

Tehnični članek

Mehanokemija v Evropi: od kod prihajamo in kje smo danes

Mirela Dragomir,^{1,2} Tadej Rojac,^{1,2} Juan José Sáenz de la Torre,³ Leyre Flamarique,³ Fernando Gomollon-Bel^{3,*} and Evelina Colacino^{4,*}

¹ Department of Electronic Ceramics, Jožef Stefan Institute, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenia

² Jožef Stefan International Postgraduate School, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenia

³ Agata Communications, C. Hernán Cortés 15, 39003 Santander, Cantabria, Spain

⁴ ICGM, Université de Montpellier, CNRS, ENSCM, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France

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

Received: 12-02-2026

Povzetek

Mehanokemija je stara več tisoč let, vendar je bila dolgo časa zapostavljena v korist kemije v raztopinah. Šele v zadnjem času so se mehanokemijske metode uveljavile za razvoj zelene kemije, saj ponujajo alternativo tradicionalnim kemijskim procesom, kjer se običajno uporabljajo organska topila. Mehanokemija se že uspešno uporablja v metalurški industriji, farmacevtski industriji za pretvorbo biomase, recikliranje in razgradnjo polimerov.

Na področju mehanokemije so se v zadnjih letih razvile številne pobude, ki so nastale kot rezultat skupnih prizadevanj znanstvenikov v Mednarodnem mehanokemijskem združenju. Odobritev projekta COST Action MechSustInd je omogočila pridobivanje sredstev za projekt EU Horizon IMPACTIVE in za ustanovitev Delovne skupine za mehanokemijo pri EuChemS, organizacijo projekta Round Robin na področju mehanokemijskih transformacij ter odobritev projekta IUPAC, namenjenega terminologiji. Vse te pobude utrjujejo vodilno vlogo Evrope na področju mehanokemijskih inovacij.

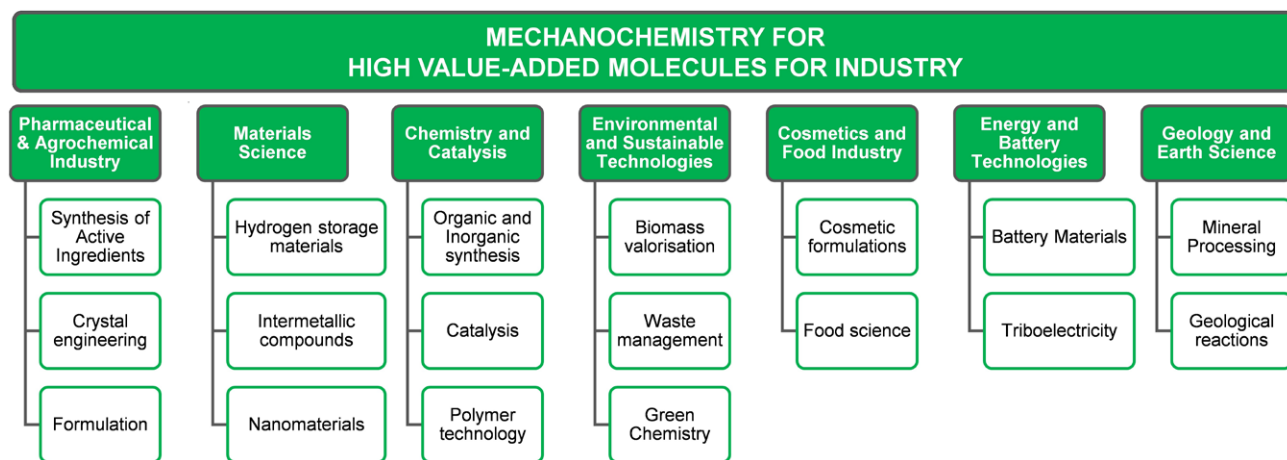
Ključne besede: mehanokemija; zelena kemija; trajnost; metode brez topil; okolju prijazni postopki; standardizacija.

Mehanokemija je veda o kemijskih reakcijah, ki jih sproži mehanska energija,¹ kar pomeni, da se reakcije izvedejo z mehanskimi silami, ki nastanejo preko udarca, striženja, stiskanja ali raztezanja snovi. Uporaba mehanskih sil za spodbujanje kemijskih transformacij se je pojavila že v antičnem delu *De lapidibus* (»O kamnih«) Teofrasta iz Eresa (4. stoletje pr. n. št.), ki predstavlja najstarejše znano delo povezano s kemijskimi znanostmi. V njem je opisano pridobivanje elementarnega živega srebra z drgnjenjem in mletjem njegovega minerala, cinabarita, v bakreni terilnici.^{2,3}

Čeprav je kemija v raztopinah skozi čas postala industrijski standard, se je v zadnjih desetletjih število znanstvenih objav na temo mehanokemije na različnih področjih aplikacij močno povečalo (slika 1). Stopnja tehnološke zrelosti (Technology Readiness Levels, TRL)⁵ se pri tem razlikuje glede na industrijski sektor, v katerem se mehanokemijske procese uporablja.⁴ Najvišja stopnja TRL (TRL

9) je dosežena na področjih energije in trdnih materialov (npr. metalurgija, upravljanje z odpadki), kjer mehanokemija predstavlja konkurenčen proizvodni proces.

Z naraščajočim povpraševanjem po čistejših kemijskih procesih je IUPAC leta 2019 mehanokemijo prepoznal kot eno izmed »razvijajočih se tehnologij za povečanje trajnosti našega planeta«, leta 2021 pa kot učinkovito orodje za doseganje ciljev trajnostnega razvoja Združenih narodov (UN SDGs)⁷ in ciljev t.i. Evropskega zelenega dogovora.⁸ V skladu z dvanajstimi načeli zelene kemije in zelenega inženirstva⁹, predstavlja mehanokemija prelomni pristop,^{10–12} saj podpira zeleni prehod ter ima potencial za razogljičenje okolja in zmanjšanje negativnega vpliva kemijske industrije na okolje in naravo.^{10,12} Po vsej Evropi obstaja veliko pobud (med prvimi je bil program EU COST Action CA18112 »Mechanochemistry for Sustainable Industry (MechSustInd)«, ki so pripomogle k povečanju potenciala mehanokemije, pri čemer vsaka obravnava različne vidike.



