

**Marcin Krasnodębski**

Instytut Historii Nauki im. L. i A. Birkenmajerów PAN  
ORCID 0000-0001-6551-3374

## **Krótką historia kodyfikacji na rzecz chemii przyjaznej środowisku**

### **A Brief History of Codifications for Environmentally Friendly Chemistry**

Since the beginning of the 1990s, environmental protection has played an increasingly important role both in the chemical industry and in the scientific work of chemists in the academic world. A noteworthy feature of the so-called green chemistry and sustainable chemistry is the emphasis that practitioners of both disciplines lay on codifying the principles, rules, and characteristics that environmentally friendly chemical reactions and processes should meet. These codifications have a complicated epistemological status: they aim to set the criteria of 'greenness', indicate the direction of scientific development, and build the foundations for new research programs. While the most famous of these codifications are the twelve principles of green chemistry developed in the United States in 1998, successive attempts to codify a new type of environmentally friendly chemistry have been regularly made over the last twenty years – not only in the United States but also in Germany. Starting with American green chemistry, through German 'soft chemistry' (*sanfte Chemie*) and chemistry for sustainable development, and ending with circular chemistry, this article is an attempt to familiarize the Polish reader with this new tool in the work of researchers and engineers. Its purpose is to pay particular attention to the context of the creation and interpretation of consecutive sets of rules of a new type of chemistry and the challenges related to their application.

**Keywords:** green chemistry, sustainable chemistry, history of chemistry, sociology of chemistry, 12 principles of green chemistry, sustainability history

**Słowa kluczowe:** zielona chemia, chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju, historia chemii, socjologia chemii, 12 zasad zielonej chemii, historia zrównoważonego rozwoju

Zielona chemia to koncept który od ponad dwudziestu lat wzbudza ogromne emocje zarówno w świecie akademickim, jak i w przemyśle chemicznym. Chemia w drugiej połowie XX w. była tradycyjnie postrzegana jako nauka, która z jednej strony umożliwiła radykalną

poprawę jakości życia w krajach rozwiniętych, z drugiej zaś obwiniana była o przyczynienie się do daleko idącej degradacji środowiska naturalnego oraz do postępującej katastrofy klimatycznej<sup>1</sup>. Zwolennicy tak zwanej zielonej chemii (*green chemistry*) oraz chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju (*sustainable chemistry*) twierdzą, że owa dychotomia wkrótce stanie się przeszłością dzięki gruntownej transformacji filozofii uprawiania chemii w laboratorium i w fabryce.

Za punkt zwrotny w historii owej nowej zielonej chemii uznaje się z reguły książkę *Green Chemistry: Theory and Practice* Paula Anastasa i Johna Warnera z 1998 r.<sup>2</sup> Dzięki jej sukcesowi liczba publikacji używających tego pojęcia zaczęła rosnąć w zawrotnym tempie. W bazach danych, takich jak Scopus czy Web of Science, znajdziemy dziś dziesiątki tysięcy artykułów powołujących się na zieloną chemię w tytułach, streszczeniach i słowach kluczowych, a każdego roku dołączają do nich tysiące kolejnych. O ile na początku lat dwutysięcznych sztandarowym czasopismem naukowym dla ruchu zielonej chemii był periodyk „Green Chemistry”, dziś dołączyły do niego kolejne czasopisma takie jak „ChemSusChem”, „Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry”, „Green Chemistry Letters and Reviews” oraz wiele innych. Temat zielonej chemii wzbudził również zainteresowanie filozofów, socjologów, historyków oraz ekonomistów, którzy do koncepcji odnosili czasem entuzjastycznie, zachwalając jej potencjał i radykalne zerwanie ze starym sposobem myślenia na temat reakcji chemicznych<sup>3</sup>, ale czasem również krytycznie, zwracając uwagę na liczne niedoskonałości jej formalizacji<sup>4</sup>.

W praktyce pojęcie zielonej chemii może być rozumiane na dwa sposoby: deskryptywny lub normatywny. W pierwszym wypadku, jeśli dokonamy bibliometrycznej analizy publikacji naukowych, odkryjemy, czym konkretnie zajmują się chemicy używający tego terminu. Waloryzacja biomasy, ciecze jonowe, biokataliza, synteza cząsteczek przy pomocy roślin – to kilka z wielu modnych tematów z reguły klasyfikowanych jako zielona chemia.

Ale specyfika zielonej chemii wynika przede wszystkim z jej normatywnego charakteru. W sercu książki Anastasa i Warnera z 1998 r. leżało tak zwanych dwanaście zasad zielonej chemii, których celem było uczynienie reakcji i procesów chemicznych bardziej przyjaznymi środowisku. Owe dwanaście zasad zrobiło furorę w prasie naukowej. Nie tylko są one regularnie przedrukowywane w artykułach prezentujących osiągnięcia zielonej chemii<sup>5</sup>, lecz stanowią również fundament kształcenia chemików w programach studiów

- 1 Więcej na temat długiej historii postrzegania chemii i jej relacji ze środowiskiem naturalnym: B. Bensaude-Vincent, J. Simon, *Chemistry, the Impure Science*, London 2008.
- 2 P. Anastas, J.C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford 1998.
- 3 E.J. Woodhouse, S. Breyman, *Green Chemistry as Social Movement?*, „Science, Technology, & Human Values” t. 30, 2005, nr 2, s. 199–222; J.A. Linthorst, *An Overview: Origins and Development of Green Chemistry*, „Foundations of Chemistry” t. 12, 2010, s. 55–68; J.P. Llored, *Towards a Practical Form of Epistemology: the Case of Green Chemistry*, „Studia Philosophica Estonica” t. 5, 2012, s. 36–60; J.P. Llored, S. Sarrade, *Connecting the Philosophy of Chemistry, Green Chemistry, and Moral Philosophy*, „Foundations of Chemistry” t. 18, 2016, s. 125–152.
- 4 J. Roberts, *Creating Green Chemistry: Discursive Strategies of a Scientific Movement*, praca doktorska obroniona w Virginia Polytechnic Institute, 2006; E. Garnier, *Une approche socio-économique de l'orientation des projets de recherche en chimie doublement verte*, praca doktorska obroniona w Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012; M. Nieddu, *Existe-t-il réellement un nouveau paradigme de la chimie verte ?*, „Natures Sciences Sociétés” t. 22, 2014, s. 103–113.
- 5 Zob. np. H. Erythropel, J. Zimmerman, T. de Winter, L. Petitjean, F. Melnikov, C.H. Lam, A. Lounsbury, K. Mellor, N. Jankovia, Q. Tu, L. Pincus, M. Falinski, W. Shi, P. Coish, D. Plata, P. Anastas, *The Green ChemisTREE: 20 Years after Taking Root with the 12 Principles*, „Green Chemistry” t. 9, 2018, s. 1929–1961.

magisterskich poświęconych tej nowej dyscyplinie<sup>6</sup>. Kodyfikacja Anastasa i Warnera zainspirowała dziesiątki innych naukowców do redagowania podobnych list. Ostatnie 30 lat to historia nieustających prób zbudowania szeregu reguł o normatywnej naturze, które umożliwiłyby chemikom tworzenie lepszej i zdrowszej chemii. Spośród tych licznych kodyfikacji jedynie 12 zasad zielonej chemii zostało poddanych analizie przez historyków i socjologów nauki<sup>7</sup>. Kontekst powstania późniejszych (lub wcześniejszych i zapomnianych) kodyfikacji jest więc często nieznaną nawet wśród specjalistów.

Celem tego artykułu jest zebranie w jednym miejscu największych i najbardziej wpływowych kodyfikacji na rzecz chemii przyjaznej środowisku oraz wytłumaczenie kontekstu ich powstania. W tym sensie artykuł ten jest skierowany do trzech różnych kategorii czytelników. Po pierwsze, może on stanowić użyteczne narzędzie w rękach chemików zajmujących się zieloną chemią i siostrzanymi dyscyplinami, szukających nowych sposobów myślenia na temat swojej własnej praktyki naukowej. Artykuł może stanowić więc „ściąagę” pomocną w laboratorium i w fabryce. Drugą grupą adresatów są specjaliści od zrównoważonego rozwoju (*sustainability*), którym kodyfikacje zielonej chemii mogą dać wgląd w dominujące wśród chemików dyskursy i narracje dotyczące relacji między chemią, toksykologią, zrównoważonym rozwojem oraz środowiskiem naturalnym. Refleksja nad różnymi zielonymi zasadami może być załącznikiem dyskusji nad budową wspólnego języka dotyczącego zrównoważonego rozwoju pomiędzy chemikami oraz przedstawicielami nauk humanistycznych, społecznych i ekonomicznych. Wreszcie ostatnią publiką są oczywiście historycy, filozofowie i socjologowie nauki zainteresowani najnowszymi trendami w chemii, które ilustrują zbliżające się wielkimi krokami daleko idące zmiany w sposobie rozumienia działalności naukowej w XXI w.

Kluczową tezą artykułu jest to, że kodyfikacje chemii przyjaznej środowisku stanowią radykalnie nowy sposób myślenia na temat odpowiedzialnej praktyki naukowej. Ta radykalność nie tkwi jednak w ich treści jako takiej. Wiele z proponowanych zasad i reguł było wyrażanych i funkcjonowało w inny sposób nawet przez dziesięciolecia przed włączeniem ich w ramy tej lub innej kodyfikacji. Radykalną jest sama potrzeba formalizacji kryteriów o charakterze technicznym, epistemologicznym i etycznym w jedną spójną całość, mającą na celu wpłynięcie na to, w jaki sposób uprawiana jest nauka.

Artykuł ten stanowi również jedną z pierwszych publikacji zawierających tłumaczenia niektórych z tych kodyfikacji na język polski. Należy jednak zwrócić uwagę, że żargon, w którym powstają owe zasady i reguły, jest często trudny do przetłumaczenia, jeśli chcemy zachować w jak największym stopniu ich oryginalny sens, a nie dokonywać interpretacji. Jako przykład może posłużyć termin *sustainability*, tłumaczony w literaturze jako „zrównoważony rozwój”. Jest to oczywiście problematyczne, gdyż w języku angielskim *sustainability* i *sustainable development* mają odmienne znaczenie. W artykule nie będziemy wchodzić w te trudności (mogłyby być one przedmiotem odrębnej pracy), ale w większości przypadków prezentujemy obie wersje językowe, w związku z czym czytelnicy sami mogą dostrzec ewentualne problemy i być może zaproponować trafniejsze tłumaczenia w przyszłych publikacjach.

6 Zob. np. G.T.C. Ribeiro, D.A. Costa, A.A.S.C. Machado, „Green Star”: a Holistic Green Chemistry Metric for Evaluation of Teaching Laboratory Experiments, „Green Chemistry Letters and Reviews” t. 3, 2010, s. 149–159.

7 J. Roberts, op. cit.

Artykuł podzielony jest na cztery części. W pierwszej zajmujemy się najbardziej popularnymi zasadami zielonej chemii opracowanymi lub przynajmniej popularyzowanymi przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA, *Environmental Protection Agency*). W drugiej przyjrzymy się zapomnianym niemieckim i ogólnoeuropejskim kodyfikacjom z lat dziewięćdziesiątych. W trzeciej części pochylimy się nad współczesną niemiecką tradycją chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju (*sustainable chemistry/nachhaltige Chemie*), skodyfikowaną w dużej mierze po 2015 r. W ostatniej zaś zajmujemy się nową koncepcją chemii zamkniętego obiegu (*circular chemistry*).

## 1. Kluczowe kodyfikacje amerykańskiej zielonej chemii

W 1998 r. Anastas i Warner opublikowali książkę *Green Chemistry: Theory and Practice*, zawierającą między innymi dwanaście zasad zielonej chemii (Tabela 1). Historia dwunastu zasad, jak również ich ograniczeń, była już wielokrotnie podnoszona w literaturze<sup>8</sup>. Są one podsumowaniem refleksji trwającej w EPA od co najmniej 1991 r. oraz próbą odpowiedzi na wyzwania związane z ochroną środowiska już na poziomie syntezy chemikaliów. Filozofia, którą kierowali się Anastas i Warner, zakładała, że lepiej zapobiegać powstawaniu zanieczyszczeń, niż usuwać je ze środowiska po fakcie. Dwanaście zasad miało na celu wyrażenie tej kluczowej ambicji zielonej chemii w prosty i zwięzły sposób.

Tabela 1. Dwanaście zasad zielonej chemii (1998 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Lepiej zapobiegać powstawaniu odpadów, niż usuwać je po fakcie.	1. It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it has been created.
2. Metody syntezy powinny być projektowane w taki sposób, by w finalnym produkcie zawarte były wszystkie materiały użyte w danym procesie chemicznym.	2. Synthetic methods should be designed to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.
3. Tam, gdzie to praktycznie wykonalne, metody syntezy powinny być projektowane w taki sposób, by używać i wytwarzać substancje, które posiadają jak najniższą toksyczność dla ludzkiego zdrowia oraz środowiska naturalnego.	3. Wherever practicable, synthetic methods should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.
4. Produkty chemiczne powinny być projektowane w taki sposób, by zachować swoje funkcje, minimalizując jednocześnie ich toksyczność.	4. Chemical products should be designed to effect their desired function while minimizing their toxicity.
5. Użycie substancji pomocniczych (np. rozpuszczalników, substancji rozdzielających itp.) powinno być ograniczane, kiedy tylko jest to możliwe, a jeśli nie jest to możliwe, powinny one być jak najmniej szkodliwe.	5. The use of auxiliary substances (e.g. solvents, separation agents etc.) should be made unnecessary wherever possible and innocuous when used.

<sup>8</sup> J. Roberts, op. cit.; M. Nieddu, op. cit.; J.A., Linthorst, op. cit.

