



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 Montenegrin language 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 **Montenegrin language** was curated by **Milica Kosović Perutović**, member delegate representing the **Chemical Society of Montenegro** within the PN on Mechanochemistry.

# Mehanohemija u Evropi: odakle dolazimo i gdje smo danas

Milica Kosović Perutović,<sup>1</sup> Sáenz de la Torre Juan José,<sup>2</sup>  
Flamarique Leyre,<sup>2</sup> Gomollon-Bel Fernando<sup>2,\*</sup> and Colacino  
Evelina<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Metallurgy and Technology, University of Montenegro

<sup>2</sup> Agata Communications, Santander, Spain

<sup>3</sup> ICGM, Univ. Montpellier, CNRS, ENSCM, Montpellier, France

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

**Author roles:** Milica Kosović Perutović: Translation in Montenegrin language, 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.



European Chemical Society

—Working Party on Mechanochemistry—

#### 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.

#### Apstrakt.

---

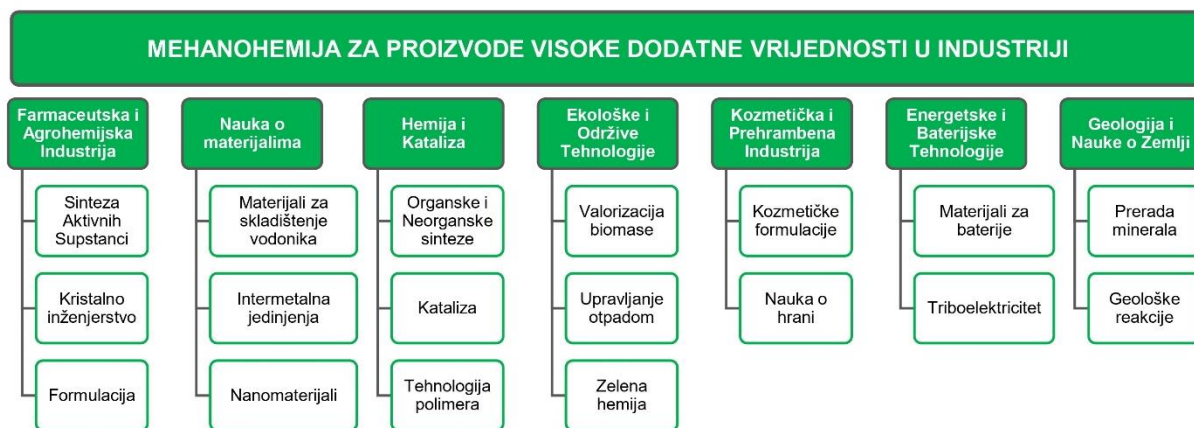
Mehanohemija je stara nekoliko hiljada godina, ali je dugo vremena bila zapostavljena u odnosu na hemiju zasnovanu na rastvorima, a njene metode koje se odvijaju bez upotrebe rastvarača (ili uz njihovu minimalnu upotrebu) su tek nedavno prepoznate kao ključne tehnologije za unapređenje zelene i održive hemije, nudeći tako alternativu tradicionalnim hemijskim

procesima. Uspješno primijenjena u metalurškoj industriji, mehaničko legiranje otvorilo je put primjeni mehanohemije i u drugim industrijskim sektorima (npr. u tretmanu otpada i dekontaminaciji zemljišta), uz potencijalne primjene između ostalog i u pripremi farmaceutskih proizvoda, transformaciji biomase, reciklaži i degradaciji polimera. U cjelini, čini se da mehanohemija pruža zanimljiv pravac ka dekarbonizaciji hemijske industrije. Pod zajedničkim naporima naučnika okupljenih u okviru Međunarodnog mehanohemijskog udruženja (International Mechanochemical Association – IMA) razvijene su brojne inicijative: pokretanje COST akcije CA18112 MechSustInd i izgradnja saradničkih mreža omogućili su finansiranje EU Horizon projekta IMPACTIVE, osnivanje Radne grupe EuChemS za mehanohemiju, organizaciju Round Robin projekta posvećenog mehanohemijskim transformacijama, kao i odobravanje IUPAC projekta koji se bavi terminologijom i simbolima. Sve ove inicijative aktivno promovišu mehanohemiju, rješavanjem izazova u ovoj oblasti i jačanjem saradnje širom akademske zajednice i industrije. Ove inicijative pozicioniraju Evropu u sam vrh mehanohemijskih inovacija, unapređujući ekološki prihvatljive hemijske procese, uz istovremeno podsticanje razvoja standardizovane terminologije i industrijskih primjena.

