ale również samozapłonem zużytych akumulatorów litowo-jonowych lub gazowych produktów zachodzącej spontanicznie metanowej fermentacji bioodpadów. Przykładem jest tu składowisko odpadów w Kamieńcu (rys. 7), gdzie składowano nielegalnie łatwopalne odpady tekstylne i gdzie pożary wybuchały już 39 razy (*sic!*).

Odpady komunalne mają dużą wartość opałową i mogą być przyjaznym dla środowiska przyrodniczego substytutem węgla

w elektrociepłowniach. Zaletą takiego rozwiązania jest brak konieczności dokładnego sortowania odpadów przed spalaniem. Skonstruowano już piece do bezemisyjnego spalania odpadów komunalnych (zawrót spalin, dokładne oczyszczanie gazów odlotowych), które mogą być lokalizowane nawet w dużych miastach i w sposób ciągły dostarczać zarówno ciepło do celów ogrzewczych, jak i energię elektryczną. Przykładem może tu być wybudowana ponad 50 lat temu i działająca w śródmieściu Wiednia elektrociepłownia Wien-Spitellau (rys. 8). Rocznie spala się w niej 250 tys. t odpadów komunalnych i wytwarza 60 GWh energii elektrycznej oraz 500 GWh energii cieplnej. Z energii cieplnej korzysta ponad 60 tys., a z energii elektrycznej 50 tys. gospodarstw domowych. Artystyczny „wygląd” tej elektrociepłowni nadał wybitny architekt F. Hundertwasser.

Bardzo skuteczna okazała się w tym zakresie Szwecja^{28,29)}, która praktycznie całkowicie wyeliminowała stosowanie węgla jako paliwa w swoich elektrociepłowniach i zastąpiła go paliwem przygotowanym ze zmieszanych odpadów komunalnych, oczywiście po odpowiednim przystosowaniu palenisk i układów oczyszczania gazów spalinowych. Okazało się, że w ten sposób nie tylko rozwiązano problem utylizacji własnych odpadów komunalnych, ale trzeba było wręcz skorzystać z ich importu. Każdego roku Szwecja kupuje blisko 700 tys. t odpadów z Norwegii, Irlandii, Włoch

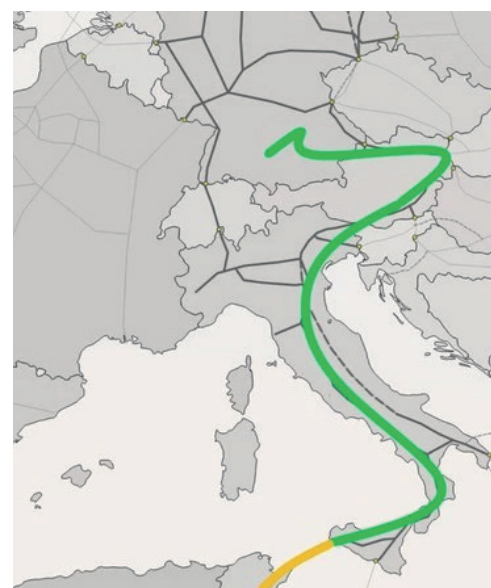


Fig. 4. Run of green hydrogen pipeline from Africa to Europe¹⁴⁾

Rys. 4. Przebieg rurociągu do transportu zielonego wodoru z Afryki do Europy¹⁴⁾

i Wielkiej Brytanii, pobierając opłaty za ich utylizację w wysokości 43 USD/t (*sic!*). Oczywiście nie jest to najbardziej racjonalny sposób wykorzystania odpadów komunalnych jako źródła surowców wtórnych, gdyż tracone są tu bezpowrotnie zawarte w nich organiczne związki węgla.

Niestety, elektrociepłownie bezemisyjne opalane odpadami komunalnymi stają się często, podobnie jak farmy wiatrowe i słoneczne oraz biogazownie, obiektami nagonki ze strony „ekowojowników”, co utrudnia ich budowę i oddawanie do użytku. Ostatnio w Polsce takiej nagonce ze strony lokalnego ciemnogrodu (Stowarzyszenie „Nie dla spalarni w Inowrocławiu”) poddana została budowa lokalnej ciepłowni³⁰⁾. Po kilkuletnich staraniach zostanie ona wreszcie wybudowana przez firmę Qemetic i będzie produkować energię ciepłą na potrzeby zakładów sodowych w Mątwach i mieszkańców Inowrocławia³¹⁾.

Przemysł chemiczny

Chemia stwarza szczególne możliwości rozwiązywania nabrzmiałych problemów współczesnej cywilizacji i odgrywa dziś kluczową rolę w gospodarczym rozwoju świata. Chemia to zarówno produkty masowe (nawozy sztuczne, soda, wielkotonażowe tworzywa sztuczne i włókna chemiczne, materiały wybuchowe, chemia spożywcza) oraz paliwa (benzyna, oleje napędowe, opały i smary), ale także przetworzone produkty chemiczne (wyroby z tworzyw sztucznych, farby i lakiery, kleje, chemia gospodarstwa domowego) oraz niskotonażowa chemia specjalistyczna (farmaceutyki, katalizatory, barwniki, pigmenty, substancje zapachowe, kosmetyki, środki ochrony roślin). Również w Polsce sektor chemiczny jest jednym z filarów krajowej gospodarki. W 2024 r. wartość sprzedanej produkcji polskiego przemysłu chemicznego wyniosła 442 mld zł (ponad 100 mld euro), co stanowiło 17,3% wartości globalnej produkcji przemysłowej^{32, 33)}.

Opisany w wielu monografiach^{34–36)} rozwój chemii – od alchemii do nowoczesnej chemii i inżynierii chemicznej – obfitował w dramatyczne zwroty i wyzwania, którym musiała ona sprostać. Tajemniczość chemii budziła od wieków społeczny niepokój, z którego zdawali sobie sprawę powojenni budowniczowie polskiego przemysłu chemicznego, którzy ukuli hasło „Chemia żywi,

Table 2. Development phases of chemical industry³⁸⁾

Tabela 2. Fazy rozwoju przemysłu chemicznego³⁸⁾

Faza	Charakterystyka	Rok wejścia w życie w Niemczech
Chemia 1.0	przejście na karbochemiczną bazę surowcową	1865
Chemia 2.0	przejście na surowce petrochemiczne	1950
Chemia 3.0	globalizacja i specjalizacja produkcji	1980
Chemia 4.0	zrównoważony rozwój, gospodarka obiegu zamkniętego i cyfryzacja	2010

odziewa, broni i leczy”, mające w świadomości społecznej podkreślić jej wagę³⁷⁾.

