



EuChemS

European Chemical Society

— Working Party on Mechanochemistry —

This content is an initiative of the European Chemical Society Professional Network (PN) on Mechanochemistry. The content is a translation in Polish of the original article (open letter) by:

*Sáenz de la Torre JJ, Flamarique L, Gomollon-Bel F and COLACINO E.
“Mechanochemistry in Europe: where we come from and where we are now”
[version 1; peer review: 3, approved] Open Research Europe **2025**, 5:73.*

<https://doi.org/10.12688/openreseurope.19848.1>

*The translation in **Polish** was curated by **Dariusz Matoga**, member delegate representing the **Polish Chemical Society** within the PN on Mechanochemistry.*

Mechanochemia w Europie: skąd pochodzimy i gdzie jesteśmy teraz

Matoga Dariusz,¹ Sáenz de la Torre Juan José,² Flamarique Leyre,² Gomollon-Bel Fernando^{2,*} and Colacino Evelina^{3,*}

¹ Faculty of Chemistry, Jagiellonian University, Kraków, Poland

² Agata Communications, Santander, Spain

³ ICGM, Univ. Montpellier, CNRS, ENSCM, Montpellier, France

Corresponding authors: Fernando Gomollon-Bel (hello@agata.agency), Evelina Colacino (evelina.colacino@umontpellier.fr)

Author roles: Matoga Dariusz: Translation in Polish, Editing; Sáenz de la Torre JJ: Data Curation, Methodology, Resources, Validation, Visualization, Writing – Original Draft Preparation, Writing – Review & Editing; Flamarique L: Resources, Visualization, Writing – Review & Editing; Gomollon-Bel F: Data Curation, Methodology, Resources, Visualization, Writing – Original Draft Preparation, Writing – Review & Editing; Colacino E: Conceptualization, Data Curation, Funding Acquisition, Investigation, Methodology, Project Administration, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing – Original Draft Preparation, Writing – Review & Editing

Competing interests: No competing interests were disclosed.

Grant information: This project has received funding from the European Union's Framework Programme for Research & Innovation as part of the COST Action CA18112, Mechanochemistry for Sustainable Industry, as supported by the COST Association (European Cooperation in Science and Technology). This project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme (European Health and Digital Executive Agency) under grant agreement No 101057286 (Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical ingredients [IMPACTIVE]). Views and opinions expressed are, however, those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Copyright: © 2025 Sáenz de la Torre JJ et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstrakt

Mechanochemia ma historię sięgającą kilku tysięcy lat, jednak przez długi czas pozostawała na marginesie w porównaniu z chemią roztworów. Dopiero w ostatnich latach jej metody zyskały status kluczowej technologii wspierającej rozwój chemii zielonej i zrównoważonej, oferując bezrozpuszczalnikową (lub niskorozpuszczalnikową) alternatywę dla tradycyjnych procesów chemicznych. Z powodzeniem stosowane w przemyśle metalurgicznym mechaniczne stopowanie utorowało drogę do wykorzystania mechanochemii w innych sektorach, takich jak przetwarzanie odpadów czy odkażanie gleby, a także w obszarach obejmujących wytwarzanie farmaceutyków, przetwarzanie biomasy, recykling oraz degradację polimerów. W szerszej perspektywie mechanochemia jawi się jako obiecująca ścieżka prowadząca do dekarbonizacji przemysłu chemicznego. Dzięki wspólnym wysiłkom naukowców zrzeszonych w Międzynarodowym Stowarzyszeniu Mechanochemicznym (IMA) zainicjowano szereg przedsięwzięć wzmacniających rozwój tej dziedziny. Należą do nich m.in. Akcja COST CA18112 MechSustInd i wyłonione w jej ramach sieci współpracy, które przyczyniły się do pozyskania finansowania projektu Horizon Europe IMPACTIVE, powołania Grupy Roboczej EuChemS ds. Mechanochemii, uruchomienia projektu typu Round Robin poświęconego przemianom mechanochemicznym, a także inicjatywy IUPAC dotyczącej terminologii i symboliki w mechanochemii. Wszystkie te działania aktywnie promują mechanochemię poprzez podejmowanie kluczowych wyzwań tej dziedziny oraz wzmacnianie współpracy między środowiskiem akademickim a przemysłem. W efekcie inicjatywy te lokują Europę wśród liderów innowacji mechanochemicznych, wspierając rozwój przyjaznych środowisku procesów chemicznych, a także sprzyjając standaryzacji terminologii i wdrażaniu rozwiązań przemysłowych.

Słowa kluczowe: Mechanochemia, zielona chemia, zrównoważony rozwój, Europejski Zielony Ład, metody bezrozpuszczalnikowe, procesy przyjazne środowisku, polityka, standaryzacja.

Mechanochemia jest nauką o tworzeniu i rozrywaniu wiązań poprzez „bezpośrednią absorpcję energii mechanicznej”, gdzie przemiany są napędzane siłami mechanicznymi wywieranymi przez uderzenie, ścinanie, ściskanie lub rozciąganie. Zastosowanie sił mechanicznych do inicjowania przemian chemicznych odnotowano już w starożytnym dziele *De lapidibus* (O kamieniach) Teofrasta z Eresos (IV w. p.n.e.), uznawanym za najstarsze zachowane źródło dotyczące zagadnień chemicznych. Rzeczywiście, opisano

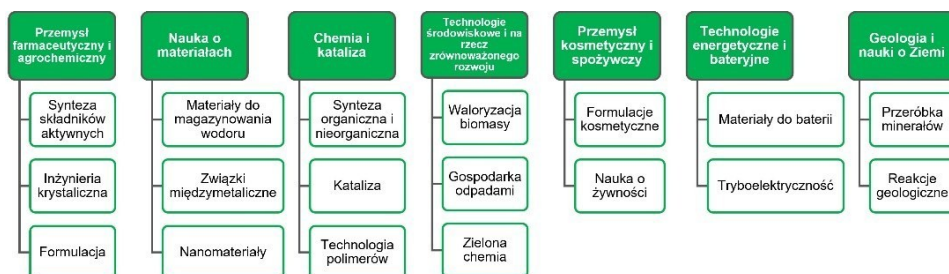
tam otrzymywanie metalicznej rtęci poprzez pocieranie i rozcieranie jej minerału, cynobru, w miedzianym moździerz, z użyciem tłuczka wykonanego z tego samego materiału^{2,3}.