Slika 1. Uporaba mehanokemijskih postopkov. Prilagojeno po izvirniku – avtor slike: Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).

Nekatere iniciative, kot je projekt Horizon Europe IMPACTIVE, spodbujajo implementacijo mehanokemijske tehnologije v specifičnih industrijskih okoljih, kot so farmacevtska podjetja,¹³ medtem ko IUPAC Task Group »Terminology and Symbols for Mechanochemistry« in »EuChemS Professional Network (PN) on mechanochemistry« delujeta tako na zasebnem kot na javnem sektorju. Po drugi strani, projekt Round Robin obravnava specifična vprašanja temeljnih raziskav. Omenjene pobude ustvarjajo pogoje za medsebojno povezovanje raziskovalnih področij, pri čemer so hkrati usmerjene k oblikovanju splošno priznanih znanstvenih standardov in smernic za področje. Namen vseh teh pobud, pri katerih sodelujejo člani IMA (International Mechanochemical Association), torej tudi akademiki, je postaviti Evropo v edinstven položaj za inovacije na področju mehanokemije, spodbujati bolj zelen in trajnosten način izvajanja kemije ter preoblikovati pogled na mehanokemijo kot znanstveno vejo kemije.¹⁴

V naslednjih odstavkih bodo, ob poudarku na temeljni vlogi IMA, opisane različne evropske pobude, povezane z mehanokemijo, in sicer v kronološkem vrstnem redu.

International Mechanochemical Association (IMA)

International Mechanochemical Association (IMA) je prvo mednarodno združenje, ustvarjeno za promocijo in razvoj področja mehanokemije. Združenje so ustanovili leta 1988 v kraju Tatranská Lomnica (današnja Slovaška) s predstavniki iz Japonske, nekdanje Sovjetske zveze in Češkoslovaške. Trenutno združenje šteje 120 članov, razporejenih po 31 državah na 4 celinah.

V preteklih letih je IMA zgradila tako geografske kot znanstvene »mostove« ter združila strokovno znanje znanstvenikov, vodilnih raziskovalcev na tem področju in poglobila razumevanje mehanokemijskih procesov trdnih snovi. To se je uresničilo v številnih sodelavah in pobudah, kar je dodatno utrdilo pot k rasti področja in vodilo k na-

daljnem vpeljevanju mehanokemijskih metod tudi na druga področja kemije in procesnega inženirstva.

Dodatna vloga IMA pri širjenju mehanokemije je njen poudarek na mladih znanstvenikih, pri čemer igra pomembno vlogo mednarodna konferenca INCOME, International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, ki poteka vsaka tri leta. Prva izdaja konference INCOME je potekala v Košicah (Slovaška) leta 1993. Do danes je bilo organiziranih 10 tovrstnih konferenc, pri čemer vsako leto beležimo naraščajoče število udeležencev. 11. konferenca INCOME je potekala v Berlin-Adlershofu (v Nemčiji) leta 2025.

Več informacij o IMA je na voljo na spletni strani <http://imamechanochemical.com/>.

MechSustInd: Iniciativa »COST Action« osredotočena na mehanokemijo

Evropski program COST Action CA18112 »Mechanochemistry for Sustainable Industry« (MechSustInd), ki je bil aktiven med leti 2019 in 2023, je združil več vidikov mehanokemije.^{15–18} Tudi po zaključku programa se temeljni uspehi, inovativni pristopi in koncepti, ki izhajajo iz COST Action CA18112, še naprej širijo in uspevajo, hkrati pa navdihujejo podobne pobude po svetu.

S spodbujanjem evropskega sodelovanja preko znanosti in tehnologije je bila omenjena pobuda namenjena: i) vzpostavitvi procesov, ki so sposobni prenosa v večje merilo, ii) usklajevanju nomenklature, iii) standardizaciji terminologije in protokolov (s ciljem zadovoljiti industrijskim zahtevam), iv) olajšanju izmenjave znanja, v) opremljanju raziskovalcev in mladih znanstvenikov s potrebnimi veščinami za vključevanje trajnostnih praks preko mehanske aktivacije v vsakodnevne raziskovalne aktivnosti ter vi) napredovanju sodelovanja med industrijskimi partnerji in akademskimi raziskovalci z dvigom ozaveščenosti o prednostih vključevanja mehanokemije v kemične procese tako v fazi R&R kot v proizvodnem merilu.

Skozi številne pobude mreženja, organiziranih skozi celotno trajanje projekta, se je na področju mehanokemije usklajevalo temeljne in aplikativne raziskave s tehnološkimi inovacijami in industrijskimi potrebami, kjer je cilj razviti zeleno ekonomijo za trajnostno proizvodnjo farmacevtsko relevantnih molekul.¹⁹

Programu MechSustInd je uspelo vzpostaviti multidisciplinarno mrežo prek evropskih meja, ki združuje znanstvenike, inženirje, podjetnike in investitorje s strokovnim znanjem na različnih področjih mehanokemije. Le-ti so razporejeni po treh delovnih skupinah,²⁰ ki obravnavajo tako laboratorijsko merilo (kot del WG1) kot tudi povečevanje obsega mehanokemijskih sintez preko ocene tehnologij (WG3); po drugi strani, WG2 izvaja raziskave mehanizmov reakcij in jih kvantitativno ocenjuje v primerjavi z obstoječimi reakcijskimi postopki, ki se izvajajo v raztopinah.