6. Zużycie energii powinno być uwzględnione ze środowiskowego i ekonomicznego punktu widzenia oraz zmniejszane jeśli to możliwe. Syntezy chemiczne powinny być prowadzone w temperaturze i ciśnieniu otoczenia.	6. Energy requirements of chemical processes should be recognized for their environmental and economic impacts and should be minimized. If possible, synthetic methods should be conducted at ambient temperature and pressure.
7. Surowce naturalne powinny być odnawialne, gdy jest to technicznie i ekonomicznie sensowne.	7. A raw material or feedstock should be renewable rather than depleting whenever technically and economically practicable.
8. Niepotrzebna derywatyzacja (używanie grup ochronnych, tymczasowa modyfikacja procesów fizycznych/chemicznych) powinna być zmniejszana lub unikana, gdy jest to możliwe, ponieważ kroki te wymagają dodatkowych odczynników i mogą generować odpady.	8. Unnecessary derivatization (use of blocking groups, protection/deprotection, temporary modification of physical/chemical processes) should be minimized or avoided if possible, because such steps require additional reagents and can generate waste.
9. Katalizatory (jak najbardziej selektywne, jak to możliwe) są lepsze niż stechiometryczne odczynniki.	9. Catalytic reagents (as selective as possible) are superior to stoichiometric reagents.
10. Produkty chemiczne powinny być projektowane w taki sposób, by po okresie ich używania rozkładały się na nieszkodliwe substancje i jak najkrócej krążyły w środowisku.	10. Chemical products should be designed so that at the end of their function they break down into innocuous degradation products and do not persist in the environment.
11. Metody analityczne powinny być rozwijane w taki sposób, by umożliwić monitorowanie i kontrolę procesów w czasie rzeczywistym przed powstaniem niebezpiecznych substancji.	11. Analytical methodologies need to be further developed to allow for real-time, in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.
12. Substancje i ich postać powinny być dobierane w taki sposób, by zminimalizować ryzyko wypadków chemicznych takich jak zanieczyszczenia, wybuchy i pożary.	12. Substances and the form of a substance used in a chemical process should be chosen to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

Źródło: P. Anastas, J.C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford 1998, s. 30.

Pierwszą rzeczą, na którą mogą zwrócić uwagę czytelnicy, jest fakt, że zaproponowane w Tabeli 1 tłumaczenie nie odpowiada dokładnie przekładowi na przykład na stronie polskojęzycznej Wikipedii<sup>9</sup>. Problem nie polega jedynie na trudnościach językowych, lecz wynika również z faktu, że dwanaście zasad rzadko kiedy cytowanych jest w ich oryginalnej formie z 1998 r. Wręcz przeciwnie, bardzo szybko doszło do ich uproszczenia i skrócenia, szczególnie w publikacjach Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego (ACS, *American Chemical Society*), gdzie każdej zasadzie nadano zwięzły tytuł. Tłumaczenie najbardziej rozpowszechnionej wersji dostępnej obecnie między innymi na stronie Towarzystwa znajduje się Tabeli 2<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Zielona chemia, pl.wikipedia.org/wiki/Zielona\_chemia [dostęp 21.06.2021].

<sup>10</sup> Green Chemistry, Design Principles, www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html [dostęp 21.06.2021].

Tabela 2. Dwanaście zasad zielonej chemii. Nazwy skrócone.

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Zapobieganie (zanieczyszczeniom)	1. Prevention
2. Ekonomia atomowa	2. Atom Economy
3. Mniej niebezpieczne syntezy chemiczne	3. Less hazardous chemical syntheses
4. Projektowanie bezpieczniejszych chemikaliów	4. Designing safer chemicals
5. Bezpieczniejsze rozpuszczalniki i substancje pomocnicze	5. Safer solvents and auxiliaries
6. Projektowanie na rzecz wydajności energetycznej	6. Design for energy efficiency
7. Używanie odnawialnych surowców	7. Use of renewable feedstocks
8. Zmniejszenie ilości derywatów	8. Reduce derivatives
9. Kataliza	9. Catalysis
10. Projektowanie z myślą o degradacji	10. Design for degradation
11. Analiza w czasie rzeczywistym w celu zapobieganiu oczyszczeniom	11. Real-time analysis for pollution prevention
12. Z natury bezpieczniejsza chemia na rzecz zapobiegania wypadkom	12. Inherently safer chemistry for accident prevention

Źródło: Green Chemistry, Design Principles, [www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html](http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html) [dostęp 21.06.2021].

Lista zasad ACS opiera się na siatce pojęciowej obecnej już w oryginalnej książce z 1998 r., ale nie zawsze jeszcze wtedy w pełni zwerbalizowanej. Oczywiście wersja ta stanowi uproszczenie i umykają w niej pewne detale. Weźmy jako przykład zasadę numer 2. O ile w pierwotnej wersji chodzi o pewien ogólny sposób myślenia na temat „oszczędnego” projektowania reakcji chemicznych, wersja ACS używa terminu „ekonomia atomowa”, który odnosi się do bardzo konkretnego pojęcia sprecyzowanego w znaczącym artykule Barry’ego Trosta z 1991 r.<sup>11</sup> Tym samym nazwa zasady nakierowuje na jej interpretację poprzez pryzmat jednoznacznego kadru teoretycznego. Oczywiście specjaliści od zielonej chemii mają świadomość tych trudności terminologicznych, warto natomiast zwrócić uwagę, że hasła te są zbyt ogólne, w związku z czym wymagają daleko idącej interpretacji, by zrozumieć, jak używać ich praktyce.

Z naszego punktu widzenia istotnym jest, że w najnowszych publikacjach (np. w jubileuszowym artykule z 2018 r. na dwudziestolecie ich sformułowania) dwanaście zasad prezentowanych jest często tak, jakby wyczerpywały w całości pojęcie zielonej chemii<sup>12</sup>. Zielona chemia staje się równoważna dwunastu zasadom: są one odpowiedzialne zarówno za dotychczasowe postępy dyscypliny, jak i wyznaczają jej nowe ścieżki rozwoju na przyszłość. Znaczenie, które przywiązują niektórzy współcześni chemicy do zasad Anastasa i Wanrera, jest tym bardziej paradoksalne, jeśli zwrócimy uwagę, że w oryginalnej książce ich prezentacja stanowiła zaledwie jeden z kilku rozdziałów.

11 B. Trost, *The Atom Economy – A Search for Synthetic Efficiency*, „Science” t. 254, 1991, s. 1471–1477.

12 H. Erythropel, J. Zimmerman, T. de Winter, L. Petitjean, F. Melnikov, C.H. Lam, A. Lounsbury, K. Mellor, N. Janakova, Q. Tu, L. Pincus, M. Falinski, W. Shi, P. Coish, D. Plata, P. Anastas, op. cit., s. 1929–1961.

Kłopot w tym, że dwanaście zasad jest pod wieloma względami niedoskonałe. Na przykład z epistemologicznego punktu widzenia mają one różny charakter. Część z nich jest programatyczna i wyznacza cele do osiągnięcia (1, 3, 4, 6, 10, 12), część natomiast stanowi środki do celu (2, 5, 8, 9, 11) lub może być rozumiana na oba sposoby (7). Weźmy jako przykład zasadę dotyczącą katalizy (9). Kataliza nie jest sama w sobie zielona, lecz jedynie wtedy, gdy stanowi środek do osiągnięcia zielonego celu (mniej odpadów, mniej zużytej energii, mniejsza toksyczność itp.). Podobnie ma się rzecz z ekonomią atomową (2) czy analizą procesów w czasie rzeczywistym (11). Można by więc zastanowić się, czy nie byłoby rozsądniej sporządzić dwie listy: jedną wyznaczającą ambicje do osiągnięcia i drugą opisującą techniki to umożliwiające.

Do pewnego stopnia to właśnie wydarzyło się na przestrzeni kolejnych kilku lat po publikacji z 1998 r. Neil Winterton, naukowiec regularnie publikujący na łamach czasopiśma „Green Chemistry”, twierdził, że mimo swojej użyteczności dwanaście zasad jest zbyt abstrakcyjne i nie daje chemikom wystarczających narzędzi do codziennej pracy w laboratorium. W związku z tym zaproponował on w 2001 r. „Dwanaście dodatkowych zasad zielonej chemii”, które miały uzupełnić poprzednią kodyfikację (Tabela 3)<sup>13</sup>.

Tabela 3. Dwanaście dodatkowych zasad zielonej chemii Wintertona (2001 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Zidentyfikuj i skwantyfikuj produkty uboczne	1. Identify and quantify by-products
2. Udokumentuj konwersje, selektywność oraz wydajność	2. Report conversions, selectivities and productivities
3. Oblicz bilans masowy procesu	3. Establish full mass-balance for process
4. Zmierz straty katalizatora i rozpuszczalnika w powietrzu i wodzie	4. Measure catalyst and solvent losses in air and aqueous effluent
5. Zbadaj podstawy termochemii	5. Investigate basic thermochemistry
6. Antycypuj ograniczenia transferów ciepła i masy	6. Anticipate heat and mass transfer limitations
7. Skonsultuj się z inżynierem chemii lub inżynierem procesów	7. Consult a chemical or process engineer
8. Weź pod uwagę konsekwencje procesu przy wyborze rodzaju chemii	8. Consider effect of overall process on choice of chemistry
9. Postaraj się rozwinąć i stosować mierzniaki na rzecz zrównoważonego rozwoju	9. Help develop and apply sustainability measures
10. Skwantyfikuj i zminimalizuj użycie sprzętu	10. Quantify and minimise use of utilities
11. Zwróć uwagę na sytuacje w których bezpieczeństwo i ograniczenie produkcji odpadów są nie do pogodzenia	11. Recognise where safety and waste minimisation are incompatible
12. Monitoruj, dokumentuj i ograniczaj odpady laboratoryjne	12. Monitor, report and minimise laboratory waste emitted.

Źródło: N. Winterton, *Twelve More Green Chemistry Principles*, „Green Chemistry” t. 3, 2001, s. G73–G75.

13 N. Winterton, *Twelve More Green Chemistry Principles*, „Green Chemistry” t. 3, 2001, s. G73–G75.

W przeciwieństwie do zasad Anastasa i Warnera Iwia część zasad Wintertona nie ma immanentnie zielonego charakteru, lecz mogą one być pomocne w projektowaniu procesów chemicznych przyjaznych środowisku punkt po punkcie podczas rutynowej pracy w laboratorium. W tym sensie nie mówią nam one wiele o zielonej chemii jako takiej, lecz raczej o praktycznych sposobach jej implementacji. Jednocześnie można im zarzucić, że niektóre z nich powinny znaleźć zastosowanie w każdej praktyce laboratoryjnej, nie tylko zielonej.

Choć Winterton czuł, że oryginalne dwanaście zasad jest zbyt abstrakcyjne i związku z tym mało praktyczne w codziennej pracy chemików, sam Anastas poszedł w odmiennym kierunku. Wspólnie z Julie Zimmerman opublikował on w 2003 r. dwanaście zasad zielonej inżynierii o zdecydowanie bardziej ogólnym charakterze (Tabela 4)<sup>14</sup>.

Tabela 4. Dwanaście zasad zielonej inżynierii (2003 r.).

Tłumaczenie	Wersja
1. Inherentne, nie uboczne (projektanci muszą starać się, by wszystkie substancje, jak i źródła energii były inherentnie tak bezpieczne, jak to tylko możliwe)	1. Inherent Rather Than Circumstantial (Designers need to strive to ensure that all materials and energy inputs and outputs are as inherently nonhazardous as possible)
2. Prewencja zamiast leczenia (lepiej zapobiegać powstawaniu odpadów, niż usuwać je po fakcie)	2. Prevention Instead of Treatment (It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it is formed)
3. Projektowanie do separacji (operacje separacji i oczyszczania powinny być projektowane w taki sposób, by ograniczać zużycie energii i surowców)	3. Design for Separation (Separation and purification operations should be designed to minimize energy consumption and materials use)
4. Maksymalizuj wydajność (produkty, procesy i systemy powinny być projektowane w taki sposób, by zmaksymalizować wydajność zużycia masy, energii, miejsca i czasu)	4. Maximize Efficiency (Products, processes, and systems should be designed to maximize mass, energy, space, and time efficiency)
5. Output-Pulled Versus Input-Pushed (Produkty, procesy i systemy powinny być zorientowane na osiągnięcie danego efektu, a nie warunkowane warunkami wyjściowymi)	5. Output-Pulled Versus Input-Pushed (Products, processes, and systems should be "output pulled" rather than "input pushed" through the use of energy and materials)
6. Zachowuj złożoność (entropia i złożoność muszą być postrzegane jako inwestycja podczas dokonywania wyborów dotyczących recyklingu, ponownego użycia lub bezpiecznej utylizacji)	6. Conserve Complexity (Embedded entropy and complexity must be viewed as an investment when making design choices on recycle, reuse, or beneficial disposition)
7. Trwałość, nie nieśmiertelność (celem projektu powinna być trwałość na określony okres, nie niezniszczalność produktu)	7. Durability Rather Than Immortality (Targeted durability, not immortality, should be a design goal)

14 P.T. Anastas, J. Zimmerman, *Design through the Twelve Principles of Green Engineering*, „Environmental Science and Technology” t. 37, 2003, s. 94A–101A.



8. Spełnij wymagania, minimalizuj nadwyżki (projektowanie produktów na niepotrzebne użycie (np. „one size fits all”) powinno być uznawane za błąd)	8. Meet Need, Minimize Excess (Design for unnecessary capacity or capability (e.g., “one size fits all”) solutions should be considered a design flaw)
9. Zmniejsz różnorodność surowców (różnorodność materiałów w produktach składających się z wielu komponentów powinna być ograniczana, by ułatwić ich demontaż i ponowne użycie)	9. Minimize Material Diversity (Material diversity in multicomponent products should be minimized to promote disassembly and value retention)
10. Zintegruj przepływy surowców i energii (projektuj produkty, procesy i systemy w taki sposób, by uwzględnić integrację i łączenie dostępnych przepływów energii i surowców)	10. Integrate Material and Energy Flows (Design of products, processes, and systems must include integration and interconnectivity with available energy and materials flows)
11. Projektuj uwzględniając „życie po życiu” produktu (produkty, procesy i systemy powinny być projektowane w taki sposób, by uwzględnić ich zachowanie po zakończeniu ich cyklu życia)	11. Design for Commercial “Afterlife” (Products, processes, and systems should be designed for performance in a commercial “afterlife”)
12. Odnawialne lepsze niż nieodnawialne (surowce i źródła energii powinny być odnawialne, a nie nieodnawialne)	12. Renewable Rather Than Depleting (Material and energy inputs should be renewable rather than depleting)

Źródło: P.T. Anastas, J. Zimmerman, *Design through the Twelve Principles of Green Engineering*, „Environmental Science and Technology” t. 37, 2003, s. 94A–101A.