Mimo że chemia roztworów stała się standardem przemysłowym, w ostatnich dekadach odnotowano wyraźny wzrost liczby publikacji dotyczących mechanochemii i jej zastosowań w różnych dziedzinach (Rysunek 1), przy czym poziom gotowości technologicznej tych rozwiązań pozostaje zróżnicowany w zależności od sektora przemysłu⁴. Zgodnie z klasyfikacją *Technology Readiness Levels* (TRL)⁵, najwyższy poziom gotowości technologicznej (TRL 9) osiągnęły zastosowania w obszarze energii i materiałów twardych (np. metalurgia i gospodarka odpadami), dla których mechanochemia stanowi konkurencyjną metodę wytwarzania.

W sytuacji, gdy globalnie rośnie zapotrzebowanie na zrównoważone warunki reakcji i czystsze procesy, mechanochemia została w 2019 roku uznana przez IUPAC za jedną z „technik wschodzących, które mogą uczynić naszą planetę bardziej zrównoważoną”⁶, a w 2021 za potężne narzędzie do realizacji Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ (UN SDGs)⁷ i założeń Europejskiego Zielonego Ładu⁸. Zgodna z 12 zasadami zielonej chemii i zielonej inżynierii, usystematyzowanymi pod kątem ich znaczenia dla skalowania procesów mechanochemicznych⁹, mechanochemia stanowi przełomowe podejście¹⁰⁻¹², zdolne wspierać zieloną transformację i zrównoważony rozwój, z potencjałem dekarbonizacji i ograniczenia wpływu przemysłu chemicznego na środowisko^{10,12}.

W całej Europie istnieje wiele inicjatyw, które, począwszy od programu UE COST Action CA18112 *Mechanochemistry for Sustainable Industry* (MechSustInd), przyczyniły się do uwydatnienia potencjału mechanochemii, koncentrując się przy tym na różnych aspektach tej dziedziny. Niektóre, jak projekt Horizon Europe *IMPACTIVE*, posuwają naprzód wdrażanie tej technologii w konkretnych realiach przemysłowych, takich jak farmacja¹³. Grupa zadaniowa IUPAC ds. *Terminologii i symboli w mechanochemii* oraz profesjonalna sieć współpracy EuChemS w zakresie mechanochemii obejmują zarówno sektor publiczny, jak i prywatny, podczas gdy projekt Round Robin zajmuje się szczegółowymi zagadnieniami badań podstawowych. Tworzy to warunki do krzyżowego przenikania się obszarów badawczych, ukierunkowanych również na tworzenie powszechnie uznawanych standardów naukowych i wytycznych dla tej dziedziny.

Wszystkie te inicjatywy, angażujące członków IMA, a więc także środowisko akademickie, plasują Europę w wyjątkowej pozycji do innowacji w mechanochemii — wspierając bardziej zielony i zrównoważony sposób prowadzenia chemii oraz przyczyniając się do zmiany sposobu myślenia, by „myśleć o chemii inaczej”¹⁴. W kolejnych akapitach, wraz z podkreśleniem podstawowego znaczenia IMA, opisane zostaną w porządku chronologicznym różne europejskie inicjatywy związane z mechanochemią.



Rysunek 1. Zastosowania procesów mechanochemicznych – Zaadaptowano z oryginału - Źródło ilustracji: Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).

Międzynarodowe Towarzystwo Mechanochemiczne (IMA)

Międzynarodowe Towarzystwo Mechanochemiczne (*International Mechanochemical Association*, IMA) jest pierwszym międzynarodowym klastrem utworzonym wokół mechanochemii. Stowarzyszenie zostało założone w 1988 roku w Tatrzńskiej Łomnicy (obecna Słowacja), z udziałem przedstawicieli Japonii oraz ówczesnego ZSRR i Czechosłowacji. Obecnie stowarzyszenie zrzesza 120 członków reprezentujących 31 krajów na 4 kontynentach.

Na przestrzeni lat IMA zbudowało zarówno geograficzne, jak i naukowe mosty, łącząc wiedzę i doświadczenie naukowców, pionierów w tej dziedzinie, i pogłębiając zrozumienie procesów mechanochemicznych stosowanych do materiałów twardych oraz procesu stopowania mechanicznego. Przełożyło się to na liczne współprace i inicjatywy, torując drogę rozwojowi tej dziedziny i prowadząc do szerszego wdrażania metod mechanochemicznych również w innych obszarach chemii i inżynierii procesowej.

Kolejnym silnym filarem IMA jest koncentracja na młodych naukowcach, edukowaniu i szkoleniu ich w zakresie metodologii mechanochemicznych. Flagową inicjatywą stowarzyszenia jest INCOME, Międzynarodowa Konferencja Mechanochemii i Stopowania Mechanicznego, organizowana co trzy lata. Pierwsza edycja INCOME odbyła się w 1993 roku w Koszycach (Słowacja). Od tego czasu odbyło się 11 edycji konferencji, które przez lata rosły pod względem liczby uczestników i znaczenia. Jedenasta konferencja INCOME odbyła się w Berlinie-Adlershof (Niemcy) w 2025 roku, gromadząc setki badaczy mechanochemii z całego świata.