Iniciativa COST Action je imela specifičen cilj približati mehanokemijo industriji z uporabo meril zelene kemije ter metod za t.i. »life cycle assessment (LCA)« in »techno-economic analyses (TEA)«, ki so jih testirali na primeru mehanokemijske sinteze zdravila WHO.²¹

Pobuda je štela 150 članov, v glavnem znanstvenikov, aktivnih tako v javnem kot zasebnem sektorju, ki delujejo v 46 sodelujočih državah (38 v Evropi), tudi izven geografskih meja Evrope; med člani pa so tudi znanstveniki iz Kanade, Kitajske, Japonske, Mehike, Rusije, Singapurja, Južne Afrike, Južne Koreje in ZDA (Slika 2).

Edinstven akademski doprinos na področju mehanokemije so dosegli z organizacijo petih mednarodnih šol za usposabljanje po Evropi in sicer s predavatelji tako iz akademskega kot industrijskega okolja ter ključnimi temami, kot so: i) mehanokemijska organska sinteza in kinetika (šola organizirana v Italiji), ii) širjenje obsega mehanokemijskih reakcij (šola v Nemčiji), iii) *ex-situ* in *in situ* analize mehanokemijskih reakcij (šola na Hrvaškem, predavana v živo iz Malte), ter iv) strukturna karakterizacija supramolekularnih in kovalentnih spojin (predvajano v živo iz Portugalske).

Vključenost mehanokemije v izobraževalne namene je dosegla izjemen mednarodni doseg, tudi onkraj geografskih meja Evrope. Program MechSustInd je namreč povezal mehanokemijo z izobraževanjem o zeleni kemiji na naslednje načine: i) z ustvarjanjem strateškega partnerstva z mednarodno priznanimi združenji (npr. Beyond Benign, ZDA),²² ki spodbujajo izobraževanje o zeleni kemiji in trajnosti, ii) z objavo prvega članka o mehanokemiji namenjenega izobraževanju²³, in iii) z izdajo dveh strokovnih knjig na isto temo.^{24,25}

Pandemija se je tako obrnila v priložnost; od leta 2020 in skozi celotno obdobje karantene je bilo v okviru iniciative »Get together during COVID« organiziranih 31 webinarjev, v katerih je sodelovalo 53 predavateljev iz Evrope in drugih delov sveta. Pristop je omogočil dvig nivoja strokovnega znanja, ohranil je močne povezave med člani in posodobil cilje združenja.



Slika 2. Geografska razporeditev članov CA18112, tudi izven Evropskih meja. Avtorica slike: Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).

Kljub negativnim posledicam svetovne pandemije, je program MechSustInd dosegel visoko raven uspešnosti predvsem pri vključevanju mehanokemijske metode v izobraževalne aktivnosti in akademske učne načrte, s čimer je program dosegel pričakovanja EU po »novih veščinah« za »nove poklice« na področju zelene kemije.

Strateška partnerstva je možno vzpostaviti z mednarodnimi in evropskimi kemijskimi društvi ter združenji po Evropi. Posebej so bile vzpostavljene povezave: i) z drugimi programi COST Actions (npr. CA18224 GREENE-RING in CA19122 EUGAIN), ii) z združenjem IMA za spodbujanje interakcije med znanstveniki, ki so vodilni na

področju mehanokemije, in novimi raziskovalnim skupinami, ki mehanokemijo šele uvajajo v nova področja, iii) s ključnimi deležniki in agencijami za standardizacijo ter iv) z mrežo »EuChemS Professional Network for Young Chemists (EYCN)«,²⁶

Izjemno je, da je program MechSustInd v sodelovanju z mrežo EYCN uvedel prvo mednarodno nagrado za mladega raziskovalca s področja mehanokemije, s katero je možno oceniti znanstveno odličnost.

Koncepti, znanstvene usmeritve in uspešne aktivnosti, ki so izšle iz projekta COST Action CA18112 (kar potrjuje tudi več kot 100 raziskovalnih izidov, poljudno-znanstvenih prispevkov za javnost, številnih uvodnih besed in posebnih izdaj revij), so še vedno v razvoju ter še naprej uspevajo po zaključku projekta in tudi izven geografskih meja Evrope. Nerealno bi jih bilo povzeti v nekaj vrsticah. V tem prispevku predstavljamo le nekaj izmed dosežkov pri razvoju področja mehanokemije.

V nedavni študiji o oceni vpliva COST Actions²⁷ je bil CA18112 izpostavljen kot primer inovacijske študije in sicer na podlagi kriterijev, ki vrednotijo strukturo in izvedbo akcije ter obseg ustvarjenih rezultatov, vključno s poslovnimi modeli, novimi produkti (kot so patenti) in izobraževalnimi okvirji ter izboljšano komunikacijo s političnimi organi, ključnimi deležniki in širšo javnostjo. To je še posebej pomembno ob upoštevanju negativnih učinkov pandemije Covid-19, ki je močno vplivala na izvajanje tistih aktivnosti, ki so zahtevale mreženje in eksperimentalne dejavnosti. Več informacij je na voljo na spletni strani www.mechsustind.eu.