Jeśli czytelnicy wątpią w tym momencie, czy w pełni zrozumieli sens poszczególnych zasad zielonej inżynierii, na pomoc przychodzi zarówno oryginalne opracowanie Anastasa i Zimmermana, jak i strona internetowa ACS, która oferuje ich szczegółową, niemal biblijną, egzegezę<sup>15</sup>. Trzeba jednak zaznaczyć, że waga, którą przywiązuje ACS do ich interpretacji, jest nieco paradoksalna. Anastas i Zimmerman piszą wprost, że ich celem nie było opracowanie zasad zielonej inżynierii chemicznej, lecz każdej inżynierii. Nowe dwanaście zasad miało znaleźć zastosowanie nie tylko w przemyśle chemicznym sensu stricto, lecz również np. przy architekturze przestrzeni (np. budowie miast) czy konstrukcji pojazdów. Chodziło o sformułowanie generalnych zasad, którymi powinni się kierować inżynierowie w każdej sytuacji. Anastas i Zimmerman tłumaczą, że gdyby ich zasady były mniej abstrakcyjne i ograniczyły się wyłącznie do jednej dziedziny, nie byłyby one żadnymi zasadami, a jedynie listą użytecznych technik, metod i procedur. Opinia ta jest zaskakująca, biorąc pod uwagę, że Anastas był autorem dwunastu zasad zielonej chemii, które wspominają przecież o konkretnych rozwiązaniach technicznych (kataliza, monitoring). W tym sensie dwanaście zasad zielonej chemii ma status przejściowy. Jest to wczesna próba odpowiedzi na wyzwania, które w pełni znajdują swój wyraz w dwunastu zasadach zielonej inżynierii. Część komentatorów zdaje się odczytywać drugą listę jako ekwiwalent dwunastu zasad zielonej chemii dla świata inżynierii chemicznej, ale to błędna interpretacja. Obie listy nie są komplementarne, ale analizować je należy je z perspektywy rozwoju historycznego. Niektóre z zasad zielonej inżynierii są zresztą identyczne z zasadami zielonej chemii (od-

<sup>15</sup> Green Chemistry, 12 Principles of Green Engineering, [www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-design-principles-of-green-engineering.html](http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-design-principles-of-green-engineering.html) [dostęp 21.06.2021].

nawialność, zapobieganie odpadom); stanowią one próbę ich generalizacji wykraczającą poza chemię.

Choć inżynierowie chemii z entuzjazmem przyjęli nową listę, teoretycy inżynierii spoza świata chemii wykazali się na początku lat dwutysięcznych daleko idącym sceptycyzmem wobec konceptualizacji Anastasa i Zimmerman. W 2003 r. ta dwójka badaczy uczestniczyła w konferencji poświęconej zielonej inżynierii w Sandestin na Florydzie. Ich dwanaście zasad zielonej inżynierii było wówczas omawiane obok podobnych list dotyczących zrównoważonego rozwoju (zasady Hanowerskie, zasady CERES, czy też zasady Karty Ziemi ONZu). Mimo to prelegenci konferencji w Sandestin zdecydowali się opracować swoją własną listę zasad zielonej inżynierii, niezależną od dwunastu zasad Anastasa i Zimmerman (Tabela 5)<sup>16</sup>.

Tabela 5. Dziewięć zasad zielonej inżynierii z Sandestin (2003 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Projektuj procesy i produkty w sposób holistyczny, używaj analizy systemów i włącz do swojej pracy narzędzia do ewaluacji ich wpływu na środowisku	1. Engineer processes and products holistically, use systems analysis and integrate environmental impact assessment tools
2. Dbaj i wzmacniaj naturalne ekosystemy, chroniąc jednocześnie ludzkie zdrowie i dobre samopoczucie	2. Conserve and improve natural ecosystems while protecting human health and well-being
3. Używaj analizy cyklu życia w inżynierii	3. Use life-cycle thinking in all engineering activities
4. Zadbaj, by wszystkie surowce i źródła energii (oraz sposób ich pozbywania się) były tak bezpieczne, jak to możliwe	4. Ensure that all material and energy inputs and outputs are as inherently safe and benign as possible
5. Ograniczaj zużycie surowców naturalnych	5. Minimize the depletion of natural resources
6. Staraj się ograniczać produkcję odpadów	6. Strive to prevent waste
7. Rozwijaj i stosuj rozwiązania inżynierskie, uwzględniając lokalną geografę, aspiracje oraz kulturę	7. Develop and apply engineering solutions while being cognizant of local geography, aspirations, and cultures
8. Opracowuj rozwiązania inżynierskie wykraczające poza dominujące obecnie technologie; ulepszaj istniejące technologie i staraj się wynaleźć nowe, by osiągnąć cele zrównoważonego rozwoju	8. Create engineering solutions beyond current or dominant technologies; improve, innovate, and invent (technologies) to achieve sustainability
9. Nawiązuj współpracę z lokalnymi społecznościami i interesariuszami podczas opracowywania nowych rozwiązań inżynierskich	9. Actively engage communities and stakeholders in development of engineering solutions

Źródło: M.A. Abraham, N. Nguyen, "Green Engineering: Defining the Principles" – Results from the Sandestin Conference, „Environmental Progress” t. 22, 2004, s. 233–236.

16 M.A. Abraham, N. Nguyen, "Green Engineering: Defining the Principles" – Results from the Sandestin Conference, „Environmental Progress” t. 22, 2004, s. 233–236.

Nie ma wątpliwości, że zasady z Sandestin są krótsze, prostsze i bardziej zrozumiałe niż dwanaście zasad zielonej inżynierii. To właśnie trudność języka, ale też zignorowanie przez Anastasa i Zimmerman społecznego wymiaru projektów inżynierskich (zasady 7 i 9 z Sandestin), mogło popchnąć uczestników konferencji do opracowania nowej listy. Z drugiej jednak strony, właśnie ze względu na specyfikę języka dwanaście zasad zielonej inżynierii może wydawać się bardziej ogólne, jak też lepiej przemyślane. Dają one wrażenie silnej podbudowy teoretycznej w przeciwieństwie do zasad z Sandestin, które są zdecydowanie bardziej intuicyjne. Z tego być może powodu na anglojęzycznej Wikipedii od 2014 r. co najmniej do kwietnia 2022 r. widniała informacja, jakoby zasady z Sandestin były starsze i to po ich sformułowaniu ACS zaproponowało dwanaście zasad zielonej inżynierii<sup>17</sup>. Jest to błąd, gdyż kolejność była odwrotna, ale mimo to dwanaście zasad zielonej inżynierii osiągnęło dziś zdecydowanie większą popularność niż zasady z Sandestin.

Niezależnie od powyższych uwag ACS stało się głównym orędownikiem zarówno zasad z Sandentin, jak i zasad Anastasa i Zimmerman, mimo że obie listy wykraczają daleko poza przemysł chemiczny. Cztery wyżej wymienione kodyfikacje (zasady zielonej inżynierii z Sandentin, dwanaście zasad zielonej inżynierii Anastasa i Zimmerman, dwanaście zasad zielonej chemii Anastasa i Warnera, dwanaście dodatkowych zasad zielonej chemii Wintertona) stanowią dziś kanon „zieloności” prezentowany na oficjalnej stronie ACS. Kłopot w tym, jak wspomnieliśmy powyżej, że zasady te mają bardzo różny charakter od strony epistemologicznej. Część z nich się powtarza, a część wymaga drobiazgowego komentarza. Między innymi dlatego w 2015 r. ACS wydało broszurę próbując zebrać wszystkie wspomniane zasady i przeformułować je na nowo dzieląc je na trzy kategorie:

1. maksymalizacja wydajności użycia zasobów;
2. eliminacja i zmniejszenie zagrożeń i ilości odpadów;
3. holistyczne projektowanie systemów i myślenie w kategoriach cyklu życia produktu<sup>18</sup>.

Nie będziemy wchodzić w szczegóły tego rozwiązania, natomiast po raz kolejny mamy do czynienia z sytuacją, w której konieczne było przepisanie, harmonizacja oraz reinterpretacja wyżej wymienionych zasad, prowadząc siłą rzeczy do nadania im nowego sensu.

Problemy z interpretacją widać zresztą najlepiej na przykładzie nieustających prób przeformułowania dwunastu zasad zielonej chemii i zielonej inżynierii na łatwiejszy do zapamiętania akronim. W dwóch artykułach opublikowanych na łamach czasopisma „Green Chemistry” w 2005 r. i 2008 r. grupa wpływowych chemików (między innymi ojciec brytyjskiej zielonej chemii Martyn Poliakoff) zaproponowała akronim: IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY. Pierwsze słowo streszczało zasady zielonej inżynierii, drugie zaś zasady zielonej chemii (Tabela 6)<sup>19</sup>.

17 Green engineering, en.wikipedia.org/wiki/Green\_engineering [dostęp 21.06.2021].

18 The ACS Green Chemistry Institute, Design Principles for Sustainable Green Chemistry & Engineering, 2015, s. 1, www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/resources/2015-gci-design-principles.pdf [dostęp 18.09.2021].

19 S.L.Y. Tang, R.L. Smith, M. Poliakoff, *Principles of Green Chemistry: PRODUCTIVELY*, „Green Chemistry” t. 7, 2005, s. 761–762; S.L.Y. Tang, R. Bourne, R. Smith, M. Poliakoff, *The 24 Principles of Green Engineering and Green Chemistry: “IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY”*, „Green Chemistry” t. 10, 2008, s. 268–269.

Tabela 6. IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY.

<b>I</b> – Inherently non-hazardous and safe (z natury nieszkodliwe i bezpieczne [produkty i procesy])	<b>P</b> – Prevent Waste (zapobiegaj odpadom)
<b>M</b> – Minimize material diversity (ogranicz różnorodność materiałów)	<b>R</b> – Renewable Materials (używaj surowców odnawialnych)
<b>P</b> – Prevention instead of treatment (zapobieganie zamiast usuwania skutków)	<b>O</b> – Omit derivatization steps (pomijaj derywatyzację)
<b>R</b> – Renewable material and energy inputs (odnawialne surowce i źródła energii)	<b>D</b> – Degradable chemical products (projektuj degradowalne produkty chemiczne)
<b>O</b> – Output-led design (architektura produktów zorientowana na efekt końcowy)	<b>U</b> – Use safe synthetic methods (używaj bezpiecznych metod syntezy chemicznej)
<b>V</b> – Very simple (prostota przede wszystkim)	<b>C</b> – Catalytic reagents (używaj katalizy)
<b>E</b> – Efficient use of mass, energy, space & time (wydajne użycie masy, energii, przestrzeni i czasu)	<b>T</b> – Temperature, Pressure ambient (reakcje i procesy powinny zachodzić w temperaturze pokojowej i w ciśnieniu otoczenia)
<b>M</b> – Meet the need (zaspokój potrzeby użytkownika)	<b>I</b> – In-Process Monitoring (monitoruj procesy)
<b>E</b> – Easy to separate by designations (łatwe do rozdzielenia materiały dzięki odpowiednim oznaczeniom)	<b>V</b> – Very few auxiliary substances (ogranicz użycie dodatkowych substancji)
<b>N</b> – Networks for exchange of local mass & energy (sieci sprzyjające cyrkulacji materiałów i energii na skalę lokalną)	<b>E</b> – E-factor, maximise feed in product (E-faktor, zmaksymalizuj zużycie reagentów)
<b>T</b> – Test the life cycle of the design (zbadaj cykl życia przed rozpoczęciem projektowania procesów i produktów)	<b>L</b> – Low toxicity of chemical products (celuj w niską toksyczność produktów)
<b>S</b> – Sustainability throughout product life cycle (zrównoważony rozwój osiągany przez cykl życia produktu)	<b>Y</b> – Yes it's safe (bezpieczeństwo przede wszystkim)

Źródło: S.L.Y. Tang, R.L. Smith, M. Poliakoff, *Principles of Green Chemistry: PRODUCTIVELY*, „Green Chemistry” t. 7, 2005, s. 761–762; S.L.Y. Tang, R. Bourne, R. Smith, M. Poliakoff, *The 24 Principles of Green Engineering and Green Chemistry: “IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY”*, „Green Chemistry” t. 10, 2008, s. 268–269.

Teoretycznie poszczególne litery powinny odpowiadać poszczególnym zasadom. W praktyce oczywiście konieczne były daleko idące uproszczenia. Problem w tym, że w niektórych wypadkach zmieniony został sens zasady. Wcześniej zwróciliśmy uwagę na fakt, że zasada 2 zielonej chemii została w uproszczonej wersji ACS skrócona do koncepcji „ekonomii atomowej”, która, jak wytłumaczyliśmy, ma bardzo konkretne znaczenie. W akronimie PRODUCTIVELY nie znajdziemy już ekonomii atomowej, lecz pojęcie „E-faktor”. Zarówno ekonomia atomowa i E-faktor to metody ewaluacji ilości odpadków, ale ta pierwsza dotyczy wyłącznie samej reakcji chemicznej, druga zaś całego procesu w fabryce. Pojęcia są siostrzane, ale mają różną genealogię, różnych autorów i nieco inne zastosowanie. Co więcej, o ile pojęcie ekonomii atomowej było wspomniane w książce Anastasa i Warnera z 1998 r., pojęcie E-faktor zaczęło być utożsamiane z zasadą nr 2 dopiero w połowie lat dwutysięcznych. Można więc powiedzieć, że nowy akronim nadał zasadzie nowe znaczenie.