Więcej informacji o IMA można znaleźć na stronie: imamechanochemical.com

MechSustInd: Akcja COST skupiona na mechanochemii

Różnorodne aspekty mechanochemii zostały w ostatnich latach zintegrowane w ramach europejskiego programu COST Action CA18112 *Mechanochemistry for Sustainable Industry* (MechSustInd), realizowanego w latach 2019–2023¹⁵⁻¹⁸. Pomimo jego zakończenia fundamentalne osiągnięcia, innowacyjne podejścia oraz koncepcje wypracowane w trakcie trwania projektu nadal dynamicznie się rozwijają i umacniają, inspirując powstawanie podobnych inicjatyw na całym świecie.

W ramach programu European Cooperation in Science and Technology (COST) Akcja była ukierunkowana na rozwój skalowalnych procesów, harmonizację nazewnictwa i wytycznych, a także standaryzację terminologii i protokołów w odpowiedzi na potrzeby przemysłu. Jej celem było również ułatwianie wymiany wiedzy, wyposażanie badaczy, w tym młodych naukowców, w kluczowe kompetencje umożliwiające wdrażanie praktyk zrównoważonego rozwoju opartych na aktywacji mechanicznej w codziennej działalności badawczej, a także pogłębianie współpracy między środowiskiem akademickim i partnerami przemysłowymi. Ponadto Akcja przyczyniała się do zwiększania świadomości korzyści wynikających z integracji mechanochemii z procesami chemicznymi zarówno na etapie badań i rozwoju (B+R), jak i w skali produkcyjnej.

Dzięki licznym działaniom na rzecz budowania sieci współpracy naukowej, realizowanym przez cały okres trwania projektu, Akcja przyczyniła się do harmonizacji badań podstawowych i stosowanych z innowacjami technologicznymi oraz potrzebami przemysłu w obszarze mechanochemii. W rezultacie umożliwiła osiąganie długofalowych celów związanych z rozwojem zielonej gospodarki i zrównoważonej produkcji, w tym m.in. chemikaliów specjalistycznych (*fine chemicals*) oraz związków o znaczeniu farmaceutycznym¹⁹.

MechSustInd zdołała zbudować multidyscyplinarną sieć wykraczającą poza granice Europy, skupiającą naukowców, inżynierów, przedsiębiorców i inwestorów oraz integrującą kompetencje z różnych obszarów mechanochemii. Struktura ta została zorganizowana w trzy Grupy Robocze²⁰, obejmujące zarówno syntezę w skali laboratoryjnej (WG1), jak i skalowanie procesów (WG3) poprzez ewaluację technologii, przy jednoczesnym prowadzeniu badań mechanistycznych reakcji (WG2) oraz ich ilościowej oceny pod kątem przewagi nad istniejącymi metodami roztworowymi. Wykorzystanie wskaźników zielonej chemii, a także wdrożenie zaawansowanych metod oceny cyklu życia (*life cycle assessment*, LCA) i analiz techno-ekonomicznych (*techno-economic analysis*, TEA), zastosowanych m.in. w studium przypadku mechanochemicznej syntezy leku podstawowego Światowej Organizacji Zdrowia (WHO)²¹, odzwierciedlało wyraźną ambicję COST Action, by zbliżyć mechanochemię do praktyki przemysłowej.

Inicjatywa zgromadziła około 150 członków — naukowców aktywnych zarówno w sektorze publicznym, jak i prywatnym, reprezentujących 46 krajów (w tym 38 europejskich), a także ośrodki spoza Europy; wśród uczestników znaleźli się badacze m.in. z Kanady, Chin, Japonii, Meksyku, Rosji, Singapuru, Republiki Południowej Afryki, Korei Południowej i Stanów Zjednoczonych (Rysunek 2).

Pomimo zakłóceń spowodowanych globalną pandemią MechSustInd osiągnęła wysoki poziom integracji mechanochemii z działalnością dydaktyczną oraz programami kształcenia akademickiego, odpowiadając na potrzeby Unii Europejskiej w zakresie „nowych umiejętności” dla „nowych zawodów” w obszarze zielonej chemii — ze szczególnym uwzględnieniem młodego pokolenia naukowców.

Ten bezprecedensowy dorobek urzeczywistnił się m.in. poprzez organizację pięciu międzynarodowych kursów szkoleniowych w Europie, z udziałem prelegentów ze środowiska akademickiego i przemysłowego, integrujących komplementarne kompetencje różnych interesariuszy. Kursy te obejmowały kluczowe zagadnienia, takie jak: (i) mechanochemiczna synteza organiczna i kinetyka (Włochy), (ii) skalowanie reakcji mechanochemicznych (Niemcy), (iii) analizy *ex situ* i *in situ* reakcji mechanochemicznych (Chorwacja oraz zdalnie z Malty) oraz (iv) charakterystyka strukturalna związków supramolekularnych i kowalencyjnych (transmisja z Portugalii).

Pionierskie wdrożenie mechanochemii do dydaktyki osiągnęło znaczący zasięg międzynarodowy, wykraczający poza granice Europy. MechSustInd skutecznie połączyła mechanochemię z edukacją w obszarze zielonej chemii poprzez: (i) nawiązanie strategicznych partnerstw z uznanymi międzynarodowo organizacjami (np. Beyond Benign, USA)²², promującymi kształcenie w zakresie zielonej chemii i zrównoważonego rozwoju, (ii) publikację pierwszego artykułu edukacyjnego poświęconego mechanochemii²³ oraz (iii) wydanie dwóch książek dydaktycznych na ten temat^{24, 25}.