**Ključne riječi.** Mehanohemija, Zelena Hemija, Održivost, Evropski zeleni plan, metode bez rastvarača, ekološki prihvatljivi procesi, politika i regulativa, standardizacija

Mehanohemija je nauka o stvaranju i raskidanju hemijskih veza putem *"direktne apsorpcije mehaničke energije"*<sup>1</sup>, pri čemu su transformacije pokrenute mehaničkim silama koje se ostvaruju putem udara, smicanja, kompresije ili zatezanja. Upotreba mehaničkih sila za podsticanje hemijskih transformacija zabilježena je u odlomku antičkog djela *'De Lapidibus (O kamenu)* Teofrasta iz Eresa (IV vijek p.n.e.), koji je do sada najstariji pronađeni zapis o hemijskim naukama. U njemu se opisuje dobijanje metalne žive trljanjem i drobljenjem njenog minerala, cinabarita, u bakarnom avanu uz pomoć tučka od istog materijala<sup>2,3</sup>.

Iako je tokom vremena hemija zasnovana na rastvorima postala industrijski standard, u posljednjim decenijama broj publikacija iz oblasti mehanohemije značajno je porastao, sa primjenama u više oblasti (Slika 1), ali uz različit stepen tehnološke zrelosti, zavisno od industrijskog sektora u kojem se mehanohemijski procesi primjenjuju<sup>4</sup>. Definisano prema nivoima tehnološke spremnosti (Technology Readiness Levels, TRL)<sup>5</sup>, najviši nivo, TRL 9, dostignut je u oblasti energetike i čvrstih materijala (npr. metalurgija i upravljanje otpadom su samo neke od njih), za koje je mehanohemija konkurentan proizvodni proces.



**Slika 1.** Primjene mehanohemijskih procesa - *Figure credit:* Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).

U kontekstu u kojem globalno raste potražnja za održivim reakcionim uslovima i čistijim procesima, mehanohemija je 2019. godine prepoznata od strane IUPAC-a kao jedna od *'nastajućih tehnologija za unapređenje održivosti naše planete'*<sup>6</sup>, a 2021. godine kao snažan alat za postizanje Ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih nacija (UN SDGs)<sup>7</sup> i ciljeva Evropskog zelenog plana (European Green Deal)<sup>8</sup>. Usklađena sa 12 principa zelene hemije i zelenog inženjerstva, koji su klasifikovani prema značaju za skaliranje mehanohemijskih procesa<sup>9</sup>, mehanohemija predstavlja revolucionaran pristup<sup>10-12</sup> sposoban da podstakne zelenu tranziciju i održivost, sa potencijalom da doprinese dekarbonizaciji i smanjenju uticaja hemijske industrije na životnu sredinu<sup>10,12</sup>.

Širom Evrope postoji niz inicijativa koje su, počevši od EU programa COST akcije CA18112 'Mehanohemija za održivu industriju' (MechSustInd), doprinijele isticanju potencijala mehanohemije, pri čemu svaka pokriva različite aspekte ove