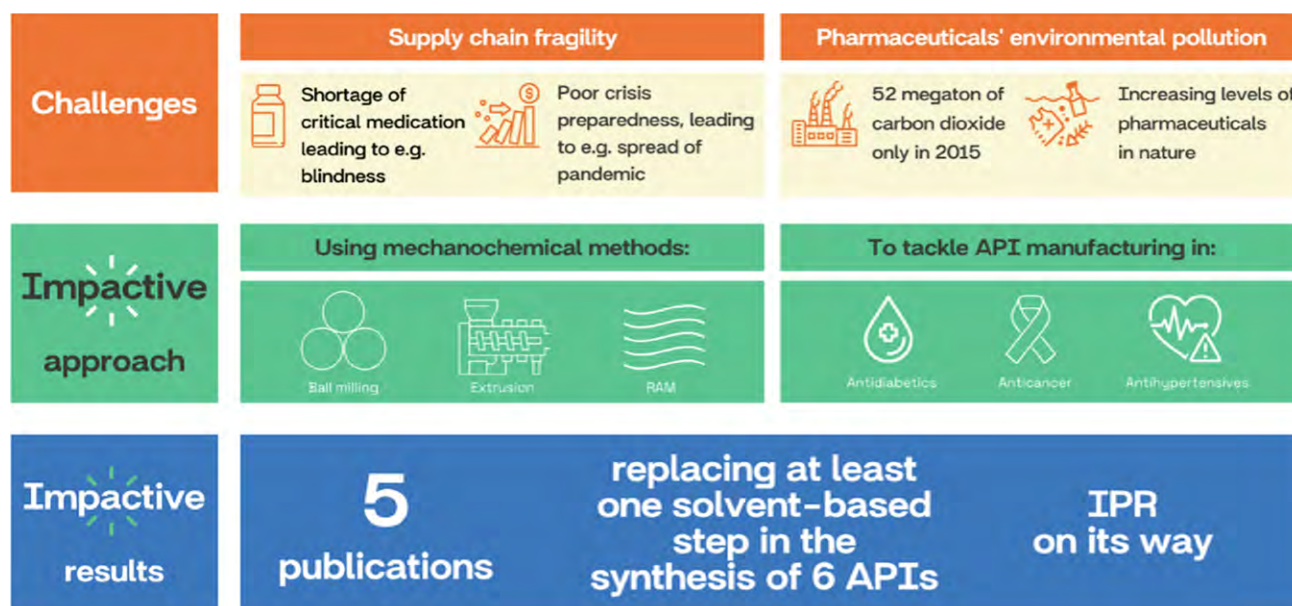
Projekt IMPACTIVE (*Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE Pharmaceutical Ingredients*), financiran v okviru programa Horizon Europe, se osredotoča na uporabo mehanokemijskih metod in

procesov pri proizvodnji API (Active Pharmaceutical Ingredients).¹³ Cilj projekta je dokazati uspešnosti koncepta na manjšem pilotnem merilu za uporabo šaržne in/ali kontinuirne mehanokemije za proizvodnjo 6 API iz 4 različnih družin spojin (Slika 3).

Štiriletni projekt se je začel oktobra 2022 in združuje 17 partnerjev, ki delujejo v 11 evropskih državah. Vključuje univerze in raziskovalne inštitucije, manjša in srednja velika podjetja (MSP) ter dve veliki podjetji v farmacevtski industriji (npr. Novartis in Merck). Člani konzorcija imajo raznolika strokovna znanja, ki pokrivajo raziskave, razvoj, proizvodnjo in izkoriščanje rezultatov.

Ovire pri uporabi mehanokemije za proizvodnjo aktivnih farmacevtskih učinkovin niso vedno tehnične narave. Med vodilnimi R&R na področju kemije in inženirstva je mehanokemija še vedno slabo poznana,²⁸ kar upočasnuje njeno komercializacijo. Ovire in prednosti industrijske mehanokemije, tudi z vidika trajnostnega financiranja, so bile že predhodno izpostavljene.⁹ Kljub temu mehanokemija ponuja tri glavne prednosti, ki jih je vredno nadalje raziskati:

1. V kemijskih procesih topila predstavljajo do 90 % mase reaktantov.²⁹ Večina topil, v kemijskih reakcijah in proizvodnih procesih ni okolju prijazna.^{30,31} Postopki brez topil ali njihova uporaba v minimalnih količinah (kot pri postopkih »Liquid-Assisted Grinding (LAG)«)³² vodi do okolju prijaznejših sintez³³ z izboljšanimi okoljskimi kazalniki.³⁴ Za proizvodnjo API so te prednosti izjemne, recimo v primeru te študije so se kazalniki, kot sta ekotoksičnost in emisije CO₂, zmanjšali tudi do 85%.^{19,35}
2. V industrijskem merilu sta segrevanje in hlajenje snovi netrivialna in vključujeta dodatne stroške.³⁶ Ker mehanokemijske metode delujejo pri nižjih



Slika 3. Povzetek in cilji projekta IMPACTIVE. Avtor slike: Agata Communication Agency (Santander, Spain).

temperaturah, se lahko obratovalni stroški proizvodnje API potencialno zmanjšajo. Ponovno je bilo v študiji dokazano, da so se proizvodni stroški zmanjšali za 12 %.²¹

3. Kot poročajo mediji³⁷ in Evropska komisija,³⁸ je delovanje dobavnih verig za farmacevtske izdelke oslabljeno. Strogi predpisi, sprejeti za doseganje ciljev EU Green Deal, so spodbudili proizvajalce API k selitvi proizvodnje na druge lokacije, kar je povzročilo odvisnost farmacevtske industrije EU od tujih dobavnih verig. Z razvojem bolj trajnostnih in varnejših procesov za kemijsko in farmacevtsko industrijo lahko mehanokemija pripomore k ponovni vzpostavitvi proizvodnje v EU (Slika 3). Ob hkratnem izpolnjevanju najvišjih okoljskih standardov pa se lahko mehanokemija v Evropi uveljavi s priznanjem te trajnostne tehnologije⁶ tako s strani zdravstvenih organizacij in regulativnih organov.