Pandemię potraktowano jako szansę rozwojową: od 2020 roku, przez cały okres lockdownu, zorganizowano 31 webinarium z udziałem 53 prelegentów z Europy i innych części świata, tworzących dwutygodniowy cykl „Get together during COVID”. To innowacyjne podejście umożliwiło intensywną wymianę wiedzy specjalistycznej, podtrzymanie silnych więzi między członkami oraz dalszą realizację celów związanych z budowaniem społeczności naukowej.

Udało się nawiązać strategiczne relacje i partnerstwa z organami decyzyjnymi krajowych i europejskich towarzystw oraz stowarzyszeń chemicznych. Szczególnie istotne było zbudowanie silnych powiązań z: (i) innymi Akcjami COST (np. CA18224 Greenering oraz CA19122 EUGAIN), (ii) International Mechanochemical Association (IMA), w celu wspierania współpracy między pionierami mechanochemii a „nowymi uczestnikami” wdrażającymi ją w dotąd nieeksplorowanych obszarach, (iii) kluczowymi interesariuszami oraz instytucjami zajmującymi się standaryzacją, a także (iv) siecią *EuChemS Professional Network for Young Chemists* (EYCN)²⁶.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że wspólnie z EYCN MechSustInd zainicjowała pierwszą edycję międzynarodowej nagrody dla obiecujących młodych naukowców działających w dziedzinie mechanochemii, wyróżniającej doskonałość naukową w formule konkursowej.



Rysunek 2. Geograficzne rozmieszczenie członków CA18112 poza granicami Europy - Źródło ilustracji: Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).

Przełomowe koncepcje, istotne kierunki badań (czego potwierdzeniem jest ponad 100 publikacji naukowych, komunikatów prasowych, komentarzy redakcyjnych, wydań specjalnych itp.) oraz liczne udane inicjatywy wyłonione w ramach COST Action CA18112 są nadal rozwijane i przynoszą wymierne efekty także po zakończeniu programu, wykraczając poza granice Europy. Ich całościowe podsumowanie w kilku zdaniach nie byłoby możliwe, dlatego w niniejszym opracowaniu przedstawiono jedynie wybrane przykłady jako wkład w dalszy rozwój mechanochemii.

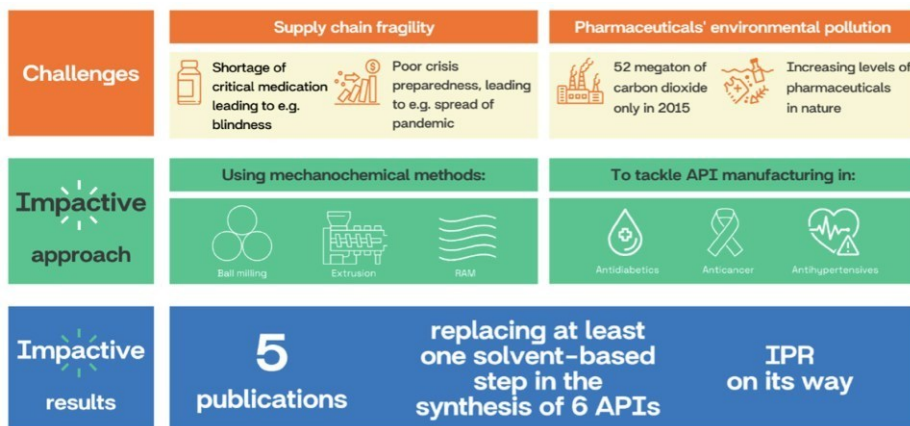
W niedawnym badaniu oceniającym oddziaływanie Akcji COST²⁷ inicjatywa CA18112 została wyróżniona jako „studium przypadku” innowacyjności, na podstawie kryteriów obejmujących jej strukturę i sposób realizacji, a także zakres generowanych rezultatów. Uwzględniono przy tym m.in. opracowanie modeli biznesowych, nowych produktów (w tym patentów) oraz innowacyjnych formatów edukacyjnych, przy jednoczesnym wzmacnianiu komunikacji z decydentami, kluczowymi interesariuszami i społeczeństwem. Osiągnięcia te nabierają szczególnego znaczenia w świetle zakłóceń wywołanych pandemią COVID-19, która istotnie utrudniła realizację działań wymagających bezpośrednich interakcji naukowych oraz aktywności eksperymentalnej, kluczowych dla rozwoju tej dziedziny.

Więcej informacji można znaleźć na stronie: mechsustind.eu

IMPACTIVE: projekt Horizon Europe poświęcony mechanochemii w przemyśle farmaceutycznym

IMPACTIVE (*Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical Ingredients*) to projekt finansowany w ramach programu Horizon Europe, koncentrujący się na zastosowaniu metod i procesów mechanochemicznych w produkcji substancji czynnych (API)¹³. Jego celem jest dostarczenie dowodu słuszności koncepcji w skali pilotażowej, dotyczącej wykorzystania mechanochemii w trybie wsadowym i/lub przepływowym do wytwarzania sześciu API należących do czterech różnych rodzin związków (rys. 3). Czteroletni projekt rozpoczął się w październiku 2022 r. i skupia 17 partnerów z 11 krajów europejskich. Konsorcjum obejmuje uczelnie, instytuty badawcze, małe i średnie przedsiębiorstwa oraz dwóch dużych przedstawicieli przemysłu farmaceutycznego (m.in. Novartis i Merck). Jego członkowie dysponują komplementarnymi kompetencjami w zakresie badań, rozwoju, produkcji oraz transferu i komercjalizacji wyników.