oblasti. Neke od njih, poput projekta Horizon Europe IMPACTIVE, podstiču primjenu ove tehnologije u konkretnim industrijskim sektorima, kao što je farmaceutska industrija<sup>13</sup>, IUPAC Radna grupa ‘Terminology and Symbols for Mechanochemistry’ i EuChemS Profesionalna mreža (PN) za mehanohemiju djeluju transverzalno, obuhvatajući i privatni i javni sektor, dok se Round Robin projekat fokusira na specifična pitanja fundamentalnog istraživanja. Ovakav pristup stvara uslove za međusobno prožimanje istraživačkih pravaca, sa ciljem uspostavljanja opšteprihvaćenih naučnih standarda i smjernica za ovu oblast. U cjelini, ovaj skup inicijativa, koje uključuju članove IMA i, samim tim, akademsku zajednicu, dovodi Evropu u jedinstvenu poziciju za inovacije u mehanohemiji, podstičući ekološki prihvatljiviji i održiviji način izvođenja hemijskih procesa i doprinoseći promjeni pristupa u pravcu ‘*novog načina razmišljanja o hemiji*’<sup>14</sup>. U narednim pasusima, uz poseban osvrt na osnovnu ulogu IMA, biće hronološki opisane različite evropske inicijative koje se bave mehanohemijom.

## Međunarodna Mehanohemijska Asocijacija (International Mechanochemical Association, IMA).

---

Međunarodna Mehanohemijska Asocijacija (IMA) predstavlja prvu međunarodnu zajednicu formiranu oko mehanohemije. Udruženje je osnovano 1988. godine u Tatranskoj Lomnici (današnja Slovačka), sa predstavnicima iz Japana, bivšeg SSSR-a i Čehoslovačke.



Trenutno, udruženje broji 120 članova raspoređenih u 31 državi na 4 kontinenta. Tokom godina, IMA je izgradila kako geografske, tako i naučne mostove, objedinjujući ekspertizu naučnika, pionira u ovoj oblasti, doprinoseći produbljenom razumijevanju mehanohemijskih procesa primijenjenih na čvrste materijale i legiranje. To je rezultiralo brojnim saradnjama i inicijativama i otvorilo put za dalji razvoj oblasti, što je dovelo i do šire primjene mehanohemijskih metoda u drugim oblastima hemije i procesnog inženjeringa.

Još jedan snažan stub djelovanja IMA jeste njen fokus na mlade naučnike, kroz njihovo obrazovanje i obuku u oblasti mehanohemijskih metodologija, a njena ključna inicijativa u tom pogledu je INCOME – Međunarodna konferencija o mehanohemiji i mehaničkom legiranju, koja se održava svake treće godine. Prvo izdanje konferencije INCOME održano je 1993. godine u Košicama (Slovačka). Od tada je održano deset izdanja konferencije, koja je tokom godina rasla kako po broju učesnika, tako i po svom uticaju. Jedanaesta INCOME konferencija je održana 2025. godine u Berlin-Adlershofu (Njemačka), okupljajući stotine istraživača iz oblasti mehanohemije iz cijelog svijeta.

Više informacija o IMA dostupno je na [inamechanochemical.com](http://inamechanochemical.com)

## **MechSustInd: COST Akcija usmjerena na mehanohemiju.**

---

Različiti pravci mehanohemije nedavno su objedinjeni u okviru evropskog programa COST, kroz akciju CA18112 'Mehanohemija za



održivu industriju' (MechSustInd), koja je realizovana u periodu od 2019. do 2023. godine<sup>15-18</sup>. Čak i nakon njenog formalnog završetka, ključni uspjesi, inovativni pristupi i koncepti proistekli iz COST akcije CA18112 nastavljaju da se dalje razvijaju i šire, istovremeno inspirišući slične inicijative širom svijeta.

Usmjerena ka promovisanju [Evropske saradnje u oblasti nauke i tehnologije](#), COST akcija bila je posvećena uspostavljanju primjenjivih procesa, usklađivanju nomenklature i smjernica, standardizaciji terminologije i protokola (u cilju odgovora na industrijske zahtjeve), olakšavanju razmjene znanja, osposobljavanju istraživača i mladih naučnika neophodnim vještinama za uvođenje održivih praksi zasnovanih na mehaničkoj aktivaciji u svakodnevne istraživačke aktivnosti, kao i unapređenju saradnje između industrijskih partnera i akademskih istraživača, uz podizanje svijesti o prednostima integracije mehanohemije u hemijske procese, kako u fazi istraživanja i razvoja (R&D), tako i na proizvodnom nivou.