Trudno nie zwrócić uwagi, że mimo pracy włożonej w przeformułowanie różnych zasad w zgrabne hasła, autorom akronimu IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY umknął fakt, że zasady zielonej inżynierii mają inny status niż zasady zielonej chemii, dlatego układanie ich w jeden akronim czytany razem nie ma sensu. Jak wspomnieliśmy, zasady zielonej inżynierii nie miały uzupełnić ani rozszerzyć zasad zielonej chemii, lecz były generalizacją rozciągającą się na inne dyscypliny. W pewnym sensie miały one wręcz zastąpić te pierwsze, co zresztą widać na przykładzie tego, że w obu akronimach są litery odpowiadające tym samym pojęciom, np. P (*prevention*) i R (*renewability*). To nieporozumienie wynika w dużej mierze z tego, że obie listy krążą po podręcznikach i artykułach bez kontekstu ich powstania i bez zrozumienia ich pierwotnych aspiracji, prowadząc do sytuacji, w której naukowcy traktują je, jakby jedna lista odnosiła się do nauki (chemii), a druga do inżynierii chemicznej.

Niezależnie od tej krytyki powyższe artykuły zainspirowały powstanie kolejnych akronimów. Na przykład w 2011 r. czasopismo „Green Chemistry” opublikowało artykuł podsumowujący konferencję na temat zielonej chemii w Afryce, której owocem był akronim GREENER AFRICA (Tabela 7)<sup>20</sup>.

Tabela 7. Trzydzieści zasad zielonej chemii i zielonej inżynierii GREENER AFRICA.

<b>G</b> – Generate Wealth not Waste (twórz dobrobyt, nie odpady)	<b>A</b> – Appropriate Materials for Function (użycie odpowiednich materiałów do danej funkcji)
<b>R</b> – Regard for All Life & Human Health (szanuj wszystkie żywe istoty oraz ludzkie zdrowie)	<b>F</b> – Fewer Auxiliary Substances & Solvents (mniej dodatkowych substancji i rozpuszczalników)
<b>E</b> – Energy from the Sun (energia słoneczna)	<b>R</b> – Reactions using Catalysts (reakcje polegające na katalizie)
<b>E</b> – Ensure Degradability & No Hazards (zapewnij degradowalność i bezpieczeństwo)	<b>I</b> – Indigenous Renewable Feedstocks (odnawialne materiały o pochodzeniu lokalnym)
<b>N</b> – New Ideas & Different Thinking (nowe pomysły i inne sposoby myślenia)	<b>C</b> – Cleaner Air & Water (czystsze powietrze i woda)
<b>E</b> – Engineer for Simplicity & Practicality (projektuj z myślą o prostocie i funkcjonalności)	<b>A</b> – Avoid the Mistakes of Others (unikaj błędów innych)
<b>R</b> – Recycle Whenever Possible (recykluj, gdzie tylko to możliwe)	

Źródło: N. Asfaw, Y. Chebude, A. Ejigu, B.B. Hurisso, P. Licence, R.L. Smith, S.L.Y. Tang, M. Poliakoff, *The 13 Principles of Green Chemistry and Engineering for a Greener Africa*, „Green Chemistry” t. 13, 2011, s. 1059.

Mimo że autorzy wprost cytują i powołują się na poprzednie akronimy i poprzednie listy, wyraźnie widzimy, że trzydzieści zasad na rzecz zielonej Afryki bardzo luźno podchodzi do materiału źródłowego i w gruncie rzeczy stanowi zupełnie nową listę, kładącą nacisk na nowe elementy. Szczególnie godnym uwagi jest fakt, że o ile pierwotnie zielona chemia dotyczyła zasad syntezy chemicznej, wykluczając chemię środowiskową jako taką,

<sup>20</sup> N. Asfaw, Y. Chebude, A. Ejigu, B.B. Hurisso, P. Licence, R.L. Smith, S.L.Y. Tang, M. Poliakoff, *The 13 Principles of Green Chemistry and Engineering for a Greener Africa*, „Green Chemistry” t. 13, 2011, s. 1059.

zasady na rzecz zielonej Afryki są zdecydowanie bardziej liberalne pod tym względem (np. litera C).

Nie zmienia to faktu, że wszystkie wymienione wyżej kodyfikacje stanowią część tej samej intelektualnej tradycji zapoczątkowanej przez badaczy z EPA w 1998 r. Zielona chemia próbuje określić swoje granice poprzez mnożące się formalizacje zasad, które są czymś pomiędzy kodeksem etycznym, zbiorem technik a programem badawczym. Mimo że dwanaście zasad zielonej chemii stało się dziś synonimem dyscypliny i pewnego rodzaju wzorcem do naśladowania, nie jest jednak pierwsza tego typu kodyfikacja.

## 2. Europejskie kodyfikacje na rzecz chemii przyjaznej środowisku w latach dziewięćdziesiątych

### 2.1. *Sanfte Chemie* (miękka/delikatna chemia)

Zanim temat zielonej chemii rozpalili wyobraźnię amerykańskich chemików w federalnych instytucjach badawczych, zdecydowanie bardziej radykalną transformację przemysłu chemicznego zaproponowała niemiecka partia Zielonych (*Bündnis 90/Die Grünen*). Jej sympatycy, tacy jak biolog Armin von Gleich oraz chemik Hermann Fischer, opracowali koncepcję tak zwanej „miękkiej/delikatnej chemii” (*sanfte Chemie*)<sup>21</sup>. Miękka chemia była fragmentem strategii *Chemiepolitik* partii Zielonych, toteż w przeciwieństwie do amerykańskiej zielonej chemii, miała ona *explicite* charakter polityczny, stawiając się w opozycji do niemieckiego przemysłu chemicznego. Choć prace nad mięką chemią toczyły się od drugiej połowy lat osiemdziesiątych, łącznie z publikacją książek o charakterze niemal filozoficznym na temat tego nowego sposobu uprawiania nauki<sup>22</sup>, została ona w pełni sformalizowana w książce Fischera *Plädoyer für eine Sanfte Chemie (Na rzecz miękkiej chemii)* z 1993 r. Autor zaproponował dziewięć kluczowych tez miękkiej chemii (Tabela 8).

Zasady Fischera są mniej eleganckie od zasad zielonej chemii i zdecydowanie bardziej zaangażowane ideologicznie. Propozycja nowej etyki wobec świata nieożywionego została przez jednego z recenzentów książki określona mianem ataku na „400 lat historii nauki, rozwoju ludzkiej wiedzy, triumfalnego pochodzenia myśli zachodniej”. Recenzent ów określił książkę mianem na wpół okultystycznej ze względu na silny nacisk na holistyczne rozumienie przyrody, bliskie prawdopodobnie z jego perspektywy ruchom *New Age*<sup>23</sup>. Mimo pewnych ograniczeń miękka chemia zawiera kilka niezwykle istotnych elementów, które antycypowały już w 1993 r. rozwój zielonej chemii i biotechnologii na przestrzeni kolejnych dziesięcioleci. Chodzi zarówno o nacisk na LCA (*life cycle assessment* – ocenę cyklu życia), której popularność nie przestaje rosnąć od ostatnich 30 lat i która stała się w najnowszych publikacjach z zakresu zielonej chemii głównym kryterium oceny zieloności<sup>24</sup>, czy też

21 H. Fischer, *Plädoyer für eine Sanfte Chemie*, Braunschweig 1993; M. Kirschner, *Zauberstoff für eine Sanfte Chemie*, „Bild der Wissenschaft” t. 4, 1993, s. 14–18.

22 A. von Gleich, *Der wissenschaftliche Umgang mit Natur – Über die Vielfalt harter und sanfter Naturwissenschaften*, Frankfurt 1989.

23 K.-G. Malle, *Sanfte Chemie halbkult?*, „Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium” t. 42, 1994, s. 64.

24 P. Jessop, *Editorial: Evidence of a Significant Advance in Green Chemistry*, „Green Chemistry” t. 22, 2020, s. 13–15.

na przykład o nacisk na uwzględnianie istniejącej już złożoności substancji chemicznych w projektowaniu nowych produktów, na co zwrócili uwagę dziesięć lat później (w 2003 r.) Anastas i Zimmerman w dwunastu zasadach zielonej inżynierii. Wśród też Fischera znajdziemy również biomimetyzm i pochwałę używania naturalnych procesów roślinnych. Szczególnie ta ostatnia problematyka to jeden z najmodniejszych tematów wśród artykułów oznaczonych jako „zielona chemia” w bazie Scopus pomiędzy 2010 a 2020 r. Chodzi w szczególności o syntezę nanomolekuł przy pomocy roślin<sup>25</sup>. Innymi słowy, miękka chemia była w 1993 r. zdecydowanie chemią przyszłości.

Tabela 8. Tezy *sanfte Chemie* (1993 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Analiza całej biografii produktów [chodzi m.in. o kompleksową analizę cyklu życia produktów ze szczególnym uwzględnieniem ekotoksykologii]	1. Analyse der gesamten Produktbiographien
2. Inspirowanie się naturą przy syntezie materiałów [np. biomimetyzm]	2. Stoffbildungsprozesse der Natur als Vorbild
3. Używanie różnorodności i złożoności [chodzi o zmniejszenie ilości i głębokości transformacji surowców]	3. Nutzung von Vielfalt und Komplexität
4. Przemoc przeciw naturze zwraca się przeciw nam [Fischer apeluje o nową etykę wobec świata nieożywionego]	4. Die Gewalt gegen die Stoffe wirkt auf uns zurück
5. Unikaj naruszania naturalnych struktur	5. Eingriff in Naturstrukturen vermeiden
6. Energia słoneczna to optymalne źródło energii	6. Die Nutzung der Sonnenenergie als optimale Quelle
7. Należy używać chemii roślinnej, która nie prowokuje ryzyka wypadków [Fischer zwraca uwagę na to, że naturalne procesy są bezpieczniejsze niż te używane w przemyśle chemicznym obecnie]	7. Nutzung einer Pflanzen-Chemie ohne Störfälle
8. Można uniknąć wytwarzania niebezpiecznych odpadów	8. Sondermüll kann vermieden werden
9. Miękka chemia zamyka obrót materii [chodzi między innymi o odnawialność i recykling]	9. Die Sanfte Chemie schließt Stoffkreisläufe

Źródło: H. Fischer, *Plädoyer für eine Sanfte Chemie*, Braunschweig 1993, s. 21–24.

Mimo to niechęć do polityki proponowanej przez partię Zielonych ze strony niemieckiego przemysłu chemicznego, jak również utrata na znaczeniu *Chemiepolitik* w programie partii w latach dziewięćdziesiątych, doprowadziły do stopniowej marginalizacji miękkiej chemii. Pojawienie się nowych koncepcji, takich jak amerykańska zielona chemia czy też chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju (*sustainable chemistry*), doprowadziło do stopniowego zatarcia się tej tradycji. Nawet jej czołowi przedstawiciele, tacy jak von

25 XF. Zhang, ZG. Liu, W. Shen, S. Gurunathan, *Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches*, „International Journal of Molecular Sciences” t. 17, 2016, s. 1534.

Gleich i Fischer, zaczęli używać innego języka do opisania swojej wizji chemii przyszłości<sup>26</sup>. To, co jest istotne, to fakt, że na 5 lat przed formalizacją *green chemistry* przez Anastasa i Warnera, istniała już ekwiwalentna kodyfikacja po drugiej stronie oceanu.

## 2.2. Oficjalne kodyfikacje w Europie

Nieuczciwie byłoby jednak przyjąć nadmiernie krytyczną postawę wobec niemieckiego i europejskiego przemysłu chemicznego w latach dziewięćdziesiątych. Mimo niechęci do *sanfte Chemie* konieczność rozwiązania problemu zanieczyszczeń chemicznych już na poziomie syntezy była w Europie dyskutowana równie szeroko, jak w USA<sup>27</sup>. Rezultaty tych debat również doczekały się kodyfikacji.

Pierwszą znajdziemy w dyrektywie Rady Unii Europejskiej 96/61/WE dotyczącej „zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli”. Sama dyrektywa miała na celu harmonizację kryteriów dotyczących kontroli i oceny polityki środowiskowej w przemyśle chemicznym. Dyrektywa ta regularnie używa pojęcia „najlepsze dostępne techniki”, rozumianego jako

najbardziej efektywny i zaawansowany etap rozwoju i metod prowadzenia danej działalności, który wskazuje możliwe wykorzystanie poszczególnych technik jako podstawy dla dopuszczalnych wartości emisji mający na celu zapobieganie powstawaniu, a jeżeli nie jest to możliwe, ogólne ograniczenie emisji i oddziaływania na środowisko naturalne jako całość<sup>28</sup>.

W uproszczeniu chodzi o jedno z kryteriów pomagających ustalić, czy państwo powinno przyznać zgodę na przykład na działalność zakładu chemicznego. W jaki sposób ocenić czy dany zakład wdraża lub stosuje „najlepsze dostępne techniki”? Z pomocą przychodzi aneks do dyrektywy, który określa dwanaście „okoliczności, które należy uwzględnić, ogólnie lub w szczególnych przypadkach, przy ustalaniu najlepszych dostępnych technik”. Z punktu widzenia polskiego czytelnika warto zwrócić uwagę, że jest to jedyna z opisanych w tym artykule kodyfikacji, która doczekała się oficjalnego tłumaczenia:

1. wykorzystanie technologii o niskiej ilości odpadów;
2. wykorzystanie substancji mniej niebezpiecznych;
3. zwiększanie odzysku i recyklingu substancji wytwarzanych i wykorzystywanych w procesie oraz odpadów, w stosownych przypadkach;
4. porównywalne procesy, urządzenia lub metody działania, które zostały wypróbowane i odniosły sukces na skalę przemysłową;
5. postęp technologiczny i rozwój wiedzy;

26 Fischer proponuje obecnie kompleksową zmianę myślenia w chemii pod nazwą *Chemiewende*: H. Fischer, H.G. Appelhagen, *Chemiewende: Von der intelligenten Nutzung natürlicher Rohstoffe*, München 2017.