Bariery w zastosowaniu mechanochemii do wytwarzania substancji czynnych nie zawsze mają charakter techniczny. Wśród kierowników działów B+R w sektorze chemicznym i inżynierijskim mechanochemia pozostaje nadal stosunkowo mało znana²⁸, co spowalnia jej wdrażanie na skalę komercyjną. Zarówno wyzwania, jak i potencjalne korzyści związane z przemysłowym wykorzystaniem mechanochemii, w tym w kontekście zrównoważonego finansowania, zostały wcześniej szczegółowo omówione w literaturze⁹.



Rysunek 3. Podsumowanie i cele projektu IMPACTIVE - Źródło ilustracji: Agata Communication Agency (Santander, Spain).

Niemniej jednak mechanochemia oferuje trzy kluczowe zalety, którym warto się bliżej przyjrzeć:

1. W procesach chemicznych rozpuszczalniki mogą stanowić nawet do 90% masy reagentów²⁹, przy czym większość z nich nie spełnia kryteriów przyjazności dla środowiska^{30,31}. Całkowite wyeliminowanie rozpuszczalników lub ich minimalne użycie — jak w procesach *liquid-assisted grinding* (LAG)³² — prowadzi do bardziej ekologicznych syntez³³ oraz poprawy wskaźników zielonej chemii³⁴. W przypadku produkcji substancji czynnych (API) korzyści te mają charakter przełomowy: w ramach studiów przypadków wykazano możliwość redukcji takich parametrów jak ekotoksyczność czy emisja CO₂ nawet o 85%^{19,35}.
2. Procesy prowadzone w skali przemysłowej wymagają ogrzewania i chłodzenia dużych ilości materiału, co wiąże się z istotnymi kosztami³⁶. Ponieważ metody mechanochemiczne zazwyczaj przebiegają w niższych temperaturach, umożliwiają ograniczenie kosztów operacyjnych związanych z wytwarzaniem API. W analizowanych przypadkach odnotowano redukcję kosztów produkcji sięgającą 12%²¹.
3. Jak wskazują zarówno doniesienia medialne³⁷, jak i analizy Komisji Europejskiej³⁸, współczesne łańcuchy dostaw są podatne na zakłócenia i niedobory. Jednocześnie rygorystyczne regulacje związane z realizacją założeń Europejskiego Zielonego Ładu skłoniły część producentów API do przeniesienia produkcji poza Europę, co zwiększyło zależność unijnego przemysłu farmaceutycznego od zagranicznych dostawców. Mechanochemia, poprzez rozwój bardziej zrównoważonych i bezpiecznych procesów technologicznych, może przyczynić się do ponownej lokalizacji produkcji w Unii Europejskiej (Rysunek 3), zgodnie z wysokimi standardami środowiskowymi oraz przy uznaniu tej technologii jako

rozwiązania zrównoważonego przez organy ochrony zdrowia, agencje regulacyjne i decydentów⁶.

Więcej informacji o projekcie IMPACTIVE można znaleźć na stronie: <https://mechanochemistry.eu/>

Projekt typu Round Robin dotyczący mechanochemii

Projekt typu *Round Robin*, oficjalnie rozpoczęty w 2024 roku, obejmuje 36 uczestników reprezentujących 25 instytucji badawczych. Większość zaangażowanych laboratoriów znajduje się w Europie, a kilku kierowników zespołów brało wcześniej udział w Akcji COST CA18112. Inicjatywa ta stanowi wspólny wysiłek badaczy ukierunkowany na ocenę powtarzalności reakcji mechanochemicznych oraz ich standaryzację poprzez identyfikację kluczowych zmiennych i warunków umożliwiających kontrolę przebiegu reakcji. Celem projektu jest wykazanie, że mechanochemia jest metodą powtarzalną, o ile analizie poddaje się stany stacjonarne, niezależnie od zastosowanej aparatury czy osoby prowadzącej eksperyment. Projekt koncentruje się na badaniu trzech reakcji chemicznych, jednego procesu tworzenia kokryształu oraz jednej przemiany polimorficznej, realizowanych przez różne zespoły badawcze w celu weryfikacji poprawności protokołów oraz sprawdzenia podstawowych hipotez roboczych.

Grupa zadaniowa IUPAC ds. terminologii i symboliki w mechanochemii

W 2019 roku Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, IUPAC) zaliczyła mechanochemiczne procesy przepływowe do grona dziesięciu wschodzących technologii, które mogą przyczynić się do zwiększenia zrównoważenia naszej planety⁶.

Choć mechanochemia ma głębokie korzenie historyczne^{2,3}, nadal brakuje w tej dziedzinie spójnej i ustandaryzowanej terminologii — funkcjonują bowiem różne określenia, takie jak trybochemia, mechaniczne stopowanie czy mechanochemia, odnoszące się do wykorzystania siły mechanicznej do inicjowania reakcji chemicznych. Sam termin „mechanochemia”, używany w niniejszym artykule, pozostaje nieprecyzyjnie zdefiniowany w *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*¹, gdzie reakcję mechanochemiczną opisano jedynie jako proces „wywołany bezpośrednim pochłanianiem energii mechanicznej”.