Kurt Bock³⁸⁾ usystematyzował historię przemysłu chemicznego, wyodrębniając 4 fazy rozwojowe, przez które przeszedł on od momentu swego powstania w odległej przeszłości (tabela 2). Były one związane ze zmianami bazy surowcowej i sposobu funkcjonowania przemysłu chemicznego.

We wczesnym okresie rozwoju produkty chemiczne i farmaceutyczne wytwarzano z surowców roślinnych i zwierzęcych (zmydlanie tłuszczów, ekstrakcja olejków i barwników, fermentacja cukrów, tkaniny z włókien naturalnych, papier) i przejście na bazę karbochemiczną było zwiastunem przyspieszenia produkcji chemicznej (Chemia 1.0). Symbolem tej fazy rozwojowej stała się syntetyczna anilina, której produkcję ze smoły węglowej podjęła utworzona w 1865 r. niemiecka Badische Anilin- und Soda Fabrik (BASF) w Ludwigshafen³⁹⁾, i która wkrótce stała się surowcem dla cennych barwników anilinowych. Stały się

one tanim substytutem drogich barwników naturalnych (indygo). Wydzielane ze smoły węglowej fenole zostały wykorzystane do produkcji żywic fenolowo-formaldehadowych, związki nienasycone (styren, kumaron, inden) do wytwarzania żywic, związki wielopierścieniowe (antracen, naftalen, karbazol) do syntezy barwników, a paki węglowe (pozostałości destylacyjne) stały się niezastąpionym lepiszczem dla drogownictwa. Na terenach polskich od 1888 r. działały Zakłady Koksochemiczne Hajduki w Chorzowie (Rütgerswerke AG)⁴⁰⁾. Wykorzystanie smoły węglowej jako surowca chemicznego wiązało się jednak z zagrożeniami zdrowotnymi, gdyż zawarte w smole wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbons*) wykazywały silne działanie nowotworowe.

Drugim kamieniem milowym w rozwoju przemysłu chemicznego było przejście na petrochemiczną bazę surowcową (ropa naftowa), które w USA dokonało się jeszcze



Fig. 5. British marine wind farm off-shore²⁴⁾

Rys. 5. Brytyjska morska farma wiatrowa off-shore²⁴⁾



Fig. 6. Big waste dump in Bantar Gebang, Indonesia, height 40 m (Photo: Leonardo DiCaprio)²⁵⁾

Rys. 6. Olbrzymie wysypisko śmieci w Bantar Gebang (Indonezja) o wysokości 40 m (Foto: Leonardo DiCaprio)²⁵⁾

przed II Wojną Światową, a w Europie nastąpiło dopiero w latach pięćdziesiątych XX w. W USA rafinerie ropy naftowej stały się nie tylko producentem paliw motorowych, ale również dostawcą surowców dla produkcji petrochemicznej. W ramach tej fazy wydobywane z ropy naftowej węglowodory alifatyczne i alkilooaromatyczne stały się surowcem dla syntezy organicznej (przerób olefin) i chemii polimerów (poliolefiny, kauczuki, poliestry). W Europie rozpoczęły działalność liczne koncerny naftowe: Royal Dutch Shell (Holandia), British Petroleum (Wlk. Brytania), Total (Francja), Eni (Włochy) i Repsol (Hiszpania), które zapewniają dostawy surowców dla europejskiej petrochemii. W Polsce w 1959 r. powstały Mazowieckie Zakłady Rafineryjne i Petrochemiczne w Płocku (obecnie Orlen SA), które oprócz przerobu destylatów naftowych na paliwa podjęły również petrochemiczną produkcję olefin (etylen, propylen, butadien) i poliolefin oraz półproduktów organicznych (fenol, aceton, izomery ksylenów, toluen)⁴¹⁾.

Rozpoczynająca się w latach osiemdziesiątych XX w. trzecia faza rozwoju przemysłu chemicznego (Chemia 3.0) stała pod znakiem rosnącego znaczenia gazu ziemnego i surowców odnawialnych jako bazy surowcowej tego przemysłu, ale jej zmiennymi cechami była specjalizacja

cja i globalizacja produkcji chemicznej. Specjalizacja polegała na pozbywaniu się energo- i materiałochłonnej produkcji masowej oraz na wydłużaniu łańcuchów produkcyjnych, umożliwiającym wytworzenie produktów o zwiększonej wartości dodanej i tym samym zwiększanie globalnej wartości produkcji oraz poprawę konkurencyjności przedsiębiorstw. W przypadku BASF było to zaprzestanie produkcji konwencjonalnych nawozów sztucznych (i „sztańdowej” sody!) oraz masowych tworzyw sztucznych, których ceny spadały ze względu na rozwój ich produkcji w krajach o taniej energii i taniej sile roboczej (Chiny, Europa Wschodnia). Globalizacja produkcji polegała na przenoszeniu produkcji za granicę, do krajów stanowiących duże rynki zbytu i uruchamianiu tam nowych wytwórni, aby poprawić logistykę i obniżyć koszty transportu od producenta do odbiorcy. W rzeczywistości do krajów trzecich przenoszono również produkcje energochłonne i wiążące się z powstawaniem dużej ilości odpadów, których zagospodarowanie na miejscu zgodne z lokalnymi regulacjami prawnymi wiązałoby się z dużymi kosztami. Ponadto globalizacja umożliwiała wstępny przerób surowców mineralnych w miejscu ich wydobycia, aby uniknąć transportu do krajów rozwiniętych takich składników, które stałyby się odpa-

dem (fosfogips, żużel, skała płonna).

Globalizacja to przede wszystkim fuzje i przejęcia, ale to również zagraniczne inwestycje. To także międzynarodowe zespoły badawcze, wykorzystujące wspólny potencjał badawczy. Ich praca przyczyniała się do poprawy innowacyjności przemysłu, a zlecenie usług do firm zewnętrznych umożliwiło koncentrowanie się na sprawach kluczowych. Mniejsze firmy grupowały się w parkach przemysłowych (chemicznych) w celu wspólnego wykorzystywania dostępnej tam infrastruktury.