27 D. Becher, *Vermeiden, Vermindern, Verwerten – integrierter Umweltschutz in der Produktion*, [w:] *Die Bayer-Umweltperspektive II*, Leverkusen 1991, s. 34; C. Christ, *Umweltschutz in der chemischen Industrie – Vermindern und vermeiden von Abfällen*, [w:] *Umwelt, Logistik und Verkehr*, red. R. Junemann, Dortmund 1992, s. 61–70.

28 Dyrektywa Rady Unii Europejskiej 96/61/WE z dnia 24 września 1996 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli, art. 2, pkt 6.



6. charakter, skutki i wielkość danych emisji;
7. terminy przekazania do eksploatacji nowych lub istniejących instalacji;
8. czas potrzebny do wprowadzenia najlepszych dostępnych technik;
9. zużycie i właściwości surowców (łącznie z wodą) wykorzystywanych w procesie oraz ich wydajność energetyczna;
10. potrzeba zapobiegania lub ograniczania do minimum całkowitego wpływu emisji na środowisko naturalne oraz związanych z tym zagrożeń;
11. potrzeba zapobiegania wypadkom oraz minimalizowania skutków dla środowiska naturalnego;
12. informacje publikowane przez Komisję na mocy art. 16 ust. 2 lub przez organizacje międzynarodowe<sup>29</sup>.

Tych dwanaście okoliczności znajdowało się w sercu europejskiej polityki mającej na celu zapobieganiu powstawaniu zanieczyszczeń. Niektóre z nich mają charakter czysto formalny (4, 5, 6, 7, 12), ale pozostałe są niezwykle bliskie zasadom zielonej chemii. Okoliczności 1, 2, 9, 10 czy 11 możemy odnaleźć w bardzo podobnej formie w amerykańskiej kodyfikacji. Punkt 3, dotyczący recyklingu i odzysku odpadów, a także fragment dotyczący zużycia wody w punkcie 9 idą nawet o krok dalej.

To, co odróżnia zasady z dyrektywy UE od dwunastu zasad z EPA, to ich adresaci. Dyrektywa była skierowana do rządów państw i instytucji regulacyjnych, które miały pole do manewru w zakresie jej implementacji. Dwanaście zasad zielonej chemii było skierowanych bezpośrednio do chemików. Łatwo więc zrozumieć, czemu te pierwsze nie stały się zacznem dla powstania zielonej chemii w krajach Europy, mimo że w gruncie rzeczy wyrażały identyczne ambicje na dwa lata przed amerykańską publikacją.

Sytuacja jest bardziej złożona w przypadku kolejnej kodyfikacji z 1999 r. zaproponowanej przez niemieckiego inżyniera Clausa Christa w książce *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry* (Tabela 9)<sup>30</sup>. Christ wprost nawiązuje do niemieckiej tradycji w dziedzinie zapobiegania zanieczyszczeniom z lat siedemdziesiątych. Jeśli dla *green chemistry* instytucjonalnym oparciem była EPA, dla *sanfte Chemie* partia Zielonych, a dla wyżej wspomnianych kryteriów dyrektywy 96/61/WE instytucje europejskie, z punktu widzenia Christa, *Production-Integrated Environmental Protection* to filozofia promowana przez Związek Niemieckiego Przemysłu Chemicznego (*Verband der Chemischen Industrie*).

Mimo że nieco mniej ambitne niż dwanaście zasad zielonej chemii, osiem zasad Christa stanowi kompleksowy przegląd strategii, jakie przemysł chemiczny może stosować, by zmniejszyć negatywny wpływ na środowisko. Obie kodyfikacje powstały w odległości jednego roku (1998 r. i 1999 r.) i duża część zasad na obu listach pokrywa się, mimo że szybka analiza bibliografii wskazuje jednoznacznie, że są one owocem zupełnie odrębnych tradycji intelektualnych. Christ nie cytuje w swoich pracach chemików z EPA, a chemicy z EPA nie odwołują się w swoich pracach do niemieckich doświadczeń przemysłowych.

29 Dyrektywa Rady Unii Europejskiej 96/61/WE z dnia 24 września 1996 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli, Załącznik 4.

30 C. Christ, *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*, Weinheim 1999.

Tabela 9. Osiem zasad Christa na rzecz ochrony środowiska zintegrowanej z produkcją w przemyśle chemicznym (1998 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Ulepszanie procesów chemicznych za pomocą nowych dróg syntezy	1. Improving the chemical process with the aid of new synthesis routes
2. Przesunięcie równowagi reakcji chemicznych	2. Shifting the equilibrium
3. Zwiększenie selektywności	3. Improving selectivity
4. Rozwój nowych katalizatorów	4. Developing new catalysts
5. Optymalizacja procesów	5. Process optimization
6. Zmiana środowiska reakcji chemicznej	6. Changing the reaction medium
7. Używanie surowców o wyższym stopniu czystości	7. Using raw materials of higher purity
8. Zmiana lub pozbycie się substancji pomocniczych mogących zagrażać środowisku naturalnemu	8. Replacing or eliminating auxiliaries that have a harmful effect on the environment

Źródło: C. Christ, *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*, Weinheim 1999, s. 12–13.

Wyraźnie mamy więc do czynienia z czymś w rodzaju momentu historycznego, w którym badacze pracujący niezależnie od siebie doszli do podobnych wniosków. Jednak zasady Christa nigdy nie zdobyły światowej popularności. Zgrabny język amerykańskiej zielonej chemii błyskawicznie zdominował sposób myślenia chemików w USA i w Anglii, a następnie przyjął się również w innych krajach świata, w tym w Niemczech. Książka Anastasa i Warnera stała się chemicznym bestsellerem, podczas gdy publikacja Christa jest dziś raczej ciekawostką historyczną.

Mimo to ani zasady Christa, ani zasady wyrażone w dyrektywie z 1996 r. nie zostały całkowicie zapomniane i, szczególnie w Niemczech, wielu chemików powołuje się na te europejskie kodyfikacje do dziś. W bardzo niedawnych publikacjach niektórzy autorzy zrównują je wręcz z dwunastoma zasadami zielonej chemii, jak gdyby stanowiły one jedną wspólną „zieloną” trajektorię<sup>31</sup>. Odkrywanie tych starszych kodyfikacji na nowo i umieszczanie ich w publikacjach z zakresu zielonej chemii dzisiaj, ponad dwadzieścia lat po ich pierwotnej publikacji, wydaje się wyrazem pewnego rodzaju frustracji związanej ze zmarginalizowaniem i zapomnieniem tych alternatywnych kadrów myślowych. W części publikacji na temat historii zielonej chemii można odnieść wrażenie, że jest to koncepcja, która przysłała na świat w USA i dopiero później dotarła do innych krajów, jak gdyby kwestie środowiskowe nie były poruszane w kontekście przemysłu chemicznego w Europie. To uwzględnienie starszych kodyfikacji w nowych publikacjach redagowanych przez europejskich badaczy jest więc elementem próby przepisania historii chemii przyjaznej środowisku w sposób mniej amerykańscentryczny. Jednocześnie wydaje się ona również

31 V.G. Zuin, I. Eilks, M. Elschami, K. Kümmerer, *Education in Green Chemistry and in Sustainable Chemistry: Perspectives towards Sustainability*, „Green Chemistry” t. 23, 2021, s. 1594–1608; D. Lenoir, K.-W. Schramm, J.O. Lalah, *Green Chemistry: Some Important Forerunners and Current Issues*, „Sustainable Chemistry and Pharmacy” t. 18, 2020, 100313.

elementem niemieckiej strategii budowania tożsamości nowej dyscypliny, alternatywnej wobec zielonej chemii: chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju (*nachhaltige Chemie/sustainable chemistry*).

### 3. Kodyfikacje w chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju

Historia pojęcia *sustainable chemistry* jest nierozzerwalnie złączona z historią zielonej chemii; oba terminy są zresztą regularnie stosowane wymiennie. Mimo to od blisko dwudziestu lat rozwija się specyficzne odmienne rozumienie chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju jako kategorii szerszej od zielonej chemii. Rozróżnienie to nabrało szczególnego znaczenia wśród niemieckich naukowców. Przypomnijmy niechęć niemieckiego przemysłu chemicznego do radykalnych propozycji partii Zielonych. O ile zielona chemia amerykańskiej EPA miała niewiele wspólnego z propozycjami niemieckich aktywistów ekologicznych, samo słowo „zielony” budziło niepokój, w związku z czym niemieckie instytucje niechętnie się nim posługiwały<sup>32</sup>. Pojęciem, które często stosowano w zamian była właśnie chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju (*nachhaltige Chemie*). W wielkim uproszczeniu, o ile w latach 2000–2010 pojęcia *green* i *sustainable chemistry* były z reguły rozumiane w niemal identyczny sposób, to po 2010 r. coraz częściej eksponowano różnice między nimi. Zwolennicy tej ostatniej podkreślają konieczność holistycznego podejścia do problemów ochrony środowiska przed zanieczyszczeniami, oskarżając zwolenników *green chemistry* o nadmierny nacisk na wyłącznie jeden wymiar, jakim jest synteza chemiczna.

O ile koncepcja zielonej chemii została w pełni wyłożona w 1998 r., pierwsze w pełni teoretyczne artykuły dotyczące koncepcji chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju zaczęły regularnie pojawiać się dopiero w okolicach 2015 r. Bez wątplenia jeden z najdłuższych i najbardziej konceptualnie dojrzałych z nich ukazał się po niemiecku w czasopiśmie „Sustainable Chemistry and Pharmacy” w 2019 r. pod tytułem *Das Konzept der Nachhaltigen Chemie: Schlüsselfaktoren für den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung*<sup>33</sup>. Tłumaczenie tytułu na język polski jest problematyczne ze względu na fakt, że po niemiecku, tak jak po angielsku, pojęcia *Nachhaltigkeit* (*sustainability*) oraz *nachhaltige Entwicklung* (*sustainable development*) nie są tożsame.

Autorzy artykułu prezentują w nim czołowe problemy naukowe, z jakimi muszą się zmagać naukowcy zainteresowani zrównoważonym rozwojem, sugerują przyszłe tematy badawcze i kładą fundamenty teoretyczne pod dyscyplinę, której są zwolennikami. Tłumaczą w nim między innymi, że zielona chemia (rozumiana w sposób wyrażony w 1998 r.) jest jedynie jednym z wielu narzędzi w kreowaniu chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju. To, co jest dla nas interesujące, to fakt, że autorzy nie mogli się obejść bez skodyfikowania swoich refleksji w postaci kilku zasad, jakie powinna one spełniać (Tabela 10).

32 O. Hutzinger, *The Greening of Chemistry – Is It Sustainable?*, „Environmental Science and Pollution Research” t. 6, 1999, s. 123.

33 C. Blum, D. Bunke, M. Hungsberg, E. Roelofs, A. Joas, R. Joas, M. Blepp, H.-C. Stolzenberg, *Das Konzept der Nachhaltigen Chemie: Schlüsselfaktoren für den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung*, „Sustainable Chemistry and Pharmacy” t. 13, 2019, 100140.

Tabela 10. Cele i praktyczne zasady chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju (2019 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Projektowanie i używanie z natury bezpiecznych chemikaliów	1. Gestaltung und Einsatz inhärent sicherer Chemikalien
2. Rozwój i używanie alternatywnych substancji i procesów	2. Entwicklung und Einsatz alternativer Stoffe und Verfahren
3. Ograniczenie emisji	3. Verringerung der Einträge
4. Konserwacja zasobów naturalnych	4. Schonung natürlicher Ressourcen
5. Promocja recyklingu	5. Förderung von Wiederverwertung
6. Zwiększenie szans na rynku [technologii przyjaznych środowisku]	6. Verbesserung der Marktchancen
7. Nacisk na społeczną odpowiedzialność w prywatnych firmach	7. Wahrnehmung der sozialen Verantwortung in den Unternehmen

Źródło: C. Blum, D. Bunke, M. Hungsberg, E. Roelofs, A. Joas, R. Joas, M. Blepp, H.-C. Stolzenberg, *Das Konzept der Nachhaltigen Chemie: Schlüsselfaktoren für den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung*, „Sustainable Chemistry and Pharmacy” t. 13, 2019, 100140.

Powyższa lista jest ambitna, ale bardzo problematyczna. Pierwsze trzy zasady w praktyce pokrywają się z zasadami zielonej chemii – stanowią one po prostu ich generalizację. Zasady 4 i 5 mogą zostać po części wyinterpretowane z zasady 7 zielonej chemii (odnawialność surowców). Oczywiście bezpośredni nacisk na recykling jest istotny, a konserwacja to więcej niż odnawialność, trudno natomiast nazwać te propozycje szczególnie odkrywczymi, a już na pewno nie wystarczającymi, jeśli ambicją jest odcięcie się od zielonej chemii. Nowy charakter mają bez wątpienia zasady 6 i 7. Zasada 6 mówi, że zielone technologie powinny być jednocześnie korzystne dla firm, gdyż jedynie wtedy przemysł będzie zainteresowany wprowadzeniem ich na szeroką skalę. Ta w gruncie rzeczy pesymistyczna konstatacja zostaje zniuansowana w punkcie 7, który podkreśla społeczną odpowiedzialność sektora prywatnego. Kłopot polega na tym, że obie te zasady, nawet jeśli niewyrażone w dwunastu zasadach zielonej chemii, były obecne w dyskursie EPA od samego początku. Jedną z pierwszych i najzjadlejszych krytyk wobec zielonej chemii dotyczyła właśnie tego, że jej sympatycy warunkują wprowadzanie zielonych rozwiązań ekonomiczną opłacalnością oraz że od samego początku projekt zielonej chemii niebezpiecznie blisko ocierał się w przemyśle o tak zwany *greenwashing*<sup>34</sup>. Czy takie stwierdzenia mają poparcie w rzeczywistości, to kwestia skomplikowana, ale – co istotne w tym momencie – formalizacja zaproponowana przez niemieckich chemików w 2019 r. jest zdecydowanie rozczarowująca i jej wartość dodana (ponad formalizację powiązane z EPA i amerykańską zieloną chemią) jest bardzo skromna.