Več informacij o projektu IMPACTIVE je na voljo na: <https://mechanochemistry.eu/>

Projekt Round Robin na področju mehanokemije

Projekt Round Robin, ki se je uradno začel leta 2024, vključuje 36 udeležencev iz 25 raziskovalnih institucij. Večina vključenih laboratorijev je evropskih, več vodij raziskovalnih skupin pa je sodelovalo tudi v okviru COST akcije CA18112. Projekt predstavlja skupna prizadevanja raziskovalcev, katerih cilj je preučiti ponovljivost mehanokemijskih reakcij in njihovo standardizacijo z identifikacijo pogojev, ki omogočajo nadzor nad mehanokemijsko reakcijo.

Cilj projekta je pokazati, da je mehanokemija ponovljiva in zanesljiva metoda, v kolikor se obravnavajo stacionarna stanja, ne glede na uporabljeno opremo ali izvajalca eksperimenta. Projekt se osredotoča na preučevanje treh kemijskih reakcij, med njimi tvorba ko-kristala in polimorfne transformacije, ki so razporejene med različne raziskovalne skupine z namenom preverjanja veljavnosti protokolov in potrditve nekaterih osnovnih delovnih hipotez.

IUPAC delovna skupina za terminologijo in simboliko mehanokemije

Leta 2019 je Mednarodna zveza za čisto in uporabno kemijo (IUPAC) uvrstila kontinuirne mehanokemijske procese med deset nastajajočih tehnologij za večjo trajnost planeta.⁶

Čeprav ima mehanokemija obsežno zgodovino,^{2,3} še vedno potrebujemo standardizirano terminologijo; na primer, tribokemija, mehansko legiranje in mehanokemija so izrazi, ki se nanašajo na uporabo mehanokemijske sile za sproženje kemijskih reakcij. Izraz, izbran za ta članek (mekhanokemija), je sam po sebi le delno definiran v IUPAC Compendium of Chemical Terminology,¹ kjer je mehanokemijska reakcija opisana kot reakcija, »ki jo povzroči neposredna absorpcija mehanske energije«.

Ob širokem naboru materialov, opreme, metod in praks, vključenih v mehanokemijske procese, so poenotene definicije nujne za nadaljnji razvoj področja in same tehnike. Pobuda, ki je neposredno izšla iz dejavnosti COST akcije CA18112 in prispeva ravno v tem segmentu, se je uresničila leta 2024, ko je IUPAC podprl ustanovitev delovne skupine za »Terminologijo in simboliko mehanokemije«.³⁹

Projekt si prizadeva vzpostaviti enotnost v terminologiji in klasifikacijah, ki se uporabljajo v mehanokemiji, ter predlagati standardizirano terminologijo za neposredno komunikacijo znotraj znanstvene skupnosti in za spodbujanje širše uporabe mehanokemije, ne le v akademskem okolju, temveč tudi v raziskovalno-razvojnih dejavnostih in industriji. Srednjeročni cilj je zagotoviti objektivne smernice, ki temeljijo na soglasju mednarodne skupnosti za nadaljnji razvoj področja ter hkrati povečati njegovo prepoznavnost in verodostojnost pri različnih zainteresiranih skupinah.

Več informacij o IUPAC projektu Terminologija in simbolika mehanokemije je na voljo na spletni strani <https://iupac.org/project/2023-034-2-100/>.

Delovna skupina EuChemS za mehanokemijo

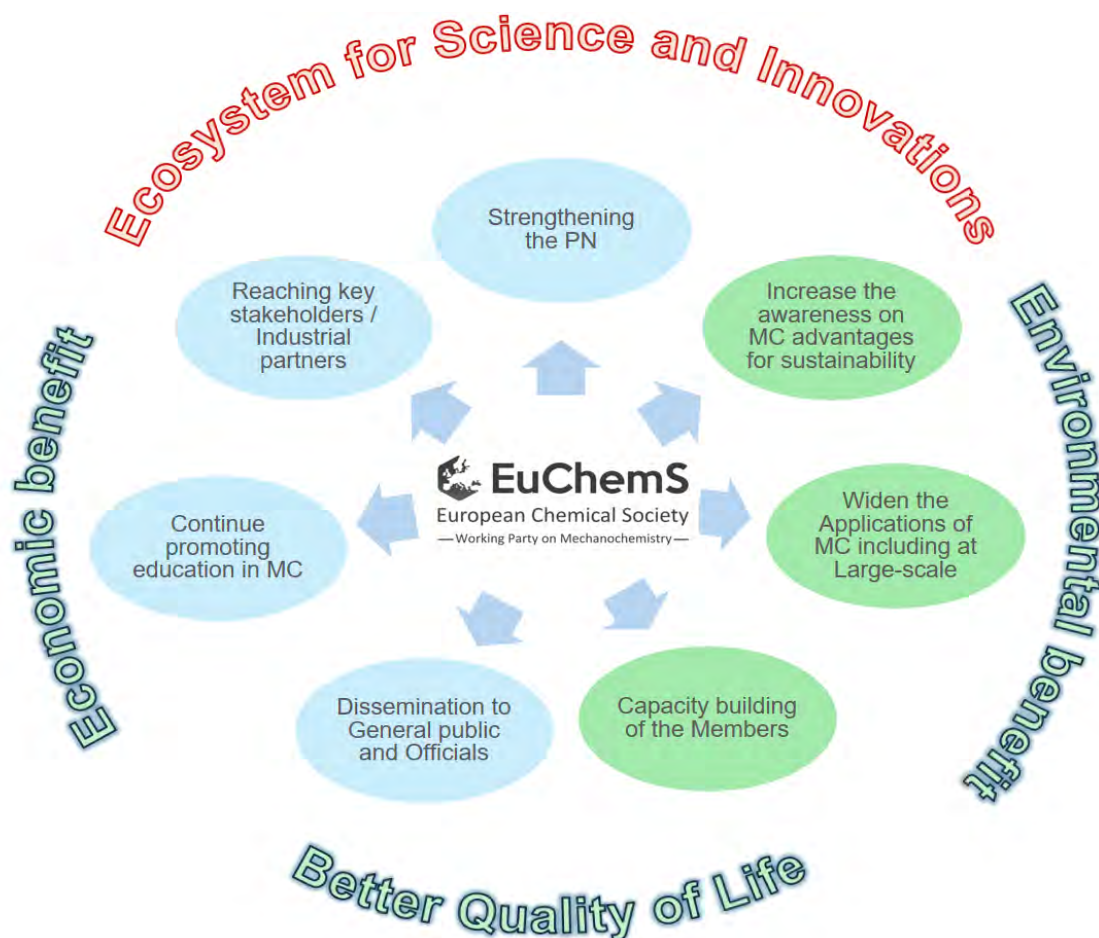
12. oktober 2023 je dan, ki predstavlja mejnik za mehanokemijo v Evropi in edinstveno pobudo na svetovni ravni; v Larnaki (Ciper) je bila v okviru Evropskega kemijskega združenja (EuChemS) ustanovljena Delovna skupina za mehanokemijo (Working Party on Mechanochemistry). Ta strokovna mreža (Professional Network, PN) predstavlja nadaljnjo implementacijo COST akcije CA18112 »Mechanochemistry for Sustainable Industry« in je bila ustanovljena na pobudo ter s podporo njenih nekdanjih članov.