Kroz brojne inicijative umrežavanja i naučne aktivnosti organizovane tokom cijelog trajanja, COST akcija je uskladila fundamentalna i primijenjena istraživanja sa tehnološkim inovacijama i industrijskim potrebama u mehanohemiji, ostvarujući dugoročne ciljeve povezane sa razvojem zelene ekonomije za održivu proizvodnju, uključujući i fine hemikalije i farmaceutski relevantne molekule<sup>19</sup>.

MechSustInd akcija je uspostavila multidisciplinarnu mrežu (koja prevazilazi evropske granice) naučnika, inženjera, preduzetnika i investitora, čija ekspertiza obuhvata različite oblasti mehanohemije, raspoređenih u tri različite radne grupe<sup>20</sup>. Ove grupe su se bavile mehanohemijskim sintezama, kako na laboratorijskom nivou (WG1), tako i u fazi skaliranja (WG3), kroz procjenu tehnologije, uz istovremeno istraživanje mehanizama reakcije u okviru radne grupe WG2, kao i kvantitativnu procjenu ovih procesa u pogledu njihovih prednosti u odnosu na postojeće metode zasnovane na rastvorima. Na osnovu principa zelene hemije, kao i kroz jedinstvene studije i metode za procjenu životnog ciklusa (Life Cycle Assessment, LCA) i tehnokoekonomske analize (Techno-Economic Analysis, TEA), primijenjene na studiju slučaja mehanohemijske sinteze lijeka sa liste esencijalnih lijekova Svjetske zdravstvene organizacije (WHO)<sup>21</sup>, COST akcija imala je jasan cilj da približi mehanohemiju industrijskoj primjeni.

Inicijativa je okupljala 150 članova, naučnika aktivnih kako u javnom tako i u privatnom sektoru, koji djeluju u 46 zemalja učesnica (od kojih je 38 u Evropi), uključujući i naučnike izvan geografskih granica Evrope, među kojima su i članovi iz Kanade, Kine, Japana, Meksika, Rusije, Singapura, Južne Afrike, Južne Koreje i Sjedinjenih Američkih Država (Slika 2).



**Slika 2.** Geografski položaj članica CA18112 projekta izvan Evrope - *Figure credit: Evelina Colacino (Université de Montpellier, ICGM, France).*

Uprkos poremećaju izazvanom globalnom pandemijom, MechSustInd je postigla visok nivo uspjeha i u podsticanju integracije mehanohemije u obrazovne aktivnosti i akademske kurikule, odgovarajući na potrebe EU za 'novim vještinama' za 'nove profesije' u oblasti zelene hemije, za mlade generacije naučnika.

Ovaj do sada nezabilježen doprinos ovoj oblasti ostvaren je kroz organizaciju pet međunarodnih škola širom Evrope, sa predavačima iz akademske zajednice i industrije, kroz integraciju komplementarnih ekspertiza različitih učesnika, obuhvatanjem ključnih tema, uključujući: i) mehanohemijsku organsku sintezu i kinetiku (u Italiji), ii) skaliranje mehanohemijskih reakcija (u Njemačkoj), iii) *ex-situ* i *in situ* analize mehanohemijskih reakcija (u Hrvatskoj i putem web-prenosa sa Malte) i iv) strukturnu karakterizaciju supramolekularnih i kovalentnih jedinjenja (putem web-prenosa iz Portugala).

Inovativna primjena mehanohemije u nastavi imala je izuzetan međunarodni doseg, prevazilazeći geografske granice Evrope. Naime, MechSustInd akcija je povezala mehanohemiju sa obrazovanjem u oblasti zelene hemije: i) uspostavljanjem strateškog partnerstva sa međunarodno priznatim udruženjima (npr. Beyond Benign, SAD)<sup>22</sup>, koje podstiču obrazovanje u oblasti zelene hemije i održivosti, ii) objavljivanjem prvog edukativnog članka o mehanohemiji<sup>23</sup> i iii) publikovanjem dvije edukativne knjige na istu temu<sup>24,25</sup>.