W przypadku koncernu BASF globalizacja objęła w Europie Belgię (region Antwerpii), w USA Freeport w Teksasie oraz Geismar w Luizjanie, w Malezji region

Kuantan, a w Chinach regiony przemysłowe Nanjing, Zhanjiang i Guangdong. Również w Polsce powstała firma BASF Polska sp. z o.o., której *portfolio* obejmuje chemię przemysłową, kosmetyczną, tworzywa sztuczne, rozwiązania dla rolnictwa, lakiery oraz katalizatory samochodowe wytwarzane w zakładzie produkcyjnym w Środzie Śląskiej k. Wrocławia. Dzięki globalizacji Koncern stał się potęgą na światowym rynku chemicznym, osiągając w 2010 r. wartość sprzedaży równą 63,9 mld euro⁴²⁾.

W Polsce również można było zaobserwować tendencję przedsiębiorstw chemicznych do globalizacji. W skład Grupy Orlen weszły zakłady Orlen Unipetrol (Litwinov, Czechy), Orlen Deutschland GmbH (Niemcy) i Orlen Lietuva (Możejki, Litwa), w skład Grupy Azoty weszły zakłady ATT Polymers GmbH i Compo Expert (Niemcy), w skład Grupy Synthos weszły zakłady Kaučuka.s. (Kralupy, Czechy) oraz Ineos Styrenics (Francja, Holandia), a w skład Grupy Qemetica weszły zakłady Sodawerk Holding Stassfurt (obecnie Qemetica Soda Deutschland i Qemetica Salz Deutschland, Niemcy), Uzinele Sodice Govora SA (obecnie Qemetica Soda Romania, Rumunia) oraz Proplan (obecnie Qemetica Agricultural Solutions Spain, Hiszpania). Niektóre z tych przejęć nie przyniosły spodziewanych korzyści i stworzyły dodatkowe problemy:

Orlen Lietuva miał kłopoty z zaopatrzeniem w ropę naftową, co odbijało się na jego wynikach finansowych, a Quemetica Soda Romania musiała zostać postawiona w stan hibernacji ze względu na brak dostaw energii. Znacznie większym zagrożeniem spowodowanym globalizacją w skali światowej i przenoszeniem produkcji za granicę okazało się jednak uzależnianie wielu krajów od dostaw ważnych półproduktów z krajów trzecich, co w przypadku wyrobów o strategicznym znaczeniu (leki, półprzewodniki) może prowadzić do sytuacji krytycznych.

Pierwsze 3 fazy rozwoju przemysłu chemicznego miały charakter bardzo ekstenywny. Zarówno zmiany bazy surowcowej, jak i restrukturyzacja produkcji miały na celu przede wszystkim poprawę konkurencyjności i zyskowności przedsiębiorstw chemicznych. Faza czwarta (Chemia 4.0) różni się od poprzednich zmianą filozofii myślenia i poważnym traktowaniem środowiskowych aspektów działania tych przedsiębiorstw. Dominującymi elementami tej ostatniej fazy rozwoju przemysłu chemicznego stały się 3 działania: zrównoważony rozwój (*sustainable development*), gospodarka obiegu zamkniętego GOZ (*circular economy*) oraz cyfryzacja produkcji i komunikacji (*digitalization*). Elementy te dobrze wpisują się w ogólne wytyczne dla

działań gospodarczych, obejmujące przewidywalne zarządzanie pracą przedsiębiorstw (*predictive maintenance*), ścisłą kontrolę stosowania środków ochrony roślin i nawozów w rolnictwie (*digital farming*) oraz ulepszoną logistykę produktów przemysłowych poprzez stosowanie ulepszonych kodów kreskowych RFID (*radio frequency identification*). Celem tych wytycznych jest zapewnienie efektywności wykorzystania zasobów i obniżenie kosztów produkcji, których wzrost mógłby nastąpić w wyniku realizacji fazy Chemia 4.0⁴³).

Polski termin „zrównoważoność” nie jest dosłownym tłumaczeniem terminu *sustainability*, ale dobrze oddaje sens podejmowanych działań, mających na celu prowadzenie procesów chemicznych w sposób selektywny i energetycznie oszczędny, bez nadmiernego obciążania środowiska naturalnego. Przykładem procesu „niezrównoważonego” jest przebiegające daleko od stanu równowagi spalanie paliw stałych i płynnych w silnikach spalinowych, gdzie znaczna część energii (nawet 70%) ulega rozproszeniu (dyssypacji) w atmosferze w postaci odpadowego ciepła, powodując nie tylko straty materialne, ale również obciążając naturalne środowisko człowieka i wpływając na ocieplanie się klimatu. „Zrównoważoną” alternatywę stanowią tu

ogniwa paliwowe, w których konwersja paliwa (wodór, metanol, metan, mocznik) do energii (*fuel-to-energy*) przebiega w umiarkowanej temperaturze z 2–3-krotnie większą sprawnością energetyczną niż w konwencjonalnej elektrociepłowni lub w silniku spalinowym.

Zrównoważony rozwój przemysłu chemicznego to przede wszystkim odpowiednia modernizacja chemicznych procesów produkcyjnych w kierunku zmniejszenia ich energochłonności i materiałochłonności, a także poprawy ich selektywności, umożliwiającej ograniczenie powstawania produktów ubocznych i następczych. To zatem wykorzystanie selektywnych i mało energochłonnych procesów chemicznych (nanokatalizatory, biotechnologia, mechanochemia, reaktory strumieniowe, formowanie addytywne) oraz odpowiednich materiałów konstrukcyjnych do budowy aparatury, rurociągów i zbiorników magazynowych. Zrównoważony rozwój obejmuje również wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (farmy słoneczne i wiatrowe) do produkcji chemikaliów, zwłaszcza zielonego wodoru, wykorzystywanego zarówno w celach energetycznych (ogniwa paliwowe w środkach transportu), jak i w syntezach chemicznych (metanol, amoniak, hydrorafinacja produktów, uwodornienie olejów). To także



Fig. 7. Fire of waste dump in Kamieniec²⁶⁾

Rys. 7. Pożar wysypiska odpadów w Kamieńcu²⁶⁾

takie projektowanie wyrobów i urządzeń, aby koniec życia jednego produktu mógł stanowić początek życia innego produktu.