Debata na temat tego, czym jest i powinna być chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju, toczyła się jednak dalej. W styczniu 2021 r. grupa naukowców pod przewodnictwem guru niemieckiej chemii środowiskowej Klausa Kümmerera opracowała w kompleksowy sposób dziesięć charakterystyk chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju<sup>35</sup>. Tabela 11 przedstawia niemieckie propozycje, ale specyfika języka użytego do ich wyjaśnienia utrud-

34 J. Roberts, op. cit.

35 K. Kümmerer, A.-K. Amsel, D. Bartkowiak, A. Bazzanella, C. Blum, C. Cinquemani, *Key Characteristics of Sustainable Chemistry. Towards a Common Understanding of Sustainable Chemistry*, Bonn 2021.

nia jednoznaczne tłumaczenie pojęć bez daleko idącej ich interpretacji (warto szczególnie zwrócić uwagę na pojęcia takie jak *legacy* czy *sustainability washing*). Polskie tłumaczenie stanowi więc jedynie niedoskonałą próbę przełożenia sensu każdej z charakterystyk. Co więcej, niektóre sformułowania w języku angielskim użyte przez niemiecką ekipę również pozostawiają nieco do życzenia od strony czysto językowej.

Tabela 11. Dziesięć cech charakterystycznych chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju (2021 r.).

Holistyczna (Holistic)	Chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju prowadzi nauki chemiczne i przemysł chemiczny w stronę koncepcji <i>sustainability</i> , mając na uwadze zasady na rzecz zrównoważonego rozwoju i ogólne rozumienie potencjału współzależności, takich jak dalekosiężne interakcje (w czasie i przestrzeni) pomiędzy chemią a innymi obszarami.
	Guiding the chemical science and the chemical sector towards contributing to Sustainability in agreement with sustainability principles and general understanding and appreciating potential interdependencies including long-distance interactions and temporal gaps between the chemical and other sectors.
Zapobiegawcza (Precautionary)	Chemia powinna unikać przenoszenia problemów i kosztów na inne sfery aktywności ludzkiej, zapobiegając długofalowym negatywnym skutkom, oraz powinna starać się rozwiązać problemy związane z już istniejącym negatywnym dziedzictwem przemysłu chemicznego, uwzględniając złożone interakcje między różnymi rodzajami odpowiedzialności.
	Avoiding transfer of problems and costs into other domains, spheres and regions at the outset, preventing future legacies and taking care of the legacies of the past including linked responsibilities.
Myślenie systemowe (Systems thinking)	Chemicy mogą opierać się na solidnym dorobku swojej dyscypliny, ale muszą uwzględniać interdyscyplinarne, multidyscyplinarne i transdyscyplinarne problemy by w pełni zrealizować założenia zrównoważonego rozwoju. W praktyce przemysłu chemicznego interesariusze muszą uwzględniać ten wielopoziomowy charakter chemii w planowaniu strategicznym, edukacji, ocenie ryzyka oraz wszystkich społecznych i ekonomicznych sferach działalności ludzkiej.
	Securing its interdisciplinary, multidisciplinary and transdisciplinary character including a strong disciplinary basis but taking into account other fields to meet Sustainability to its full extent. Application as for industrial practice including strategic and business planning, education, risk assessment and others including the social and economical spheres by all stakeholders.
Społeczna i etyczna odpowiedzialność (Ethical and Social Responsibility)	Praktycy chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju powinni uwzględniać wartość wszystkich mieszkańców naszej planety, szanować prawa człowieka, dobrobyt ludzkości, sprawiedliwość społeczną oraz interesy marginalizowanych grup społecznych. Powinni też promować uczciwe, inkluzywne, krytyczne i emancypacyjne podejście we wszystkich aspektach praktyki chemicznej, takich jak edukacja, badania naukowej i technologia.
	Adhering to value to all inhabitants of planet earth, the human rights, and welfare of all live, justice, the interest of vulnerable groups and promoting fair, inclusive, critical, and emancipatory approaches in all its fields including education, science, and technology.

<p>Współpraca i przejrzystość (Collaboration and Transparency)</p>	<p>Chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju powinna wspierać współpracę i prawo do informacji wszystkich interesariuszy w zakresie, w którym może ona pomóc w rozwoju modeli biznesowych, procesów oraz produktów, które sprzyjają zasadom zrównoważonego rozwoju. To samo dotyczy decyzji o charakterze środowiskowym, społecznym i ekonomicznym. Szczególnie należy unikać takich działań, jak <i>greenwashing</i> oraz <i>sustainability washing</i>, poprzez zapewnienie pełnej transparentności w działalności naukowej i biznesowej zarówno wobec interesariuszy, jak i społeczeństwa.</p>
<p>Odpowiedzialna innowacyjność na rzecz zrównoważonego rozwoju (Sustainable and Responsible Innovation)</p>	<p>Fostering exchange, collaboration, and right to know of all stakeholders for improving the sustainability of business models, services, processes and products and linked decisions including ecological, social, and economic development on all levels. Avoiding all "green washing" and "sustainability washing" by full transparency in all scientific and business activities towards all stakeholders, and civil society.</p> <p>Chemicy powinni starać gruntownie zreformować przemysł chemiczny, zmieniając nacisk ze skali mikro na skalę makro, starając się proaktywnie popchnąć go w stronę zrównoważonego rozwoju. Zwrócić należy uwagę na wiarygodny i przejrzysty monitoring, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikowalności molekuł.</p> <p>Transforming fully the chemical and allied industries from the molecular to the macroscopic levels of products, processes, functions and services in a proactive perspective towards sustainability including continuous trustworthy, transparent and traceable monitoring.</p>
<p>Skuteczne zarządzanie chemikaliami (Sound Chemicals Management)</p>	<p>Chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju wspiera skuteczne zarządzanie chemikaliami i odpadami przez cały ich cykl życia, koncentrując się na unikaniu toksyczności, trwałości i bioakumulacji, oraz innych negatywnych skutków dla ludzi i środowiska związanych z użyciem chemicznych substancji, materiałów, procesów oraz usług.</p> <p>Supporting the sound management of chemicals and waste throughout their whole life cycle avoiding toxicity, persistency and bio-accumulation and other harm of chemical substances, materials, processes, products and services to humans and the environment.</p>
<p>Zamknięty obieg/ cyrkularność (Circularity)</p>	<p>Należy zwracać uwagę na szanse oraz ograniczenia gospodarki zamkniętego obiegu, ze szczególnym naciskiem na problem przepływu materiałów, produktów oraz energii, w każdej możliwej skali (mikro i makro), uwzględniając kwestię objętości i złożoności.</p> <p>Accounting for the opportunities and limitations of a circular economy including reducing total substance flows, material flows, product flows, and connected energy flows at all spatial and temporal scales and dimensions especially with respect to volume and complexity.</p>
<p>Zielona chemia (Green Chemistry)</p>	<p>Chemia zrównoważonego rozwoju powinna uwzględniać jak najwięcej z dwunastu zasad zielonej chemii, ze szczególnym naciskiem na ograniczenie zagrożeń, gdy chemikalia mają spełnić konkretną funkcję, kiedy jest to do pogodzenia z zasadami zrównoważonego rozwoju.</p> <p>Meeting under sustainable chemistry application as many as possible of the 12 principles of green chemistry with hazard reduction at its core when chemicals are needed to deliver a service or function whenever and wherever this complies with sustainability.</p>

Cykl życia (Life Cycle)	Wszystkie wyżej wymienione charakterystyki powinny być uwzględniane przez cały cykl życia produktów, procesów, funkcji i usług na wszystkich możliwych poziomach, tzn. od molekularnego do makroskopowego, oraz we wszystkich sferach uwzględniających perspektywę zrównoważonego rozwoju.
	Application of the above-mentioned key characteristics for the whole lifecycle of products, processes, functions and services on all levels, e.g. from molecular to the macroscopic levels and all sectors in a pro-active perspective towards sustainability

Źródło: K. Kümmerer, A.-K. Amsel, D. Bartkowiak, A. Bazzanella, C. Blum, C. Cinquemani, *Key Characteristics of Sustainable Chemistry. Towards a Common Understanding of Sustainable Chemistry*, Bonn 2021, s. 2–3.

Powyższych dziesięć charakterystyk ma charakter zdecydowanie odmienny od dwunastu zasad zielonej chemii i w pełni wpisuje się w ambicję chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju, która aspiruje do bycia projektem o szerszym i ogólniejszym zakresie. Żadna z jej cech charakterystycznych nie dotyczy reakcji chemicznych jako takich. Kümmerer włącza co prawda do swojego projektu zieloną chemię Anastasa i Warnera, ale pozostałe cechy charakterystyczne nie stanowią reinterpretacji dwunastu zasad, lecz proponują różne sposoby myślenia na temat tego, w jaki sposób uprawiać chemię i organizować przemysł chemiczny. Oczywiście nie każda z tych cech jest autentycznie nowa, natomiast zebranie ich w jednym miejscu i ich kodyfikacja stanowi kolejny krok w kierunku budowy chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju jako nowej dyscypliny. Obecnie dziesięć charakterystyk Kümmerera i jego zespołu to najbardziej kompletne podsumowanie kluczowych aspiracji chemików zajmujących się zrównoważonym rozwojem.

#### 4. Chemia cyrkularna (chemia obiegu zamkniętego)

Sukcesy chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju nie powinny przyćmić faktu, że w dżungli modnych *buzzwords*, kadrów teoretycznych i koncepcji polityczno-naukowych wszystko podlega nieustającym zmianom. Nowe sposoby formułowania pewnych powracających problemów często zyskują na popularności dzięki eleganckiej i łatwiej do zapamiętania nazwie. Od 2011 r. terminem coraz częściej powracającym w debacie publicznej w instytucjach Unii Europejskiej jest *circular economy*, tłumaczony jako „gospodarka zamkniętego obiegu” lub „gospodarka cyrkularna”. W sercu europejskiej polityki ekonomicznej od mniej więcej 2015 r. gospodarka o zamkniętym obiegu to:

model produkcji i konsumpcji, który polega na dzieleniu się, pożyczaniu, ponownym użyciu, naprawie, odnawianiu i recyklingu istniejących materiałów i produktów tak długo, jak to możliwe. W ten sposób wydłuża się cykl życia produktów. W praktyce oznacza to ograniczenie odpadów do minimum. Kiedy cykl życia produktu dobiega końca, surowce i odpady, które z niego pochodzą, powinny zostać w gospodarce. Można je z powodzeniem wykorzystać ponownie, tworząc w ten sposób dodatkową wartość.

Takie podejście kontrastuje z tradycyjnym, liniowym modelem ekonomicznym, który opiera się na schemacie „weź – wyprodukuj – użyj – wyrzuć”<sup>36</sup>.

Aspiracje gospodarki o zamkniętym obiegu są pod wieloma względami zbieżne z aspiracjami dyscyplin takich, jak ekologia przemysłowa, ale przede wszystkim zielona chemia i chemia na rzecz zrównoważonego rozwoju. Gospodarka o zamkniętym obiegu jest w gruncie rzeczy niemożliwa bez ścisłej współpracy z przemysłem chemicznym oraz bez innowacji w zakresie takich nowych rozwiązań technologicznych, jak recykling plastików. Nic więc dziwnego, że grupa chemików z Holandii postanowiła wprost połączyć tę koncepcję z chemią i ukuła termin *circular chemistry*, czyli „chemia zamkniętego obiegu”<sup>37</sup>. W opublikowanym na łamach czasopisma „Nature Chemistry” artykule argumentują oni, że mimo swojej użyteczności dwanaście zasad zielonej chemii nie wystarczy, by w pełni wdrożyć ambicje gospodarki o cyrkularnym obiegu w życie. W związku z tym potrzebny jest nowy rodzaj chemii: chemia cyrkularnego obiegu, również skodyfikowana w dwunastu punktach (Tabela 12).

Tabela 12. Dwanaście zasad chemii zamkniętego obiegu (*circular chemistry*) (2019 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Zbieraj i używaj odpadki. Odpadki stanowią wartościowy zasób, który powinien być przetworzony w produkty nadające się do sprzedaży.	1. Collect and use waste. Waste is a valuable resource that should be transformed into marketable products.
2. Maksymalizuj obieg. Procesy w zamkniętym obiegu powinny maksymalizować użycie atomów we wszystkich molekułach.	2. Maximize atom circulation. Circular processes should aim to maximize the utility of all atoms in existing molecules.
3. Optymalizuj wydajność zużycia zasobów. Konserwacja powinna być celem, podobnie jak promocja ochrony i ponownego używania wyczerpywalnych zasobów.	3. Optimize resource efficiency. Resource conservation should be targeted, promoting reuse and preserving finite feedstocks.
4. Dąż do trwałości energetycznej. Wydajność energetyczna powinna być zmaksymalizowana.	4. Strive for energy persistence. Energy efficiency should be maximized.
5. Zwiększ wydajność procesów. Innowacje powinny nieustannie udoskonalać recykling oraz ponowne użycie zarówno na poziomie wstępnego, jak i końcowego przetworzenia, najlepiej na terenie zakładu chemicznego.	5. Enhance process efficiency. Innovations should continuously improve in- and post-process reuse and recycling, preferably on-site

36 Gospodarka o obiegu zamkniętym: definicja, znaczenie i korzyści (video), [www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/priorities/gospodarka-o-obiegu-zamknietym/20151201STO05603/gospodarka-o-obiegu-zamknietym-definicja-znaczenie-i-korzysci-video](http://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/priorities/gospodarka-o-obiegu-zamknietym/20151201STO05603/gospodarka-o-obiegu-zamknietym-definicja-znaczenie-i-korzysci-video) [dostęp 21.06.2021].