Pandemija je pretvorena u priliku: od 2020. godine i tokom cijelog perioda zatvaranja, organizovan je serijal webinaru koji se održavao svake druge sedmice pod nazivom '*Get together during COVID*', u okviru kojeg je održan 31 webinar sa učešćem 53 predavača iz Evrope i svijeta. Ovaj jedinstveni pristup omogućio je međusobno prožimanje ekspertiza, očuvao snažne veze među članovima i unaprijedio ciljeve izgradnje zajednice.

Strateške veze/partnerstva, mogle su biti uspostavljene sa tijelima nadležnim za donošenje odluka u okviru nacionalnih i evropskih hemijskih društava i hemijskih asocijacija širom Evrope. Posebno su razvijene snažne veze sa: i) drugim COST akcijama (npr. CA18224 Greenering i CA19122 EUGAIN), ii) Međunarodnim mehanohemijskim udruženjem (IMA) radi podsticanja interakcije između naučnika koji su pioniri u oblasti mehanohemije i 'novih istraživača' koji primjenjuju mehanohemiju u oblastima koje još nisu istražene, iii) ključnim akterima i

agencijama za standardizaciju i iv) EuChemS Profesionalnom mrežom za mlade hemičare<sup>26</sup>.

Značajno je da je MechSustInd, u saradnji sa EYCN-om, uvela prvo izdanje međunarodne nagrade za perspektivnog mladog naučnika aktivnog u oblasti mehanohemije, kojom se kroz takmičarski proces prepoznaje izvrsnost.

Revolucionarni koncepti, uticajni naučni pravci istraživanja (što potvrđuje više od 100 naučnih rezultata, saopštenja za javnost, uredničkih članaka, specijalnih izdanja i dr.) i uspješne aktivnosti koje su proizašle iz COST akcije CA18112 i dalje su u razvoju, nastavljajući da napreduju i nakon njenog završetka, prevazilazeći geografske granice Evrope. Nerealno bi bilo sve ih ovdje sažeti u nekoliko redova. U ovom radu opisani su samo neki od njih, kao doprinos daljem razvoju oblasti mehanohemije.

U nedavnoj studiji o procjeni uticaja COST akcija<sup>27</sup>, CA18112 je istaknuta kao 'studija slučaja' za inovacije, na osnovu kriterijuma koji su ocjenjivali njenu strukturu i realizaciju, kao i spektar kreativnih rezultata koje je generisala, uključujući poslovne modele, nove proizvode (kao što su patentni) i obrazovne formate, dok je istovremeno unaprijedila komunikaciju sa donosiocima odluka, ključnim akterima i širom javnošću. Ovo je posebno značajno imajući u vidu poremećaje izazvane pandemijom Covid-19, koja je značajno uticala na realizaciju aktivnosti za koje su saradnje i eksperimentalne aktivnosti bile neophodne.

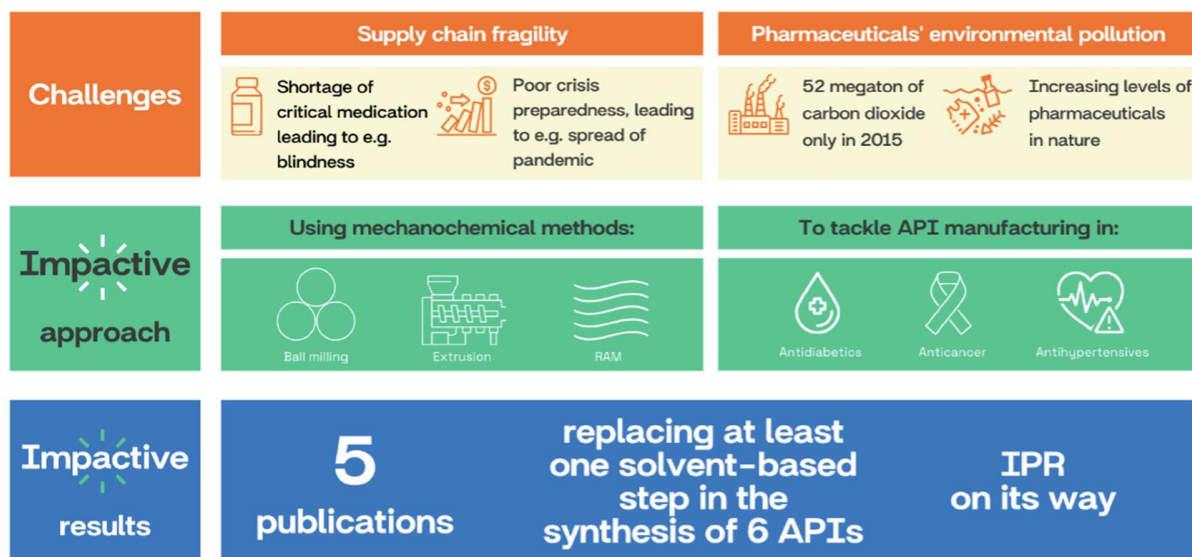
Više informacija može se pronaći na [mechsustind.eu/](https://mechsustind.eu/)