GOZ wzoruje się na dobrze funkcjonującym w przyrodzie obiegu wody słodkiej (spontaniczne parowanie wody z oceanów i kondensacja pary wodnej w chmurach) oraz obiegu ditlenku węgla (pochodzący ze spalania i oddychania ditlenek węgla jest w procesie fotosyntezy konwertowany do polisacharydów, wykorzystywanych jako pożywienie i materiał konstrukcyjny). W ramach fazy Chemia 4.0 szczególnie ważne stało się oparcie produkcji chemicznej na surowcach odnawialnych (biomasa) oraz surowcach wtórnych i umożliwienie zagospodarowania wszelkich odpadów (a zwłaszcza odpadów konsumenckich, powstających po upływie czasu życia produktów chemicznych) i zastąpienia nimi nieodnawialnych surowców mineralnych. Wprawdzie przemysł chemiczny już wcześniej w zasadzie uporał się z problemem większości odpadów pochodzących z własnej działalności produkcyjnej, zarówno poprzez wprowadzenie skutecznych metod oczyszczania gazów odlotowych i ścieków wodnych, jak i poprzez zagospodarowanie produktów ubocznych i odpadowych, ale nadal na nielegalnych wysypiskach „ładują” niebezpieczne odpady chemiczne. GOZ w przemyśle chemicznym to jednak nie tylko wykorzystanie własnych odpadów produkcyjnych, ale przede wszystkim wykorzystywanie jako surowców wtórnych wszelkich odpadów poprodukcyjnych w rolnictwie, przemyśle rolno-spożywczym, przemyśle elektrycznym i elektronicznym oraz w przemyśle maszynowym, a także odpadów konsumpcyjnych (komunalnych). Chemia umożliwia głęboki przerób takich odpadów, którego nie zapewnia „tradycyjny” recykling odpadowych materiałów (zbiórka złomu metalowego i stłuczki szklanej, kaucjonowanie opakowań, prosty recykling mechaniczny zużytych materiałów i tekstyliów). Chemiczny (lub biochemiczny) przerób tych odpadów umożliwia zarówno odzysk surowców chemicznych (monomerów) wykorzystanych do ich wytworzenia, jak i zapewnienie dostawy potrzebnych surowców. Jako przykłady wymienić tu można fermentację sacharydów do etanolu, propanolu i pochodnych furanu, fermentację odpadowej biomasy do biometanu i biofermentu (nawóz dla rolnictwa), zgazowanie zmieszanych odpadów

komunalnych z wytworzeniem wodoru, wykorzystywanego dalej jako paliwo lub jak surowiec do produkcji metanolu i amoniaku, odzysk metali szlachetnych, metali ziem rzadkich i litu ze zużytych urządzeń elektronicznych, a także wykorzystanie ditlenku węgla z gazów odlotowych jako surowca do syntez chemicznych.

Ważnym elementem fazy Chemia 4.0 jest wreszcie cyfryzacja procesów produkcyjnych i administracyjnych, mająca na celu wykorzystanie wszelkich rezerw tkwiących w tych procesach. To nie tylko usprawnienie zarządzania przedsiębiorstwami przemysłowymi i logistyką w obrocie towarowym (zarządzanie łańcuchami dostaw), ale przede wszystkim to modelowanie i symulacje komputerowe procesów chemicznych, umożliwiające ich automatyzację i sterowanie (Internet Rzeczy, bliźniaki cyfrowe, sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe), a także tworzenie baz niezbędnych danych o rynku (kooperanci, dostawcy surowców, odbiorcy produktów) oraz poprawa bezpieczeństwa pracy i zmniejszenie awaryjności urządzeń. Gromadzenie i dostępność danych to także bezsporna korzyść dla obszaru badań i rozwoju R&D (*research and development*), w którym coraz częściej działają międzynarodowe zespoły badawcze. Oznacza to możliwość modelowania (projektowania) na poziomie molekularnym struktur cząsteczek chemicznych o określonych właściwościach (farmacja), szybką analizę źródeł bibliograficznych, prowadzenie elektronicznych dzienników laboratoryjnych i pomoc w przygotowywaniu publikacji. Cyfryzacja przemysłu chemicznego wymaga szczególnych kompetencji, których kształcenie nie było wcześniej przewidziane w programach studiów inżynierów chemików. Przydatne dla nich mogą być wytyczne i wskazówki zawarte w podręczniku⁴⁴⁾ przygotowanym przez zespół niemieckich ekspertów z przemysłu i firm konsultingowych.

Koncern BASF wdraża fazę Chemia 4.0

Podstawy fazy Chemia 4.0 sformułował w 2016 r. K. Bock³⁸⁾, prezes niemieckiego Związku Przemysłu Chemicznego VCI (Verband der Chemischen Industrie), były prezes zarządu koncernu BASF i obecny prezes jego rady nadzorczej, a jego „filozofię” przedstawił A. Kicherer⁴⁵⁾, ekspert BASF, w listopadzie 2018 r. na konferen-

cji stowarzyszenia VCW (Vereinigung für Chemie Und Wirtschaft) w Leverkusen. Czy z tego też względu aktywność koncernu BASF w ciągu ostatnich 15 lat można traktować jako przykład do naśladowania?

W ramach fazy Chemia 4.0 koncern BASF zainicjował wiele działań mających na celu wprowadzenie w życie gospodarki obiegu zamkniętego w myśl zasady *close-the-loops* (zamykanie pętli). Przykładem takiego działania stał się odzysk metali szlachetnych (platyna, pallad, rod) ze zużytych katalizatorów do dopalania gazów spalinowych w samochodach, realizowany w skali przemysłowej przez BASF Environmental Catalyst and Metal Solutions (ECMS)⁴⁶⁾ z siedzibą we Wrocławiu. Firma ta zajmuje się pełnym łańcuchem produkcyjnym, obejmującym wytwarzanie tych katalizatorów (zakład BASF Polska w Środzie Śląskiej), recykling zużytych katalizatorów oraz obrót tymi metalami, wykorzystując zaawansowane procesy odzysku (hydrometalurgia i pirometalurgia). W 2023 r. BASF zawarł z izraelską firmą Tenova Advanced Technologies umowę w sprawie wspólnego rozwijania technologii efektywnego recyklingu akumulatorów litowo-jonowych, obejmującej przede wszystkim odzysk litu z tych akumulatorów, i wdrożył ten innowacyjny proces w prototypowej instalacji do recyklingu akumulatorów w swoich zakładach w Schwarzhilde (Niemcy)⁴⁷⁾.