37 T. Keijer, V. Bakker, J.C. Sloopweg, *Circular Chemistry to Enable a Circular Economy*, „Nature Chemistry” t. 11, 2019, s. 190–195.



6. Nie dla toksyczności poza fabryką. Procesy chemiczne nie powinny uwalniać do środowiska toksycznych substancji.	6. No out-of-plant toxicity. Chemical processes should not release any toxic compounds into the environment.
7. Celuj w optymalny projekt. Projekty [produktów i procesów] powinny bazować na najbardziej zaawansowanych opcjach końca życia, biorąc pod uwagę rozdzielanie, oczyszczanie i rozkład.	7. Target optimal design. Design should be based on the highest end-of-life options, accounting for separation, purification and degradation.
8. Oceń potencjał zrównoważonego rozwoju. Ocena środowiska (której typowym przykładem może być ocena cyklu życia) powinna stać się powszechna w identyfikowaniu problemów z wydajnością procesów chemicznych.	8. Assess sustainability. Environmental assessments (typified by the LCA) should become prevalent to identify inefficiencies in chemical processes.
9. Stosuj drabinę zamkniętego obiegu. Opcje końca życia produktu powinny starać się osiągnąć najwyższy poziom na drabinie zamkniętego obiegu.	9. Apply ladder of circularity. The end of life options for a product should strive for the highest possibilities on the ladder of circularity.
10. Sprzedawaj usługę, nie produkt. Producenci powinni używać modeli biznesowych opartych na usługach, takich jak leasing chemiczny, promując wydajność zamiast ilości produkcji.	10. Sell service, not product. Producers should employ service-based business models such as chemical leasing, promoting efficiency over production rate.
11. Odrzuć lock-in [inercję technologiczną]. Biznes i środowisko regulacyjne powinny być elastyczne i zezwalać na implementację innowacji.	11. Reject lock-in. Business and regulatory environment should be flexible to allow the implementation of innovations.
12. Sprzyjaj współpracy w ramach przemysłu i zapewniaj koherentne ramy teoretyczne dla polityki publicznej. Przemysł i polityka publiczna powinny być jak najbliżej, jak to możliwe, by stworzyć optymalne środowisko do utworzenia drogi zamkniętemu obiegowi w procesach chemicznych.	12. Unify industry and provide coherent policy framework. The industry and policy should be unified to create an optimal environment to enable circularity in chemical processes.

Źródło: T. Keijer, V. Bakker, J.C. Slootweg, *Circular Chemistry to Enable a Circular Economy*, „Nature Chemistry” t. 11, 2019, s. 190–195.

Bez wątplenia powyższa formalizacja zawiera wiele ważnych elementów nieobecnych w pierwotnych kodyfikacjach na rzecz zielonej chemii i inżynierii. Najbardziej oryginalnym elementem jest punkt 9: drabina zamkniętego obiegu. Tradycyjny podział, powszechny w pracach na temat zrównoważonego rozwoju na 3 R (*reduce, reuse, recycle*), został zastąpiony jedenastoma nowymi R (*reject, reduce, reuse, redistribute, repair, refurbish, repurpose, remanufacture, recycle, recover, return*). Inne ważne punkty to analiza cyklu życia oraz leasing chemikaliów. Trudno jednak nie zwrócić uwagi, że analiza cyklu życia to klasyczny temat zielonej chemii, podczas gdy leasing chemikaliów, jak i hasło „usługa nie produkt”, to tematy regularnie pojawiające się w publikacjach na temat chemii zrównoważonego rozwoju. Co więcej, niektóre z zasad chemii cyrkularnej (1–3, 5–7) są w gruncie

rzeczy łatwe do wydedukowania z zasad zielonej chemii. Wreszcie zasady 11 i 12 są niezwykle ogólnikowe i zdroworoządkowe przy każdym rodzaju innowacji naukowo-technicznej. Trudno powiedzieć, w czym są one szczególne dla chemii cyrkularnej. Podsumowując, dwanaście zasad chemii zamkniętego obiegu stanowi być może wartościowe, choć nie rewolucyjne, uzupełnienie dwunastu zasad zielonej chemii, ale jego wartość dodana staje się problematyczna, gdy weźmiemy pod uwagę dorobek chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju.

Co ciekawe, rok po holenderskiej publikacji w „Nature Chemistry” Klaus Kümmerer oraz James Clark (dawny redaktor naczelny czasopisma „Green Chemistry”) zaproponowali na łamach czasopisma „Science” piętnaście wskazówek, w jaki sposób zintegrować chemię w ramach gospodarki zamkniętego obiegu<sup>38</sup> (Tabela 13).

Tabela 13. Piętnaście wskazówek, jak zintegrować chemię w ramach gospodarki zamkniętego obiegu (2020 r.).

Tłumaczenie	Wersja oryginalna
1. Staraj się utrzymać złożoność molekularną na minimalnym poziomie koniecznym do osiągnięcia pożądanej wydajności, biorąc pod uwagę koniec życia produktu.	1. Keep molecular complexity to the minimum required for the desired performance, including end of life.
2. Projektuj produkty zdatne do recyklingu, biorąc pod uwagę wszystkie dodatkowe komponenty produktu.	2. Design products for recycling, including all additives and other components of the product.
3. Zmniejsz i uprość różnorodność i dynamikę przepływów substancji, materiałów i produktów.	3. Reduce and simplify diversity and dynamics of substance, material, and product flows.
4. Unikaj skomplikowanych struktur.	4. Avoid complex products.
5. Minimalizuj zużycie komponentów, które nie mogą być łatwo odłączone lub poddane recyklingowi.	5. Minimize use of product components that cannot easily be separated and recycled.
6. Jeśli twój produkt jest niemożliwy do ponownego użycia lub recyklingu, zaprojektuj go w taki sposób by uległ szybkiej mineralizacji pod koniec życia.	6. Design products not suitable for capture and recycling for complete fast mineralization at the end of their lives.
7. Unikaj nadmiernej eksploatacji surowców naturalnych poprzez redukcję ich zużycia oraz wydajny odzysk i recykling.	7. Prevent raw materials from becoming critical through reduced use and efficient recovery and recycling.
8. Unikaj strat i transferów entropicznych.	8. Avoid entropic losses and transfers.
9. Unikaj efektu odbicia [ograniczenie jednego materiału kosztem większego zużycia drugiego].	9. Avoid rebound effects.

38 K. Kümmerer, J.H. Clark, V.G. Zuin, *Rethinking Chemistry for a Circular Economy*, „Science” t. 367, 2020, s. 369–370.

10. Bierz odpowiedzialność za cały cykl życia twojego produktu, również po recyklingu.	10. Be responsible for/develop ownership of your product throughout its complete life cycle, including recycling.
11. Zapewnij identyfikowalność i rozważ użycie cyfrowych paszportów dla twoich produktów.	11. Ensure traceability and consider use of product digital passports.
12. Rozwijaj i stosuj mierniki cyrkularności.	12. Develop and apply circular metrics.
13. Zmieniaj tradycyjne praktyki chemii z logiki „więcej-szybciej” na logikę „optymalnie zaadaptowanie-lepiej-bezpieczniej” i staraj się zastąpić własność [chemikaliów] wynajmem, leasingiem lub modelami biznesowymi opartymi na współdzieleniu.	13. Change traditional chemical practices based on “bigger-faster” into “optimal adapted-better-safer” and change ownership to rent, lease, and share business models.
14. Niech procesy będą tak proste jak to możliwe, z najmniejszą możliwą ilością operacji, dodatkowych substancji, zużytej energii oraz operacji.	14. Keep processes as simple as possible with a minimum number of steps, auxiliaries, energy, and unit operations.
15. Projektuj procesy, mając na uwadze optymalne odzyskiwanie dodatkowych substancji, niezaużytych substratów i nieprzewidzianych produktów ubocznych.	15. Design processes for optimal material recovery of auxiliaries, unused substrates, and unintended by-products.

Źródło: K. Kümmeler, J.H. Clark, V.G. Zuin, *Rethinking Chemistry for a Circular Economy*, „Science” t. 367, 2020, s. 369–370.

Lista ta stanowi wspólną odpowiedź specjalistów od chemii zrównoważonego rozwoju oraz zielonej chemii na wyzwania gospodarki zamkniętego obiegu, ignorując jednocześnie wcześniejszą holenderską próbę sformalizowania chemii cyrkularnej z 2019 r. prawdopodobnie właśnie ze względu na jej odtwórczy charakter. Mamy więc do czynienia z konkurencyjnymi kodyfikacjami. Szczegółowa analiza wersji z 2020 r. sugeruje formalizację bardziej przemyślaną, podkreślającą wiele elementów dotyczących nowej filozofii recyklingu, których bez wątpienia brakowało zarówno w zielonej chemii, zielonej inżynierii, jak i późniejszych próbach kodyfikacji chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju. Co najważniejsze, unika ona wielu błędów holenderskiej listy, naciskając na bardziej holistyczne rozumienie problemu zamkniętego obiegu i nawiązując do szerokich ambicji *sustainability*.

### Uwagi podsumowujące

W tym artykule przeanalizowaliśmy najważniejsze kodyfikacje na rzecz chemii przyjaznej środowisku powstałe na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat. Czytelnicy powinni mieć jednak świadomość, że opisane kodyfikacje to zaledwie wierzchołek góry lodowej – są to subiektywnie wybrane, najbardziej znane lub najbardziej wpływowe przykłady. Wiele podobnych list pojawia się regularnie w publikacjach z zakresu zielonej chemii,

na przykład sześć zasad zielonej ekstrakcji (molekuł syntezowanych przez rośliny)<sup>39</sup> lub osiem zasad zielonej edukacji chemicznej<sup>40</sup>.

Wydaje się, że w chwili redakcji tego artykułu (lipiec 2021 r.) cechy charakterystyczne chemii zrównoważonego rozwoju opracowane przez ekipę skupioną wokół Kümmerera w 2021 r. oraz wskazówki dotyczące chemii na rzecz gospodarki zamkniętego obiegu z 2020 r. stanowią najbardziej kompleksowy opis kierunku, w którym próbują zmierzać badacze zajmujący się chemią przyjazną środowisku. Kodyfikacje te mogą stanowić istotny element zarówno polityki regulacyjnej instytucji państwowych, strategii przemysłowej prywatnych podmiotów, jak i pracy laboratoryjnej indywidualnych naukowców.

Czego uczy nas historia tych wszystkich zasad, reguł, wskazówek oraz charakterystyk? Pierwszą wyraźniej zarysowaną tendencją jest ich rosnąca złożoność i poziom „wyrafinowania”. Oryginalna lista Anastasa i Warnera była w gruncie rzeczy stosunkowo prostym i dość mało spójnym z epistemologicznego punktu widzenia zbiorem ogólnych intuicji, jak powinna wyglądać zielona chemia. Kolejne listy były często próbą wypełnienia jej luk lub dokonania daleko idącej generalizacji i z reguły nawiązują do oryginalnych dwunastu zasad mniej lub bardziej bezpośrednio.

Drugim ciekawym zjawiskiem jest powolne przenoszenie się środka ciężkości z USA do Europy. O ile w Niemczech praktyka kodyfikacji rozwinęła się w latach dziewięćdziesiątych w sposób niezależny od amerykańskiej trajektorii zielonej chemii, te niemieckie oraz ogólnoeuropejskie kodyfikacje były znane wyłącznie w wąskim gronie specjalistów. Bez wątpienia Amerykanie zdominowali środowiskową narrację na blisko dwadzieścia lat. Dziś jednak próby formalizowania chemii na rzecz zrównoważonego rozwoju mają miejsce w Europie i to szczególnie Niemcy zaczynają nadawać ton dyskusji nad przyszłością nowych tendencji w przemyśle chemicznym.

W tym momencie należy sobie zadać zasadnicze pytanie: jakie są przyczyny tak ogromnej liczby tych „zielonych kodyfikacji” na przestrzeni ostatnich kilkadziesiąt lat? Jeśli przejrzymy książki, podręczniki oraz artykuły z lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych dotyczące zanieczyszczeń i chemii środowiskowej (*environmental chemistry*), nie znajdziemy nic podobnego, nawet jeśli pewne problemy, nad którymi głowili się ówcześni chemicy, niekoniecznie uległy daleko idącym zmianom. Od lat dziewięćdziesiątych wyraźnie widzimy więc krystalizowanie się zupełnie nowego sposobu myślenia lub może wręcz nowej instytucji w świecie chemii. Bez wątpienia zaletą tej nowej formuły jest jej zwięzłość. Nie trzeba zagłębiać się w kilkusetstronicowe opracowania na temat pojęcia *sustainability*, żeby zrozumieć, w jaki sposób autorzy tej lub innej listy chcą uczynić chemię bardziej przyjazną środowisku. Większość z wymienionych wcześniej kodyfikacji mieści się na jednej stronie formatu A4, dzięki czemu łatwo krążą poza artykułami i książkami, w których zostały pierwotnie opublikowane. Ta zwięzłość ma oczywiście jednak swój koszt: kamufluje ona złożone debaty, kontrowersje i ograniczenia tej czy innej kodyfikacji, których czytelnicy nie zawsze bywają świadomi.

39 F. Chemat, M. Abert Vian, G. Cravotto, *Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles*, „International Journal of Molecular Sciences” t. 13, 2012, s. 8615–8627.

40 V.G. Zuin, M.L. Segatto, D.P. Zandonai, G.M. Grosseli, A. Stahl, K. Zanotti, R.S. Andrade, *Integrating Green and Sustainable Chemistry into Undergraduate Teaching Laboratories: Closing and Assessing the Loop on the Basis of a Citrus Biorefinery Approach for the Biocircular Economy in Brazil*, „Journal of Chemical Education” t. 96, 2019, s. 2975–2983.