## **IMPACTIVE: Horizont Evropa (Horizon Europe) projekat usmjeren na primjenu mehanohemije u farmaceutskoj industriji.**

---

Projekat IMPACTIVE (Innovative Mechanochemical Processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical Ingredients), financiran u okviru programa Horizon Europe, fokusira se na primjenu mehanohemijskih metoda i procesa u proizvodnji aktivnih farmaceutskih supstanci (API)<sup>13</sup>. Cilj projekta je da obezbijedi dokaz koncepta na maloj pilot-skali za primjenu šaržne (batch) i/ili kontinuirane protočne (continuous flow) mehanohemije u sintezi šest API supstanci iz četiri različite porodice jedinjenja (Slika 3). Četvorogodišnji projekat započeo je u oktobru 2022. godine i okuplja 17 partnera koji djeluju u 11 evropskih zemalja. Konzorcijum obuhvata univerzitete i istraživačke institucije, mala i srednja preduzeća (SME), kao i dva vodeća aktera u farmaceutskoj industriji (kao što su Novartis i Merck). Članovi konzorcijuma posjeduju raznovrsne i komplementarne ekspertize koje obuhvataju istraživanje, razvoj, proizvodnju i eksploataciju rezultata.





**Slika 3.** Sažetak i ciljevi projekta IMPACTIVE - *Figure credit:* Agata Communication Agency (Santander, Spain).

Prepreke u primjeni mehanohemije u proizvodnji aktivnih farmaceutskih supstanci (API) nijesu uvijek tehničke prirode. Među rukovodiocima istraživanja i razvoja (R&D) u hemijskim i inženjerskim oblastima, mehanohemija je i dalje u velikoj mjeri nepoznata<sup>28</sup>, što usporava njenu primjenu u komercijalne svrhe. Barijere i prednosti industrijske mehanohemije, uključujući i aspekte održivog finansiranja, već su ranije istaknute<sup>9</sup>. Međutim, mehanohemija pruža tri glavne prednosti koje vrijedi dalje razmotriti:

1. U hemijskim procesima, rastvarači čine do 90% ukupne mase reaktanata<sup>29</sup>, a većina rastvarača koji se koriste u hemijskim reakcijama i proizvodnim procesima daleko je od ekološki prihvatljivih<sup>30,31</sup>. Stoga, potpuno uklanjanje rastvarača ili njihova upotreba u minimalnoj količini (kao kod procesa Liquid-



Assisted Grinding, LAG)<sup>32</sup> vodi ka zelenijim sintezama<sup>33</sup>, sa poboljšanim pokazateljima zelene hemije i uticajem na životnu sredinu<sup>34</sup>. U proizvodnji API, ove prednosti imaju presudan značaj. Na primjeru jedne ‘studije slučaja’, pokazatelji kao što su ekotoksičnost i emisija CO<sub>2</sub> mogli su se smanjiti i do 85%<sup>19,35</sup>.

2. Pri radu na industrijskom nivou, zagrijavanje i hlađenje velikih masa nije trivijalno pitanje i uključuju dodatne troškove<sup>36</sup>. Budući da mehanohemijske metode funkcionišu na nižim temperaturama, operativni troškovi proizvodnje API mogu biti smanjeni. Ponovo, na primjeru jedne ‘studije slučaja’, proizvodni troškovi su smanjeni za 12%<sup>21</sup>.