Koncern BASF podjął też wyzwanie w zakresie chemicznego recyklingu materiałów polimerowych i nienadające się do mechanicznego recyklingu zmieszane odpady (opakowania, opony) przekształca pod hasłem ChemCycling® w olej pirolityczny, który jest surowcem do wytwarzania nowych produktów chemicznych⁴⁸⁾. Aby móc skalować tę technologię, Koncern pozyskał partnerów technologicznych, którzy prowadzą termochemiczny rozkład (pirolizę) odpadów, a uzyskiwany olej pirolityczny jest wprowadzany do sieci produkcyjnej Koncernu na początku łańcucha wartości. Powstają nowe, oznaczone przyrostkiem „Cycled®”, produkty (np. opakowania, części samochodowe) o tej samej jakości co konwencjonalne.

BASF sięgnął również po surowce odnawialne, zwłaszcza odpadową biomasę, by wytwarzać z nich półprodukty organiczne⁴⁹⁾. Wprawdzie w jego profilu produkcyjnym nie znalazł się biometan, ale podjął on produkcję butanodiolu i tetrahydrofuranu

z biomasy i oparł na nich produkcję poli(tereftalanu butylenu) (Ultradur®)⁵⁰, termoplastycznych poliuretanów oraz poli(tlenku butylenu) (polyTHF®). Biodegradowalnym (kompostowalnym) polimerem produkowanym w BASF częściowo z odnawialnych surowców jest poli(adydinian butylenu-ko-tereftalan) PBAT (*polybutylene adipate-co-terephthalate*) ecovio®, który jest wykorzystywany do produkcji worków na śmieci, opakowań warzyw i owoców, toreb na zakupy i folii ogrodniczej⁵¹.

Aby pozyskać zieloną energię do produkcji pary dla wytwórni kwasu mrówkowego, Koncern uruchamia w swoich zakładach w Ludwigshafen stację pomp ciepła⁵², której moc cieplna wyniesie 50 MW, a produkcja pary osiągnie 500 tys. t/r.

Ostatnio BASF dokonał znacznych postępów w zakresie biotechnologii i rozszerzył też produkcję enzymów spożywczych, realizowaną w segmencie „Nutrition and Health”. W tym zakresie Koncern jest pionierem, gdyż już w 1991 r. uruchomił produkcję fitazy, sprzedawanej pod nazwą Natuphos®. W późniejszych latach rozszerzył swoje portfolio w tym zakresie o takie enzymy, jak ksylanaza, glukonaza i mannanaza. W tej chwili rozważa uruchomienie produkcji witamin oraz karotenoidów i poszukuje partnerów do realizacji tego przedsięwzięcia. Na początku 2025 r. BASF rozszerzył też produkcję enzymów stosowanych w środkach piorących i kosmetyce (segment „Care Chemicals”) i wprowadził do swojej oferty płynne enzymy, zapewniające skuteczne usuwanie plam, pielęgnację tkanin i nieskazitelną ich biel. W ten sposób uzupełnił swoją ofertę o lipazę, celulazę i amylazę, umacniając pozycję lidera innowacji oraz dostawcy surowców dla branży chemii gospodarczej i przemysłowej⁵³. Ostatnio Koncern podpisał z firmą International Flavors & Fragrances Inc. umowę o strategicznym partnerstwie w celu stworzenia enzymów nowej generacji do zastosowań w środkach piorących i kosmetykach⁵⁴. Współpraca ta ma dostarczyć wielu rozwiązań, udoskonalających formuły produktów do pielęgnacji osobistej, zmniejszających wpływ na środowisko i wspierających transformację w kierunku bardziej zrównoważonej przyszłości.

We współpracy z firmą Siemens Energy koncern BASF uruchomił w 2024 r. w swoich zakładach w Ludwigshafen opartą na 72 elektrolizerach PEM (*proton exchange*



Fig. 8. Waste-fired communal heat and power station in Wien Spittelau²⁷⁾

Rys. 8. Miejska elektrociepłownia opalana odpadami komunalnymi Wien-Spittelau²⁷⁾

membrane) wytwórnię zielonego wodoru o mocy 54 MW (zdolność produkcyjna wodoru 8 tys. t/r). Pozyskiwany wodór będzie wykorzystywany na potrzeby własne i na cele transportowe w regionie Rhine-Neckar⁵⁵. W nowej wytwórni akrylamidu, którą BASF uruchomił w Nanjing, Chiny, wykorzystany został tani biokatalizator, którym zastąpiono konwencjonalny katalizator miedziowy⁵⁶.

Niestety, Koncern kierując się „polityczną poprawnością”, określoną szkodliwymi dla gospodarki dyrektywami Komisji Europejskiej (podatek ETS od emisji ditlenku węgla)^{57, 58}, podjął również działania „dekarbonizacyjne”, obciążając zbędnymi kosztami swoje procesy produkcyjne i obniżając konkurencyjność swoich produktów. Przykładem takich działań jest wytwarzanie wodoru przez termiczny rozkład (pirolizę) metanu z gazu ziemnego⁵⁹. Proces ten jest bardzo energochłonny (reakcja przebiega w temp. powyżej 1300°C, zużycie energii wynosi 165–360 MJ/kg wodoru), a uzysk wodoru jest dwukrotnie mniejszy niż w przypadku parowego reformingu tego surowca. Jako produkt uboczny powstaje trudna do utylizacji sadza. Markowski i Wojtasik⁶⁰ oszacowali koszt wytwarzania wodoru metodą pirolizy metanu na 2,5 euro/kg, podczas gdy koszt wytwarzania wodoru przez parowy reforming metanu wynosi zaledwie 2,0 euro/kg (przy uwzględnieniu podatku ETS w kalkulacji kosztów wytwarzania). Proces pirolizy

miałby może ekonomiczne uzasadnienie, gdyby był prowadzony w plazmie niskotemperaturowej, a jego głównym produktem był czarny pigment, przydatny do barwienia polimerów lub wypełniania kauczków^{61, 62}. Czy dojdzie do przemysłowej realizacji projektu pirolizy metanu w BASF?

W wyniku realizacji fazy Chemia 4.0 nie nastąpiło zmniejszenie przychodów Koncernu, które w 2022 r. osiągnęły rekordową wartość 87,3 mld euro⁶³. Przychody te wprawdzie spadły do 65,3 mld euro w 2024 r., ale było to wynikiem globalnego pogorszenia się sytuacji gospodarczej na całym świecie.