Uradno je začela delovati leta 2024 in trenutno šteje že 38 članov, ki so predstavniki 26 nacionalnih kemijskih društev iz Evrope, s čimer je zagotovljena dobra geografska uravnoveženost. Člani razpolagajo z raznolikim strokovnim znanjem na različnih področjih uporabe mehanokemije. Število članov še naprej narašča, kar odraža vse večje zanimanje za ta inovativni pristop.¹⁴

Glavni cilj strokovne mreže za mehanokemijo v okviru EuChemS je vzpostaviti ekosistem za znanost in inovacije, ki bo povečal prepoznavnost in integracijo mehanokemije znotraj evropske znanstvene skupnosti in širše.

Med cilji si delovna skupina za mehanokemijo prizadeva naslednje (slika 4):

- i) uveljaviti se kot osrednja platforma za razpravo in izmenjavo znanja ter s tem poglobiti razumevanje pomena mehanokemije in njenih načel; to bo omogočilo zmanjševanje negativnih vplivov tradicionalne kemijske in energetske proizvodnje s prehodom



Slika 4. Delovna skupina EuChemS za mehanokemijo: cilji in naloge. Legenda: MC: mehanokemija, PN: strokovna mreža. Avtorica slike: Zara Cherkezova-Zheleva (Institute of Catalysis, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia).

na bolj trajnostne tehnologije ter prispevalo k uresničevanju 17 ciljev trajnostnega razvoja Združenih narodov;

- ii) zagovarjati uveljavljanje mehanokemije v temeljni in aplikativni kemiji ter sorodnih interdisciplinarnih področjih z njeno vključitvijo v akademske in raziskovalne ustanove, industrijo, strokovno prakso in izobraževalne programe;
- iii) spodbujati in podpirati nacionalna kemijska društva pri promociji pomena, vloge in razvoja mehanokemije v njihovih državah;
- iv) krepiti vlogo in verodostojnost mehanokemije v kemijskih znanostih z vključevanjem širše javnosti in oblikovalcev politike preko družbenih omrežij, tiska ter organizacije konferenc in delavnic, dostopnih širši javnosti;
- v) spodbujati sodelovanje in mreženje med nacionalnimi skupinami in sekcijami članic EuChemS ter z relevantnimi evropskimi in mednarodnimi organizacijami;
- vi) prepoznavati odličnost s tekmovanji in podelitvami nagrad.

Seznam ni dokončen, dodatne informacije bodo redno posodobljene na uradni spletni strani delovne skupine.⁴⁰

Sklepi

Za konec velja poudariti, da predstavljenih šest mejnikov so le izbor iz množice pobud, povezanih z mehanokemijo po vsem svetu, ki skupaj ustvarjajo živahno in dinamično raziskovalno kulturo: od konferenc, predavanj in serije spletnih seminarjev do mednarodnih projektov in ciljno usmerjenih industrijskih aplikacij. Mehanokemija je hitro razvijajoče se področje z ogromnim potencialom, da postane ključno orodje pri razogljčenju kemijskih procesov, saj omogoča postopke, ki v osnovi izključujejo uporabo škodljivih topil ali jo bistveno zmanjšujejo. Zahvala za uresničitev teh ciljev gre pripisati skupnemu prizadevanju tisočih znanstvenikov in drugih interesentov, ki prispevajo k razvoju mehanokemije.

Izjava o omejitvi odgovornosti

Stališča, izražena v tem članku, so stališča avtorjev.

Objava v reviji Open Research Europe ne pomeni odobritve ali podpore s strani Evropske komisije.

Avtorji so del projekta EU Horizon IMPACTIVE, enega izmed mejnikov, izpostavljenih v tem članku.

Izjava o razpoložljivosti podatkov

S tem člankom niso povezani nobeni podatki.

Vloga avtorjev:

Mirela Dragomir, Tadej Rojac: prevod v slovenščino, lektura; Sáenz de la Torre J. J.: zbiranje podatkov, metodologija, viri, validacija, vizualizacija, priprava prvotnega osnutka, pregled in lektura; Flamarique L.: viri, vizualizacija, pregled in lektura; Gomollon-Bel F.: zbiranje podatkov, metodologija, viri, vizualizacija, priprava prvotnega osnutka, pregled in lektura; Colacino E.: konceptualizacija, zbiranje podatkov, pridobivanje financiranja, raziskovanje, metodologija, vodenje projekta, viri, nadzor, validacija, vizualizacija, priprava prvotnega osnutka, pregled in lektura.

Konflikt Interesov:

Avtorji nimajo konfliktov interesov.