Jest wartym zauważenia, że o ile na łamach czasopism chemicznych regularnie pojawiają się nowe listy zasad i reguł, poprzednie iteracje nie są w zasadzie nigdy obiektem krytyki. Nowe kodyfikacje pretendują do uzupełniania lub dopełniania poprzednich, ale niezwykle rzadkie są krytyczne opinie na temat tego lub innego sformułowania w dwunastu zasadach zielonej chemii czy inżynierii. Wydaje się, że wynika to z ich niejednoznacznego statusu z epistemologicznego punktu widzenia. Mówiąc inaczej, chemicy mogą nie być przygotowani do prowadzenia owocnego krytycznego dialogu na ich temat, ponieważ nie dysponują odpowiednim aparatem pojęciowym. Bo też czym w zasadzie są wymienione w tym artykule kodyfikacje?

Nie są to oczywiście teorie naukowe rozumiane jako forma generalizacji badań empirycznych o charakterze predyktywnym na temat tak lub inaczej rozumianej „zieloności”. Nie są to też zbiory użytecznych technik ze względu na ich zdecydowanie ogólnikowy charakter. Istnieją pewne podobieństwa pomiędzy zielonymi kodyfikacjami a kartami etyki, ale te pierwsze są raczej konsekwencją tych drugich; zielone kodyfikacje proponują kierunek rozwiązań lub szeroko rozumiany program badawczy, luźno bazując na pewnej etycznej ambicji. Niektórzy postrzegają zielone kodyfikacje jako narzędzia w wyznaczaniu granic nowej dyscypliny naukowej jaką, jest zielona chemia. Można w nich widzieć kryteria, które pozwalają zidentyfikować to, co należy do zielonej chemii, i to, co poza nią wykracza. Stają się one definicją dyscypliny. Ale ta perspektywa jest problematyczna z dwóch powodów. Po pierwsze, inne dyscypliny i pod-dyscypliny chemii nie potrzebują podobnych narzędzi do samookreślenia. Można się spierać o granice chemii katalitycznej lub chemii ciała stałego i bez wątplenia różne definicje odegrały rolę w kształtowaniu się tych dyscyplin, ale miały one charakter przede wszystkim deskryptywny, nie normatywny. Żadna inna dyscyplina nie kładzie tak silnego nacisku na normatywność i wyznaczanie standardów, jak zielona chemia. Jednocześnie ambicją ojców zielonej chemii nie było stworzenie nowej dyscypliny, lecz transformacja całej chemii jako nauki. Kryteria, które przeanalizowaliśmy w tym artykule, mogą znaleźć zastosowanie do różnych dziedzin i praktyk. Mają one charakter generalny i interdyscyplinary.

Wydaje się, że kodyfikacje na rzecz chemii przyjaznej środowisku to zupełnie nowa kategoria: nowy element w coraz bardziej złożonym pejzażu nauki stojący gdzieś w połowie drogi pomiędzy refleksją etyczną, polityką naukową a bardzo szerokim programem badawczym obejmującym nie jedną, a wszystkie dyscypliny naukowe oraz praktyki przemysłowe. W czasach, gdy związek pomiędzy postępem naukowym i technologicznym z jednej strony a postępem społeczno-ekonomicznym z drugiej jest coraz mniej oczywisty, naukowcy potrzebują „mapy drogowej”: mniej lub bardziej jasno sformułowanego celu, do którego powinna zmierzać ich praca badawcza i aktywność w zakresie innowacji. Mnogość kodyfikacji, list, charakterystyk, wskazówek czy zasad zredagowanych na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci jest wyrazem głębokiej chęci zaangażowania się kolejnych pokoleń chemików we współczesne wyzwania ludzkości, ale też potrzeby posiadania podbudowy teoretyczno-filozoficznej dla ich własnej codziennej pracy naukowej.

W tym nowym kontekście możemy się spodziewać powstania w najbliższych latach coraz bardziej złożonych i kompleksowych conceptualizacji heurystycznych wyznaczających szeroko zarysowane programy badawcze. Być może jest to szansa dla historyków, filozofów i socjologów nauki i techniki, by odegrać rolę mediatorów pomiędzy różnymi świa-

tami, krytycznie zmierzyć się z wyzwaniami epistemologicznymi prezentowanymi przez kolejne zielone kodyfikacje i zbudować podwaliny pod nową filozofię chemii dla XXI w.

## Bibliografia

- Abraham M.A., Nguyen N., "Green Engineering: Defining the Principles" – Results from the Sandestin Conference, „Environmental Progress” t. 22, 2004, s. 233–236, DOI 10.1002/ep.670220410.
- Anastas P., Warner J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford 1998.
- Anastas P.T., Zimmerman J., *Design through the Twelve Principles of Green Engineering*, „Environmental Science and Technology” t. 37, 2003, s. 94A–101A.
- Asfaw N., Chebude Y., Ejigu A., Hurisso B.B., Licence P., Smith R.L., Tang S.L.Y., Poliakoff M., *The 13 Principles of Green Chemistry and Engineering for a Greener Africa*, „Green Chemistry” t. 13, 2011, s. 1059, DOI 10.1039/C0GC00936A.
- Becher D., *Vermeiden, Vermindern, Verwerten – integrierter Umweltschutz in der Produktion*, [w:] *Die Bayer-Umweltperspektive II*, Leverkusen 1991, s. 34.
- Bensaude-Vincent B., Simon J., *Chemistry, the Impure Science*, London 2008.
- Blum C., Bunke D., Hungsberg M., Roelofs E., Joas A., Joas R., Blepp M., Stolzenberg H.-C., *Das Konzept der Nachhaltigen Chemie: Schlüsselfaktoren für den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung*, „Sustainable Chemistry and Pharmacy” t. 13, 2019, 100140, DOI 10.1016/j.scp.2019.100140.
- Chemat F., Abert Vian M., Cravotto G., *Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles*, „International Journal of Molecular Sciences” t. 13, 2012, s. 8615–8627.
- Christ C., *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*, Weinheim 1999, DOI 10.1002/9783527613861.
- Christ C., *Umweltschutz in der chemischen Industrie – Vermindern und vermeiden von Abfällen*, [w:] *Umwelt, Logistik und Verkehr*, red. R. Junemann, Dortmund 1992, s. 61–70.
- Erythropel H., Zimmerman J., de Winter T., Petitjean L., Melnikov F., Lam C.H., Lounsbury A., Mellor K., Jankovia N., Tu Q., Pincus L., Falinski M., Shi W., Coish P., Plata D., Anastas P., *The Green ChemisTREE: 20 Years after Taking Root with the 12 Principles*, „Green Chemistry” t. 9, 2018, s. 1929–1961, DOI 10.1039/C8GC00482J.
- Fischer H., Appelhagen H.G., *Chemiewende: Von der intelligenten Nutzung natürlicher Rohstoffe*, München 2017.
- Fischer H., *Plädoyer für eine Sanfte Chemie*, Braunschweig 1993.
- Garnier E., *Une approche socio-économique de l'orientation des projets de recherche en chimie doublement verte*, praca doktorska obroniona w Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.
- Gleich A. von, *Der wissenschaftliche Umgang mit Natur – Über die Vielfalt harter und sanfter Naturwissenschaften*, Frankfurt 1989.
- Gospodarka o obiegu zamkniętym: definicja, znaczenie i korzyści (wideo), [www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/priorities/gospodarka-o-obiegu-zamknietym/20151201STO05603/gospodarka-o-obiegu-zamknietym-definicja-znaczenie-i-korzysci-wideo](http://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/priorities/gospodarka-o-obiegu-zamknietym/20151201STO05603/gospodarka-o-obiegu-zamknietym-definicja-znaczenie-i-korzysci-wideo) [dostęp 21.06.2021].

- Green Chemistry, 12 Principles of Green Engineering, [www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-design-principles-of-green-engineering.html](http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-design-principles-of-green-engineering.html) [dostęp 21.06.2021].
- Green Chemistry, Design Principles, [www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html](http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html) [dostęp 21.06.2021].
- Green engineering, [en.wikipedia.org/wiki/Green\\_engineering](http://en.wikipedia.org/wiki/Green_engineering) [dostęp 21.06.2021].
- Hutzinger O., *The Greening of Chemistry – Is It Sustainable?*, „Environmental Science and Pollution Research” t. 6, 1999, s. 123.
- Jessop P., *Editorial: Evidence of a Significant Advance in Green Chemistry*, „Green Chemistry” t. 22, 2020, s. 13–15, DOI 10.1039/C9GC90119A.
- Keijer T., Bakker V., Slootweg J.C., *Circular Chemistry to Enable a Circular Economy*, „Nature Chemistry” t. 11, 2019, s. 190–195, DOI 10.1038/s41557-019-0226-9.
- Kirschner M., *Zauberstoff für eine Sanfte Chemie*, „Bild der Wissenschaft” t. 4, 1993, s. 14–18.
- Kümmerer K., Amsel A.-K., Bartkowiak D., Bazzanella A., Blum C., Cinquemani C., *Key Characteristics of Sustainable Chemistry. Towards a Common Understanding of Sustainable Chemistry*, Bonn 2021.
- Kümmerer K., Clark J.H., Zuin V.G., *Rethinking Chemistry for a Circular Economy*, „Science” t. 367, 2020, s. 369–370, DOI 10.1126/science.aba4979.
- Lenoir D., Schramm K.-W., Lalah J.O., *Green Chemistry: Some Important Forerunners and Current Issues*, „Sustainable Chemistry and Pharmacy” t. 18, 2020, 100313, DOI 10.1016/j.scp.2020.100313.
- Linthorst J.A., *An Overview: Origins and Development of Green Chemistry*, „Foundations of Chemistry” t. 12, 2010, s. 55–68, DOI 10.1007/s10698-009-9079-4.
- Llored J.P., Sarrade S., *Connecting the Philosophy of Chemistry, Green Chemistry, and Moral Philosophy*, „Foundations of Chemistry” t. 18, 2016, s. 125–152, DOI 10.1007/s10698-015-9242-z.
- Llored J.P., *Towards a Practical Form of Epistemology: the Case of Green Chemistry*, „Studia Philosophica Estonica” t. 5, 2012, s. 36–60, DOI 10.12697/spe.2012.5.2.04.
- Malle K.-G., *Sanfte Chemie halbokkult?*, „Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium” t. 42, 1994, s. 64, DOI 10.1002/nadc.19940420121.
- Nieddu M., *Existe-t-il réellement un nouveau paradigme de la chimie verte ?*, „Natures Sciences Sociétés” t. 22, 2014, s. 103–113, DOI 10.1051/nss/2014022.
- Ribeiro G.T.C., Costa D.A., Machado A.A.S.C., *“Green Star”: a Holistic Green Chemistry Metric for Evaluation of Teaching Laboratory Experiments*, „Green Chemistry Letters and Reviews” t. 3, 2010, s. 149–159, DOI 10.1080/17518251003623376.
- Roberts J., *Creating Green Chemistry: Discursive Strategies of a Scientific Movement*, praca doktorska obroniona w Virginia Polytechnic Institute, 2006.
- Tang S.L.Y., Bourne R., Smith R., Poliakoff M., *The 24 Principles of Green Engineering and Green Chemistry: “IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY”*, „Green Chemistry” t. 10, 2008, s. 268–269.
- Tang S.L.Y., Smith R.L., Poliakoff M., *Principles of Green Chemistry: PRODUCTIVELY*, „Green Chemistry” t. 7, 2005, s. 761–762, DOI 10.1039/B513020B.
- The ACS Green Chemistry Institute, Design Principles for Sustainable Green Chemistry & Engineering, 2015, [www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/resources/2015-gci-design-principles.pdf](http://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/resources/2015-gci-design-principles.pdf) [dostęp 18.09.2021].

- Trost B., *The Atom Economy – A Search for Synthetic Efficiency*, „Science” t. 254, 1991, s. 1471–1477, DOI 10.1126/science.1962206.
- Winterton N., *Twelve More Green Chemistry Principles*, „Green Chemistry” t. 3, 2001, s. G73–G75.
- Woodhouse E.J., Breyman S., *Green Chemistry as Social Movement?*, „Science, Technology, & Human Values” t. 30, 2005, nr 2, s. 199–222, DOI 10.1177/0162243904271726.
- Zhang X.F., Liu Z.G., Shen W., Gurunathan S., *Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches*, „International Journal of Molecular Sciences” t. 17, 2016, s. 1534.
- Zielona chemia, pl.wikipedia.org/wiki/Zielona\_chemia [dostęp 21.06.2021].
- Zuin V.G., Eilks I., Elschami M., Kümmerer K., *Education in Green Chemistry and in Sustainable Chemistry: Perspectives towards Sustainability*, „Green Chemistry” t. 23, 2021, s. 1594–1608, DOI 10.1039/D0GC03313H.
- Zuin V.G., Segatto M.L., Zandonai D.P., Grosseli G.M., Stahl A., Zanotti K., Andrade R.S., *Integrating Green and Sustainable Chemistry into Undergraduate Teaching Laboratories: Closing and Assessing the Loop on the Basis of a Citrus Biorefinery Approach for the Biocircular Economy in Brazil*, „Journal of Chemical Education” t. 96, 2019, s. 2975–2983, DOI 10.1021/acs.jchemed.9b00286.

dr **Marcin Krasnodębski** jest członkiem Pracowni Historii Nauk Przyrodniczych i Medycznych Instytutu Historii Nauki PAN, gdzie pracuje na stanowisku kierownika projektu *Zielona Chemia avant la lettre*, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. W 2016 r. obronił doktorat w Uniwersytecie w Bordeaux na temat historii chemii żywicowej, a następnie przez kilka lat był zatrudniony na stażach podoktorskich we francuskich placówkach badawczych, zajmując się m.in. historią fotoniki i historią przemysłu leśnego. Obecnie jego zainteresowania naukowe dotyczą przede wszystkim historii zrównoważonego rozwoju, historii zielonej chemii oraz ekologii przemysłowej, a także historii szeroko pojętych relacji między chemią, techniką, przemysłem, oraz polityką naukową w XX w.  
e-mail: marcin.krasnodebski1@gmail.com

Data zgłoszenia artykułu: 22 czerwca 2021

Data przyjęcia do druku: 18 września 2021