Realizacja założeń fazy Chemia 4.0 w Polsce

W polskim przemyśle chemicznym realizacja założeń Chemii 4.0 jest jeszcze na bardzo niskim poziomie zaawansowania, ale od kilku lat patronuje jej Polska Izba Przemysłu Chemicznego, która w ramach autorskiego projektu „Chemia 4.0” aktywnie promuje jego zasady na stronie <https://pipc.org.pl/projekt-chemia-4-0>, zapewniając dopływ informacji niezbędnych do jego wdrażania. W ramach tego projektu Izba wydaje *Biuletyn Chemia 4.0* oraz organizuje konferencje poświęcone popularyzacji tej tematyki⁶⁴. Podejmowane działania koncentrowały się dotąd szczególnie wokół cyfryzacji procesów w przemyśle chemicznym (opomiarowanie, automatyzacja,

sztuczna inteligencja). W polskim przemyśle chemicznym Grupa Orlen Południe uruchamia produkcję bioetanolu przez fermentację celulozy (słoma) w zakładach w Trzebini (25 tys. t/r), a już wcześniej w zakładach w Jedliczach podjęto produkcję estrów FAME (*fatty acid methyl ester*) ze zużytych olejów roślinnych. Jednocześnie w zakładzie produkcyjnym Orlenu w Płocku zaawansowana jest budowa wytwórni oleju HVO (*hydrogenated vegetable oil*), stanowiącego dodatek zarówno do oleju napędowego, jak i do paliwa lotniczego. Zdolność produkcyjna wytwórni wyniesie 300 tys. t/r^{65, 66}. Będzie ona przystosowana do przerobu szerokiej gamy surowców lipidowych, m.in. oleju rzepakowego i posmażalniczego, a także ich mieszanek. Obecnie trwa rozruch technologiczny instalacji i pełne uruchomienie produkcji planowane jest na I kw. 2026 r.

Aktywność w obszarze fazy Chemia 4.0 podjęły również instytuty badawcze. I tak warszawski Łukasiewicz-ICHP koncentruje się na rozwijaniu technologii w zakresie otrzymywania, modyfikacji i przetworstwa biodegradowalnych polimerów syntetycznych i naturalnych, aktywnie uczestniczy w rozwoju niskoemisyjnych technologii wykorzystujących surowce ze źródeł odnawialnych oraz zmierzających do wydajnego wykorzystania energii w procesach chemicznych⁶⁷. Prowadzi też szeroko zakrojone działania badawczo-wdrożeniowe w obszarze wykorzystania biotechnologii m.in. do mikrobiologicznego wytwarzania biopolimeru P3HB z grupy polihydroksyalkanianów (PHA), całkowicie biodegradowalnego i stosowanego w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym i kosmetycznym⁶⁸, a także w zakresie recyklingu odpadów elektronicznych (odzysk metali rzadkich)⁶⁹⁻⁷¹, otrzymywania zrównoważonych folii PVA oraz folii na bazie chitosanu z ekstraktem ze skórki owoców do zastosowań w opakowaniach artykułów spożywczych^{72, 73}, powłok proszkowych⁷⁴, płyt izolacyjnych wykonanych z poliuretanu i poliizocyanuranu (PUR/PIR)⁷⁵, a także wykorzystania oprogramowania ANSYS Fluent w analizie jednofazowego przepływu cieczy przez reaktor przepływowy GramFlow⁷⁶. We współpracy z koncernem Orlen, Łukasiewicz-ICHP zrealizował i skomercjalizował w skali pilotowej projekt dotyczący wytwarzania biopaliwa HVO z takich surowców, jak olej rzepakowy, olej rybny

i odpadowe oleje posmażalnicze⁷⁷. Z kolei Łukasiewicz-ICSO prowadzi w ramach projektu Estella (program Horizon)⁷⁸ badania w dziedzinie poddających się recyklingowi kompozytów na osnowie epoksydowej, a zabrzański Instytut Technologii Paliw i Energii powrócił do wdrażania opracowanego przed laty (wspólnie z IChP i Koksownią Wałbrzych) procesu produkcji wodoru przez bezinwestycyjne współkoksowanie odpadowych materiałów polimerowych w istniejących bateriach koksowniczych (Koksownia Przyjaźń w Dąbrowie Górniczej)⁷⁹. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu włączył się w prace badawczo-rozwojowe w obszarze fermentacyjnego przetwarzania odpadowej biomasy i uruchomił pierwszą w Polsce biometanownię w Brodach⁸⁰, a Akademia Górniczo-Hutnicza podjęła prace podstawowe w zakresie wykorzystania reaktorów strumieniowych (*flow chemistry*) w syntezie organicznej⁸¹.

Podsumowanie

Realizacja fazy Chemia 4.0 stanowi poważne wyzwanie dla polskiego przemysłu chemicznego. Dokonano oceny postępu osiągniętego w czasie ostatniego ćwierćwiecza w tym zakresie. W kolejnych częściach opracowania zostaną szczegółowo przedstawione i ocenione rozwiązania procesowe wspierające zrównoważony rozwój, gospodarkę obiegu zamkniętego i cyfryzację procesów przemysłowych. W szczególności przedstawione zostaną osiągnięcia w zakresie biotechnologii przemysłowej, gospodarki wodorowej, inżynierii reaktorów strumieniowych, recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych i zużytych urządzeń elektronicznych, cyfryzacji procesów w przemyśle chemicznym oraz molekularnego modelowania (projektowania) cząsteczek API (*active pharmaceutical ingredient*).