Zahvale:

Avtorji se zahvaljujejo predsedniku Mednarodne mehanokemijske zveze (IMA), prof. Vladimirju Šepeláku (Karlsruhe Institute of Technology, Nemčija) za njegov čas in pripravljenost, da je prispeval dragocene informacije za pripravo tega članka.

Financiranje:

Ta projekt je sofinanciran iz Okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije kot del COST akcije CA18112, *Mechanochemistry for Sustainable Industry*, podprte s strani združenja COST (European Cooperation in Science and Technology). Projekt je sofinanciran tudi iz raziskovalnega in inovacijskega programa Evropske unije Horizon Europe na podlagi pogodbe o dodelitvi sredstev št. 101057286 (*Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical ingredients [IMPACTIVE]*). Prevod v slovenščino je bil financiran v okviru programa P2-0105. Stališča in mnenja, izražena v besedilu, so izključno stališča avtorjev in nujno ne odražajo stališč Evropske unije ali Evropske izvajalske agencije za zdravje in digitalno področje. Ravno tako Evropska unija oziroma organ, ki dodeljuje sredstva, ne moreta biti odgovorna zanje.

Financerji niso sodelovali pri zasnovi študije, zbiranju in analizi podatkov, odločitvi o objavi ali pripravi rokopisa.

Additional note.

This content is an initiative of the European Chemical Society Professional Network (PN) on Mechanochemistry. The content is a translation in Slovenian of the ori-

ginal article (open letter) by:

Sáenz de la Torre J. J., 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 Slovenian was curated by Mirela Dragomir and Tadej Rojac, member delegates representing the Slovenian Chemical Society - Slovensko kemijsko društvo (SKD) within the PN on Mechanochemistry.

Author roles:

Mirela Dragomir and Tadej Rojac: Translation in Slovenian, Editing; Sáenz de la Torre J. J.: 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.

References

1. V. Gold, A. McNaught. The IUPAC Compendium of Chemical Terminology: The Gold Book (2025 ed.). International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). DOI:2010.1351/goldbook (accessed, 08 March 2026).
2. L. Takacs. Quicksilver from cinnabar: The first documented mechanochemical reaction? *JOM* **2000**, 52, 12–13. DOI: 10.1007/s11837-000-0106-0.
3. L. Takacs. The historical development of mechanochemistry. *Chem. Soc. Rev.* **2013**, 42, 7649–7659. DOI: 7610.1039/C7642CS35442J.
4. P. Sharma, C. Vetter, E. Ponnusamy, E. Colacino. Assessing the Greenness of Mechanochemical Processes with the DOZN 2.0 Tool. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2022**, 10, 5110–5116. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c07981.
5. For current TRL definitions in the European Union, please visit: Horizon Europe Work Programme 2023–2025 Annexes. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-2013-general-annexes_horizon-2023-2024_en.pdf (accessed, 08 March 2026).
6. For the seminal article indicating the link between mechanochemistry and the UN SDGs, please see reference 8.
7. For the first mention in the literature indicating the link between mechanochemistry and the European Green Deal