W połączeniu z szerokim wachlarzem materiałów, urządzeń, metod i praktyk stosowanych w procesach mechanochemicznych wskazuje to na potrzebę ujednolicenia definicji oraz uporządkowania terminologii i symboliki w tej dziedzinie. Inicjatywa będąca bezpośrednim rezultatem działań COST Action CA18112, która przyczyniła się do ograniczenia tej luki i stanowi ważny krok w kierunku szerszego uznania mechanochemii, została podjęta w 2024 roku, kiedy IUPAC wsparła powołanie Grupy Zadaniowej ds. „Terminologii i Symboliki w Mechanochemii”³⁹. Celem tego projektu

jest opracowanie spójnej terminologii i klasyfikacji stosowanych w mechanochemii poprzez zaproponowanie ustandaryzowanego nazewnictwa i symboliki. Ma to ułatwić komunikację w środowisku naukowym oraz wspierać wdrażanie mechanochemii nie tylko w badaniach akademickich, lecz także w działalności badawczo-rozwojowej oraz produkcji przemysłowej. W perspektywie średnioterminowej dąży się do wypracowania obiektywnych, międzynarodowo uzgodnionych wytycznych, które umożliwią dalszy rozwój tej dziedziny, a jednocześnie zwiększą jej widoczność i wiarygodność w oczach różnych grup interesariuszy.

Więcej informacji o projekcie IUPAC dotyczącym terminologii i symboliki w mechanochemii można znaleźć na stronie: iupac.org/project/2023-034-2-100.

Grupa Robocza EuChemS ds. mechanochemii

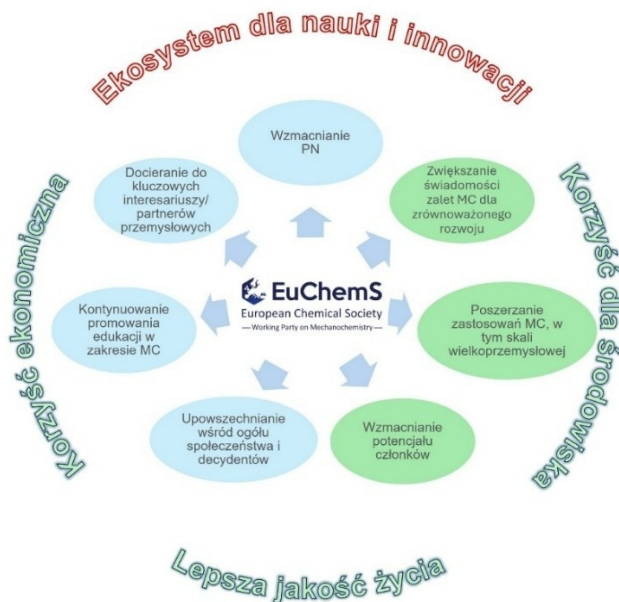
Dzień 2 października 2023 r. stanowi kamień milowy dla mechanochemii w Europie oraz wyjątkową inicjatywę w skali globalnej: w Larnace (Cypr) powołano „Grupę Roboczą ds. Mechanochemii” w ramach Europejskiego Towarzystwa Chemicznego (EuChemS). Ta profesjonalna sieć współpracy (PN) stanowi kontynuację oraz rozwinięcie działań zapoczątkowanych w ramach Akcji COST CA18112 „Mechanochemia dla Zrównoważonego Przemysłu” i została utworzona dzięki silnemu zaangażowaniu jej byłych uczestników. Oficjalnie uruchomiona w 2024 roku grupa liczy już 32 członków delegowanych przez 22 krajowe towarzystwa chemiczne w Europie, przy zachowaniu dobrej równowagi geograficznej. Jej członkowie dysponują szerokim spektrum kompetencji obejmujących różnorodne obszary zastosowań mechanochemii, a ich liczba stale rośnie, co odzwierciedla rosnące zainteresowanie tą innowacyjną koncepcją „myślenia o chemii inaczej”¹⁴.

Głównym celem nowo utworzonej profesjonalnej sieci współpracy (PN) w zakresie mechanochemii w EuChemS jest funkcjonowanie jako ekosystem nauki i innowacji, wzmacniający widoczność oraz integrację tej dziedziny w europejskiej społeczności naukowej i poza nią.

Wśród kluczowych celów (Rysunek 4) Grupa Robocza ds. Mechanochemii stawia sobie: (i) ugruntowanie pozycji jako wiodącej platformy dyskusji i wymiany wiedzy, wspierającej rozwój rozumienia mechanochemii i jej znaczenia, w tym ograniczanie negatywnego wpływu tradycyjnych procesów chemicznych poprzez wdrażanie bardziej zrównoważonych technologii, zgodnych z 17 Celami Zrównoważonego Rozwoju ONZ; (ii) wspieranie szerokiego wdrażania mechanochemii w chemii podstawowej i stosowanej oraz w dziedzinach interdyscyplinarnych poprzez jej integrację z działalnością akademicką, badawczo-rozwojową, przemysłową i edukacyjną; (iii) zachęcanie krajowych towarzystw chemicznych oraz wspieranie ich działań na rzecz promowania roli i znaczenia mechanochemii; (iv) wzmacnianie wiarygodności i rozpoznawalności mechanochemii poprzez aktywne angażowanie społeczeństwa i decydentów, m.in. za pośrednictwem mediów społecznościowych, newsletterów oraz organizacji konferencji i warsztatów; (v) rozwijanie współpracy i sieci kontaktów między

krajowymi grupami i sekcjami towarzystw zrzeszonych w EuChemS, a także z odpowiednimi organizacjami europejskimi i międzynarodowymi; (vi) promowanie doskonałości naukowej poprzez konkursy i systemy nagród.

Lista ta ma charakter otwarty, a szczegółowe informacje są na bieżąco aktualizowane na oficjalnej stronie internetowej⁴⁰.