LITERATURA

- [1] Anonim, *World population prospects 2024. Summary of results*, UN Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York 2024, ISBN: 978-92-1-148373-4.
- [2] A. Briney, *History and overview of the green revolution*, thoughtco.com/green-revolution-overview-1434948, Dec 6, 2021.
- [3] X. Li, Ch. Xie, L. Cheng, H. Tong, R. Bock, Q. Qian, W. Zhou, *Trends Biotechnol.* 2025, **43**, nr 10, 2479, doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.04.002.
- [4] J.F. Rabek, *Polimery i ich zastosowania interdyscyplinarne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020.
- [5] S. Kumari, R. Debbarma, N. Nasrin, T. Khan, S. Taj, T. Bhuyan, *Food Bioeng.* 2024, **3**, nr 2, 236, <https://doi.org/10.1002/fbe2.12096>.
- [6] A. Bartkowiak, *Trendy w sektorze opakowań w 2025 r.*, <https://foodfakty.pl>, Jan 23, 2025.
- [7] E. Ołędzka, M. Sobczak, W.L. Kołodziejski, *Polimery* 2007, **52**, nr 11/12, 793.
- [8] K. Młynarczyk, B. Podkościelna, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 2, 179, doi: 10.15199/62.2023.2.5
- [9] Anonim, *Biblia tysiąclecia*, Wydawnictwo Pallottinum, Poznań 1999.
- [10] P. Kowalczyk, *Zmiany klimatu. Polityka. Ideologia. Nauka. Fakty*, Wyd. 3S Media, Warszawa 2024, ISBN 978-8367135-13-9.
- [11] W. Huber, *Klima-Wahrheit*, GHV, Uthingen 2025.
- [12] S. Chu, *Vision for a sustainable energy future*, Richard R. Ernst lecture, ETH Zurich, <https://ethz.ch/en>, Mar 11, 2015.
- [13] S. Zafar, *Solar energy in Morocco. Key projects to know*, <https://www.ecomena.org>, Sep 10, 2025.
- [14] B. Groenendaal, *Italy, Germany, Austria, Algeria and Tunisia confirm commitment to hydrogen pipeline linking North Africa and Europe*, <https://www.greenbuildingafrica.co.za>, Jan 22, 2025.
- [15] V. Petrova, *Italy, Germany, Austria firm up support for Southern Hydrogen Corridor*, <https://renewablesnow.com>, May 31, 2024.
- [16] A. Yadav, *Top 10 countries producing the most solar power in 2025*, <https://www.wionews.com>, Oct 22, 2025.
- [17] Anonim, *WWEA Half-year Report 2025*, <https://www.wwindea.org>, Nov 10, 2025.
- [18] Anonim, *Moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce*, <https://www.rynekelektryczny.pl>, Nov 18, 2025.
- [19] Anonim, *Farmy wiatrowe: moc zainstalowana, nowe instalacje*, <https://www.rynekelektryczny.pl>, Aug 20, 2025.
- [20] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, *J. Am. Chem. Soc.* 2009, **131**, nr 17, 6050, <https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
- [21] L. Howes, *Chem. Eng. News* 2020, **98**, nr 9, Mar 8, 2020.
- [22] O. Gromek, *Olga Malinkiewicz i perowskity. Jak naukowy przełom zmienił się w biznesowy koszmarny*, <https://womenintech.perspektywy.org>, Dec 1, 2025.
- [23] X. Cheng, B. Du, J. He, W. Long, G. Su, J. Liu, Z. Fan, L. Chen, *Composites Part B: Eng.* 2025, **299**, 112411, doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112411.
- [24] A. Kiełbasiński, *Wielka Brytania konsultuje ułatwienia dla offshore*, <https://www.gospodarkamorska.pl>, Mar 6, 2025.
- [25] A.N. Aziza, *The 'world's largest dump' is in Indonesia and it's a ticking time bomb*, <https://www.vice.com/en>, Oct 14, 2019.
- [26] Anonim (PAP), *Nielegalne składowisko płonęło prawie 40 razy*, <https://www.portalsamorzadowy.pl>, Dec 20, 2025.
- [27] Anonim, *The Spittelau incinerator*, <https://www.visitingvienna.com>, Dec 4, 2025.
- [28] Bakes, *Turning waste to energy. Sweden's recycling revolution*, <https://heartafact.com>, Sep 15, 2025.
- [29] D. Lisiecka, *Kraj, który prowadzi import odpadów dla dobra energetyki*, <https://magazynbiomasa.pl>, Feb 28, 2025.
- [30] G. Rakowicz, *Gigantyczna spalarnia w Inowrocławiu*, <https://pomorska.pl/tag/spalarnia-inowroclaw>, Apr 27, 2022.
- [31] Anonim, *Pionierskie rozwiązanie dla Inowrocławia. Będzie taniej i ekologiczniej*, <https://www.inowroclaw.pl>, Mar 4, 2025.