- objectives, please see: D. Virieux, F. Delogu, A. Porcheddu, F. Garcia, E. Colacino. Mechanochemical rearrangements. *J. Org. Chem.* **2021**, 86, 13885–13894. DOI: 13810.11021/acs.joc.13881c01323.
8. E. Colacino, V. Isoni, D. Crawford, F. Garcia. Upscaling mechanochemistry: Challenges and Perspectives. *Trends Chem.* **2021**, 3, 335–339. DOI: 310.1016/j.trechm.2021.1002.1008.
9. F. Gomollón-Bel. Mechanochemists Want to Shake up Industrial Chemistry. *ACS Cent. Sci.* **2022**, 8, 1474–1476. DOI: 1410.1021/acscentsci.1472c01273.
10. F. Gomollón-Bel. Mechanochemists Want to Shake up Industrial Chemistry. *Chem. Eng. News* **2022**, 100, 21–22. <https://cen.acs.org/synthesis/Mechanochemists-want-shake-industrial-chemistry/100/web/2022/2007> (accessed 08 March, 2026).
11. F. Gomollón-Bel, J. García-Martínez. Emerging chemistry technologies for a better world. *Nature Chem.* **2022**, 14, 113–114. DOI: 10.1038/s41557-021-00887-9.
12. European Commission (2022, October 1). Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical ingredients. IMPACTIVE Project - Fact Sheet - HORIZON. CORDIS, European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101057286>.
13. The expression was firstly used in: M. Lanzillotto, L. Konnert, F. Lamaty, J. Martinez, E. Colacino. Mechanochemical carbonyl-diimidazole mediated preparation of carbamates. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2015**, 3, 2882–2889. DOI: 2810.1021/acssuschemeng.2885b00819.
14. COST Programme. Action CA18112. <https://www.cost.eu/actions/CA18112> (accessed 08 March 2026).
15. For more information on COST Action CA18112 ‘Mechanochemistry for Sustainable Industry’ (MechSustInd): <https://www.mechsustind.eu/> (accessed 08 March, 2026).
16. M. Baláž, L. Vella-Zarb, J. Hernández, I. Halasz, D. E. Crawford, M. Krupička, V. André, A. Niidu, F. García, L. Maini, E. Colacino. Mechanochemistry: A disruptive innovation for the industry of the future. *Chem. Today* **2019**, 37, 32–34. https://www.teknoscienze.com/tks_article/mechanochemistry-a-disruptive-innovation-for-the-industry-of-the-future/.
17. J. Hernández, I. Halasz, D. E. Crawford, M. Krupička, M. Baláž, V. André, L. Vella-Zarb, A. Niidu, F. García, L. Maini, E. Colacino. European Research in Focus: Mechanochemistry for Sustainable Industry (COST Action MechSustInd). *Eur. J. Org. Chem.* **2020**, 8–9. DOI: 10.1002/ejoc.201901718.
18. X. Lim. Interlocking screws crank out pharmaceuticals. *Chem. Eng. News* **2020**, 98 (38), <https://cen.acs.org/pharmaceuticals/process-chemistry/Interlocking-screws-crank-pharmaceuticals/98/i38> (30 September, 2020).
19. COST Programme. Memorandum of Understanding (MoU) for the implementation of the COST Action “Mechanochemistry for Sustainable Industry” (MechSustInd) CA18112. https://e-services.cost.eu/files/domain_files/CA/Action_CA18112/mou/CA18112-e.pdf.
20. O. Galant, G. Cerfeda, A. S. McCalmont, S. L. James, A. Porcheddu, F. Delogu, D. E. Crawford, E. Colacino, S. Spatarì. Mechanochemistry can reduce life cycle environmental impacts of manufacturing active pharmaceutical ingredients. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2022**, 10, 1430–1439. DOI: 1410.1021/acssuschemeng.1431c06434.
21. For more information: *Beyond Benign*. About Partnerships—Beyond Benign. <https://www.beyondbenign.org/about-partnerships/> (accessed 08 March, 2026).
22. E. Colacino, G. Dayaker, A. Morère, T. Friščić. 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, 766–771. DOI: 710.1021/acs.jchemed.1028b00459.
23. *Introduction to Practical mechanochemistry: from soft to hard materials*; E. Colacino, G. Ennas, I. Halasz, A. Porcheddu, A. Scano, Eds.; De Gruyter (2021). DOI: DOI:10.1515/9783110608335.
24. *Mechanochemistry and Emerging Technologies for Sustainable Chemical Manufacturing*; Eds. E. Colacino, F. Garcia, CRC press, Taylor & Francis Group (2023). ISBN 9780367775018: <https://www.routledge.com/Mechanochemistry-and-Emerging-Technologies-for-Sustainable-Chemical-Manufacturing/Colacino-Garcia/p/book/9780367775018>.
25. EuChemS: European Young Chemists’ Network. <https://www.euchems.eu/divisions/european-young-chemists-network/> (accessed 08 March, 2026).
26. J. Biela, M. Stalla, L. Rabe, D. Machado, G. Evers, S. Ansems. *Impact Assessment Study on Innovation in COST Actions* (November 2024). <https://www.cost.eu/uploads/2025/01/COST-Impact-Assessment-Innovation-112024.pdf> (accessed 08 March, 2026).
27. J. De Merlier. (23 February, 2023). Is mechanochemistry set to disrupt chemical manufacturing? The Venturi Tribe. <https://www.venturi-tribe.com/is-mechanochemistry-set-to-disrupt-chemical-manufacturing/> (accessed 08 March, 2026).
28. C. Sansom. Solvents and sustainability. *Chemistry World* <https://www.chemistryworld.com/features/solvents-and-sustainability/3008751.article> (13 April, 2018)
29. C. J. Clarke, W.-C. Tu, O. Levers, A. Bröhl, J. P. Hallett. Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes. *Chem. Rev.* **2018**, 118, 747–800. DOI: 710.1021/acs.chemrev.1027b00571.
30. J. Krenz, N. Simcox, J. Stoddard, C. D. Simpson. Transitioning to Safer Chemicals in Academic Research Laboratories: Lessons Learned at the University of Washington. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2016**, 4, 4021–4028. DOI: 4010.1021/acssuschemeng.4026b00926.
31. T. Friščić, S. L. Childs, S. A. A. Rizvi, W. Jones. The role of solvent in mechanochemical and sonochemical cocrystal formation: a solubility-based approach for predicting cocrystallisation outcome. *CrystEngComm* **2009**, 11, 418–426. DOI: 410.1039/B815174A.
32. *Ball Milling Towards Green Synthesis: Applications, Projects, Challenges*. B. Ranu, A. Stolle, Eds.; Royal Society of

- Chemistry (2014). DOI:10.1039/9781782621980.
33. N. Fantozzi, J.-N. Volle, A. Porcheddu, D. Virieux, F. García, E. Colacino. Green metrics in mechanochemistry. *Chem. Soc. Rev.* **2023**, 52, 6680–6714.
DOI: 6610.1039/D6682CS00997H.
34. D. E. Crawford, A. Porcheddu, A. S. McCalmont, F. Delogu, S. L. James, E. Colacino. Solvent-Free, Continuous Synthesis of Hydrazone-Based Active Pharmaceutical Ingredients by Twin-Screw Extrusion. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2020**, 8, 12230–12238.
DOI: 12210.11021/acssuschemeng.12230c03816.
35. J. H. Clark, A. Hunt, C. Topi, G. Paggiola, J. Sherwood. *Sustainable Solvents: Perspectives from Research, Business and International Policy*; The Royal Society of Chemistry (2017).
DOI:10.1039/9781782624035.
36. R. Mullin. COVID-19 is reshaping the pharmaceutical supply chain. *Chem. Eng. News* **2020**, 98 (16), <https://cen.acs.org/business/outsourcing/COVID-19-reshaping-pharmaceutical-supply/98/i16> (accessed 08 March, 2026).
37. European Commission. (2021, May 5). *First in-depth review of strategic areas of Europe's interests*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy/depth-reviews-strategic-areas-europes-interests_en (accessed, 08 March, 2026).
38. F. Gomollón-Bel. 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, 12–17.
DOI: 10.1515/ci-2019-0203.
39. *Terminology and Symbolism for Mechanochemistry*, *Chem. Int.* **2024**, 46 (2), 34–34.
DOI: 10.1515/ci-2024-0220. (accessed 08 March, 2026)
40. <https://www.euchems.eu/divisions/working-party-on-mechanochemistry/>