Rysunek 4. Grupa Robocza EuChemS ds. Mechanochemii: cele i zadania. *Legenda:* MC – mechanochemia, PN – profesjonalna sieć współpracy (Professional Network) - *Źródło ilustracji:* Zara Cherkezova-Zheleva (Institute of Catalysis, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia).

Wnioski

Podsumowując, przedstawione sześć kamieni milowych stanowi jedynie wybrany fragment spośród licznych inicjatyw związanych z mechanochemią na świecie, które współtworzą dynamiczną i szybko rozwijającą się kulturę badawczą w tej dziedzinie — obejmującą zarówno konferencje, wykłady i webinaria, jak i międzynarodowe projekty badawcze oraz ukierunkowane zastosowania przemysłowe. Mechanochemia znajduje się obecnie w fazie intensywnego rozwoju i posiada potencjał, by stać się jednym z kluczowych narzędzi dekarbonizacji procesów chemicznych, oferując rozwiązania ograniczające lub eliminujące stosowanie szkodliwych rozpuszczalników, a także wykraczające poza ten obszar. Realizacja tego potencjału będzie możliwa dzięki skoordynowanemu wysiłkowi tysięcy naukowców i interesariuszy, którzy aktywnie przyczyniają się do rozwoju, upowszechniania i wdrażania mechanochemii.

Zastrzeżenia

Poglądy wyrażone w niniejszym artykule są poglądami autora/ów. Publikacja w *Open Research Europe* nie oznacza poparcia ze strony Komisji Europejskiej.

Autorzy są częścią projektu UE Horizon IMPACTIVE, jednego z kamieni milowych omówionych w niniejszym artykule.

Oświadczenie dotyczące dostępności danych

W związku z niniejszym artykułem nie udostępnia się żadnych danych.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania Prezesowi Międzynarodowego Stowarzyszenia Mechanochemicznego (IMA), prof. Vladimirowi Šepelákowi (Karlsruhe Institute of Technology, Niemcy) za poświęcony czas i gotowość do udzielenia cennych informacji na potrzeby niniejszego artykułu.

LITERATURA

- [1] Gold V, McNaught A: The IUPAC compendium of chemical terminology. The Gold Book (ed.). International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2025; (accessed, 02 March 2025). <https://goldbook.iupac.org/>
- [2] Takacs L: Quicksilver from cinnabar: the first documented mechanochemical reaction? *JOM*. 2000; 52: 12–13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-000-0106-0>
- [3] Takacs L: The historical development of mechanochemistry. *Chem Soc Rev*. 2013; 42(18): 7649–7659. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/cs/c2cs35442j>
- [4] Sharma P, Vetter C, Ponnusamy E, *et al.*: Assessing the greenness of mechanochemical processes with the DOZN 2.0 tool. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2022; 10(16): 5110–5116. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.1c07981>
- [5] For current TRL definitions in the European Union, please visit: Horizon Europe Work Programme 2023–2025 Annexes. (accessed, 02 March 2025). https://commission.europa.eu/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-2013-general-annexes_horizon-2023-2024_en.pdf
- [6] Gomollón-Bel F: Ten chemical innovations that will change our world: IUPAC identifies emerging technologies in Chemistry with potential to make our planet more sustainable. *Chem Int*. 2019; 41(2): 12–17. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ci-2019-0203/html>
- [7] For the seminal article indicating the link between mechanochemistry and the UN SDGs, please see reference 9.
- [8] For the first mention in the literature indicating the link between mechanochemistry and the European Green Deal objectives, please see: Virieux D, Delogu F, Porcheddu A, *et al.*: Mechanochemical rearrangements. *J Org Chem*. 2021; 86(20): 13885–13894. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.joc.1c01323>
- [9] Colacino E, Isoni V, Crawford D, *et al.*: Upscaling mechanochemistry: challenges and perspectives. *Trends Chem*. 2021; 3: 335–339. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589597421000526?via%3Dihub>
- [10] Gomollón-Bel F: Mechanochemists want to shake up industrial chemistry. *ACS Cent Sci*. 2022; 8(11): 1474–1476. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.2c01273>
- [11] Gomollón-Bel F: *Chem Eng News*. 2022; 100: 21–22.