- [32] Anonim, *Przemysł chemiczny w Polsce. Pozycja, wyzwania, perspektywy*, Wyd. Polskiej Izby Przemysłu Chemicznego, Warszawa, November 2025, ISBN 1505-6597; <https://pipc.org.pl/publikacje/raporty>.
- [33] T. Zieliński, *Rok 2025 nowym rozdaniem dla przemysłu chemicznego?*, <https://pipc.org.pl>, Dec 30, 2024.
- [34] I. Asimov, *Krótką historią chemii*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.
- [35] E. Kwiatkowski, *Dzieje chemii i przemysłu chemicznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1962.
- [36] I. Kim, *Chem. Eng. Progr.* Jan 28, 2002.
- [37] E. Zawada, *Chemia w planie sześćdziesięcioletnim*, Spółdzielnia Wydawnicza-Oświatowa Czytelnik, Katowice 1951.
- [38] K. Bock, *Chemanager*, Dec 9, 2016.
- [39] W.L. Abelshauer (red.), *German industry and global enterprise. BASF: The history of a company*, Cambridge University Press, Cambridge/New York 2004, ISBN 0-521-82726-4.
- [40] G. Collin, *Geschichte der Steinkohlenteerchemie am Beispiel der Rütgerswerke*, Urban Verlag, Hamburg 2009, ISBN 978-3-924562-06-9, s. 99.
- [41] A. Puchowicz, *Fenomen petrochemii w Płocku i na świecie*, Stowarzyszenie Płockich Naftowców, Płock 2006, ISBN 83-915827-6-0.
- [42] Anonim, *BASF Report 2010. Economic, environmental and social performance*, <https://www.basf.com>.
- [43] W. Falter, A. Keller, J.P. Nickel, H. Meincke, *Chemistry 4.0. Growth through innovation in a transforming world. Final report*, Deloitte, Verband der Chemischen Industrie, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2017-09-28>.
- [44] C. Suntrup (red.), *Digitale Chemieindustrie. Anforderungen Chemie 4.0. Praxisbeispiele und Perspektiven*, Ernst & Sohn GmbH, Berlin 2022, ISBN 978-3-527-34971-0.
- [45] A. Kicherer, *Chemanager*, Jan 3, 2019.
- [46] Anonim, *BASF Environmental Catalyst and Metal Solutions*, <https://www.basf.com/global/en>, Jun 2, 2025.
- [47] K. Kowalewska, *BASF i Tenova Advanced Technologies zawierają umowę w sprawie wspólnego rozwijania technologii efektywnego recyklingu akumulatorów litowo-jonowych*, <https://www.basf.com/pl>, Mar 14, 2023.
- [48] Anonim, *ChemCycling®. Creating a circular plastics economy with chemical recycling*, <https://plastics-rubber.basf.com/global/en/plastics-hub/chemcycling>, 2023.
- [49] K.P. Riese, *BASF expands its biomass balance portfolio for selected chemical intermediates*, <https://www.basf.com/global/en>, May 16, 2024.
- [50] Anonim, *Ultradur® (PBT). Product brochure*, <https://s3.amazonaws.com/static.entecpolymers.com/v3/uploads/BASF-Ultradur-Product-Brochure.pdf>.
- [51] Anonim, *Kompostowalne tworzywo ecovio® rozszerza możliwości recyklingu opakowań papierowych*, <https://www.chemiaindustria.com.pl/>, May 10, 2023.
- [52] K. Kaur, *BASF begins building huge industrial heat pump for low-carbon steam*, <https://www.chemistryworld.com>, Oct 6, 2025.
- [53] J. Haile, *BASF strengthens liquid enzyme portfolio for the laundry and cleaning industry*, <https://www.basf.com>, Jul 10, 2025.
- [54] J. Haile, *BASF and IFF announce strategic collaboration to drive next-generation enzyme and polymer innovation*, <https://www.basf.com>, Oct 21, 2025.
- [55] Anonim, *BASF inaugurates Germany's largest PEM electrolyser in Ludwigshafen*, <https://www.echemi.com>, Mar 19, 2025.
- [56] S. Houlton, *Biomanufacturing proliferates in chemicals*, <https://www.chemistryworld.com>, Mar 6, 2025.
- [57] I. Hukałowicz, *Gazeta Prawna*, 29 października 2025 r.
- [58] J. Polaczek, *Przem. Chem.* 2025, **104**, nr 7, 667.
- [59] B. Hellmann, *BASF and ExxonMobil join forces to advance low-emission hydrogen through methane pyrolysis technology*, Nov 17, 2025.
- [60] J. Markowski, M. Wojtasik, *Nafta-Gaz* 2023, nr 6, 428, doi: 10.18668/NG.2023.06.07.
- [61] T. Zieliński, praca doktorska, *Otrzymywanie sadzy technicznej metodą plazmochemiczną*, IChP, Warszawa 2003.
- [62] T. Zieliński et al., *Zgł. pat. pol.* P-355280 (2002).
- [63] Anonim, *BASF Report 2024. Economic, environmental and social performance*, <https://www.basf.com>.
- [64] T. Zieliński, *Biul. Projektu Chemia 4.0* 2023, nr 1, 2.
- [65] K. Koziar, *Mag. Polska Chem.* 2025, nr 4, 66.
- [66] T. Furman, *Inwestycje Orlenu w biznesie biopaliw mają poszłyż*, <https://www.parkiet.com>, Nov 6, 2025 r.
- [67] E. Śmigiera, *Nauka Biznes* 2024, <https://naukaibiznes.eu>, Dec 30, 2024.
- [68] M. Sieczkowski, *Mamy polski biopolimer P3HB. Materiał do zadań specjalnych*, <https://ichp.lukasiewicz.gov.pl>, Dec 20, 2024.
- [69] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Separations* 2025, **12**, nr 6, 167, doi.org/10.3390/separations12060167.
- [70] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Processes* 2024, **12**, nr 3, 530, doi.org/10.3390/pr12030530.
- [71] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, D. Kolasa, K. Wróbel, J. Lach, *Molecules* 2024, **29**, 3142, doi.org/10.3390/molecules29133142.
- [72] K. Łęczycka-Wilk, B. Kaczmarczyk, E. Jakubowska, K. Rolińska, M. Janowicz, S. Galus, *ACS Food Sci. Technol.* 2025, **5**, nr 7, 2731, doi.org/10.1021/acfoodscitech.5c00218.
- [73] K. Rolińska, E. Jakubowska, K. Łęczycka-Wilk, M. Żmieńko, S. Mania, A. Banach-Kopeć, *Ind. Crops Prod.* 2025, **236**, 121895, doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121895.
- [74] S. Dyjak, W. Tokarz, A. Błachowski, M. Gratzke, B. Szczęśniak, K. Sobczak, W. Kiciński, *J. Power Sources* 2024, **609**, 234612, doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234612.
- [75] K. Prałat, J. Ciemnicka, P. Jankowski, E. Wierzbicka, A. Plis, *Polish J. Chem. Technol.* 2023, **25**, nr 1, 40, doi.org/10.2478/pjct-2023-0007.
- [76] K. Gruszecki, *Analysis of single-phase flow through the GramFlow Reactor*, praca inżynierska, Politechnika Warszawska, 2024.
- [77] A. Migdał, P. Żeleziak, A. Filip, *Konf. „Od próbówki do technologii”*, Płock, Oct 24–25, 2024.
- [78] D. Kiełkiewicz, *Projektowanie biopolimeru termoutwardzalnego do produkcji biokompozytów z możliwością recyklingu*, <https://icso.lukasiewicz.gov.pl/>, Oct 21, 2025.
- [79] Anonim, *W koksowni Przyjaźń powstanie instalacja badawcza separacji wodoru*, <https://www.jswkoks.pl>, Oct 12, 2023.
- [80] K. Gębski, *Pierwsza biometanownia w Polsce rozpoczyna pracę*, wrp.pl, Feb 19, 2025.
- [81] A.I. Elhadad, M. Luty-Błocho, *Catalysts* 2025, **15**, nr 11, 1038, doi: 10.3390/catal15111038.

PTG
EuChemS
European Chemical Society

BYDGOSZCZ

68. ZJAZD NAUKOWY POLSKIEGO TOWARZYSTWA CHEMICZNEGO

14-18 WRZEŚNIA 2026

POLITECHNIKA BYDGOSKA
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

UNIWERSYTET
IM. KAZIMIERZA
WIELKIEGO
W BYDGOSZCZU

Logo of the Polish Chemical Society (PTG) and the Bydgoszcz branch of the Polish Chemical Society.