- [12] Gomollón-Bel F, García-Martínez J: Emerging chemistry technologies for a better world. *Nat Chem*. 2022; 14(2): 113–114. <https://www.nature.com/articles/s41557-021-00887-9>
- [13] European Commission: Innovative mechanochemical processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical ingredients. IMPACTIVE Project - Fact Sheet - HORIZON. CORDIS, European Commission, (October 1, 2022). <https://cordis.europa.eu/project/id/101057286#:~:text=Mechanochemistry%20uses%20mechanical%20processes,%20such,energy%20use%20and%20CO2%20emission>
- [14] The expression was firstly used in: Lanzillotto M, Konnert L, Lamaty F., *et al.*: Mechanochemical 1,1'-carbonyldiimidazole mediated preparation of carbamates. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2015; 3(11): 2882–2889. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.5b00819>
- [15] COST Programme: Action CA18112. (accessed 02 March 2025). <https://www.cost.eu/actions/CA18112/>
- [16] For more information on COST Action CA18112 Mechanochemistry for Sustainable Industry. (MechSustInd). (accessed 02 March, 2025). <https://www.mechsustind.eu/>
- [17] Baláz M, Vella-Zarb L, Hernández J, *et al.*: Mechanochemistry: a disruptive innovation for the industry of the future. *Chem Today*. 2019; 37(6): 32–34. https://www.teknoscienze.com/tks_article/mechanochemistry-a-disruptive-innovation-for-the-industry-of-the-future/
- [18] Hernández J, Halasz I, Crawford DE, *et al.*: European research in focus: Mechanochemistry for Sustainable Industry (COST Action MechSustInd). *Eur J Org Chem*. 2020; (1): 8–9. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ejoc.201901718>
- [19] Lim X: Interlocking screws crank out pharmaceuticals. *Chem Eng News*. 2020; 98(38). (30 September, 2020). <https://cen.acs.org/pharmaceuticals/process-chemistry/Interlocking-screws-crank-pharmaceuticals/98/i38>
- [20] COST Programme: Memorandum of Understanding (MoU) for the implementation of the COST Action “Mechanochemistry for Sustainable Industry” (MechSustInd) CA18112. https://mechsustind.eu/images/mechsustind/documents/MoU_CA18112.pdf
- [21] Galant O, Cerfeda G, McCalmont AS, *et al.*: Mechanochemistry can reduce life cycle environmental impacts of manufacturing active pharmaceutical ingredients. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2022; 10(4): 1430–1439. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.1c06434>
- [22] For more information: Beyond Benign. About partnerships—beyond benign. (accessed 02 March, 2025). <https://www.beyondbenign.org/about-partnerships/>
- [23] Colacino E, Dayaker G, Morère A, *et al.*: Introducing students to mechanochemistry via an environmentally-friendly organic synthesis using a solvent-free mechanochemical preparation of Anti-diabetic Drug, Tolbutamide. *J Chem Educ*. 2019; 96(4): 766–771. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.8b00459>
- [24] Introduction to practical mechanochemistry: from soft to hard materials. Colacino, E., Ennas, G., Halasz, I., Porcheddu, A., Scano, A. Eds.; De Gruyter, 2021. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783110608335/html>
- [25] Mechanochemistry and emerging technologies for sustainable chemical manufacturing. Eds. Colacino, E., Garcia, F.; CRC press, Taylor & Francis Group. ISBN 9780367775018, 2023. <https://www.routledge.com/Mechanochemistry-and-Emerging-Technologies-for-Sustainable-Chemical-Manufacturing/Colacino-Garcia/p/book/9780367775018>
- [26] EuChemS: European young chemists’ network. (accessed 02 March, 2025). <https://www.euchems.eu/divisions/european-young-chemists-network/>
- [27] Biela J, Stalla M, Rabe L, *et al.*: Impact assessment study on innovation in COST actions. November, 2024; accessed 02 March, 2025. <https://www.cost.eu/uploads/2025/01/COST-Impact-Assessment-Innovation-112024.pdf>
- [28] De Merlier J: Is mechanochemistry set to disrupt chemical manufacturing? The Venturi Tribe, 23 February, 2023; (accessed 02 March, 2025). <https://www.venturi-tribe.com/is-mechanochemistry-set-to-disrupt-chemical-manufacturing/>
- [29] Sansom C: Solvents and sustainability. *Chemistry World*. 2018. <https://www.chemistryworld.com/features/solvents-and-sustainability/3008751.article>
- [30] Clarke CJ, Tu WC, Levers O, *et al.*: Green and sustainable solvents in chemical processes. *Chem Rev*. 2018; 118(2): 747–800. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00571>

- [31] Krenz J, Simcox N, Stoddard J, *et al.*: Transitioning to safer chemicals in academic research laboratories: lessons learned at the University of Washington. *ACS Sustainable Chem Eng.* 2016; 4(7): 4021–4028. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.6b00926>
- [32] Friščić T, Childs SL, Rizvi SAA, *et al.*: The role of solvent in mechanochemical and sonochemical cocrystal formation: a solubility-based approach for predicting cocrystallisation outcome. *Cryst Eng Comm.* 2009; 11: 418–426. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/ce/b815174a>
- [33] Ball milling towards green synthesis: applications, projects, challenges. Ranu, B.; Stolle, A. Eds.; Royal Society of Chemistry, 2014. <https://books.rsc.org/books/edited-volume/1474/Ball-Milling-Towards-Green-Synthesis-Applications>
- [34] Fantozzi N, Volle JN, Porcheddu A, *et al.*: Green metrics in mechanochemistry. *Chem Soc Rev.* 2023; 52(19): 6680–6714. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/cs/d2cs00997h>
- [35] Crawford DE, Porcheddu A, McCalmont AS, *et al.*: Solvent-Free, Continuous synthesis of Hydrazone-based active pharmaceutical ingredients by twinscrew extrusion. *ACS Sustainable Chem Eng.* 2020; 8(32): 12230–12238. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.0c03816>
- [36] Clark JH, Hunt A, Topi C, *et al.*: Sustainable solvents: perspectives from research, business and international policy. The Royal Society of Chemistry, 2017. <https://books.rsc.org/books/monograph/633/Sustainable-Solvents-Perspectives-from-Research>
- [37] Mullin R: COVID-19 is reshaping the pharmaceutical supply chain. *Chem Eng News.* 2020; 98(16). (accessed 02 March, 2025). <https://cen.acs.org/business/outsourcing/COVID-19-reshaping-pharmaceutical-supply/98/i16>
- [38] European Commission: First in-depth review of strategic areas of Europe's interests. May, 2021; accessed, 02 March, 2025. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/depth-reviews-strategic-areas-europes-interests_en
- [39] Terminology and symbolism for mechanochemistry. *Chem Int.* 2024; 46(2): 34–34. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ci-2024-0220/html>
- [40] <https://www.euchems.eu/divisions/working-party-on-mechanochemistry/>

Praca wpłynęła do Redakcji 28 maja 2026 r.