3. Kako je zabilježeno i u medijima<sup>37</sup> i od strane Evropske komisije<sup>38</sup>, lanci snabdijevanja postali su podložni poremećajima i nestašicama. Strogi propisi usvojeni radi postizanja ciljeva Evropskog zelenog plana, naveli su proizvođače API da premjeste proizvodnju na druge lokacije, što je dovelo do zavisnosti farmaceutske industrije EU od inostranih lanaca snabdijevanja. Razvojem održivijih i bezbjednijih procesa za hemijsku i farmaceutsku industriju, mehanohemija može doprinijeti povratku proizvodnje u EU (Slika 3), uz poštovanje najviših ekoloških standarda koji se primjenjuju u Evropi, kao i uz prepoznavanje ove održive tehnologije<sup>6</sup> od strane zdravstvenih vlasti, regulatornih tijela i donosilaca politika.

Više informacija o IMPACTIVE projektu može se pronaći na <https://mechanochemistry.eu/>

## **Round Robin projekat u oblasti mehanohemije.**

---

Zvanično započet 2024. godine, Round Robin projekat okuplja 36 učesnika iz 25 istraživačkih institucija. Većina laboratorija koje učestvuju u projektu su iz Evrope, a nekoliko glavnih istraživača je takođe učestvovalo u COST akciji CA18112. Projekat predstavlja zajedničke istraživačke napore naučnika usmjerene na proučavanje reproduktivnosti mehanohemijskih reakcija i njihovoj standardizaciji, kroz identifikovanje mehanohemijskih varijabli i uslova koji omogućavaju kontrolu reakcije. Cilj projekta je da se pokaže da je mehanohemija reproduktivna, pod uslovom da se uzmu u obzir stacionarna stanja, bez obzira na korišćenu opremu i osobu koja izvodi eksperiment. Projekat se fokusira na ispitivanje tri hemijske reakcije, jednog procesa formiranja ko-kristala i jedne polimorfne transformacije, raspoređenih među različitim istraživačkim grupama, u cilju testiranja validnosti protokola i verifikacije nekoliko osnovnih radnih hipoteza.

## **IUPAC radna grupa za terminologiju i simboliku u mehanohemiji.**

---

[Međunarodna unija za čistu i primijenjenu hemiju](#) (IUPAC) je 2019. godine svrstala mehanohemijske procese među deset tehnologija u nastajanju koje kontinuirano doprinose unapređenju održivosti planete<sup>6</sup>.

Iako mehanohemija ima duboke istorijske korijene<sup>2,3</sup>, i dalje joj nedostaje detaljna i standardizovana terminologija: tribohemija, mehaničko legiranje, mehanohemija... Svi ovi nazivi odnose se na primjenu mehanohemijske sile u cilju izazivanja hemijskih reakcija. Sam termin odabran za ovaj rad (mehanohemija) sam po sebi je slabo definisan u *IUPAC Kompendijumu hemijske terminologije*<sup>1</sup>, gdje se mehanohemijska reakcija opisuje kao reakcija 'izazvana direktnom apsorpcijom mehaničke energije'.

U kombinaciji sa širokim spektrom materijala, opreme, metoda i praksi uključenih u mehanohemijske procese, usaglašene definicije predstavljaju neophodnost, kako bi se popunila praznina u pogledu standardizacije i jasnoće terminologije i simbolike u mehanohemiji. Inicijativa koja je direktno proizašla iz aktivnosti COST akcije CA18112, a koja doprinosi prevazilaženju ovog nedostatka i predstavlja korak naprijed ka rastućem priznanju ove oblasti, pokrenuta je 2024. godine, uz podršku IUPAC-a, kroz osnivanje Radne grupe za 'Terminologiju i simboliku u mehanohemiji'<sup>39</sup>. Cilj projekta je uspostavljanje ujednačenosti u terminologiji i klasifikacijama koje se koriste u mehanohemiji, kroz predlaganje standardizovane simbolike i terminologije radi olakšavanja komunikacije unutar mehanohemijske zajednice, kao i podsticanja šire primjene mehanohemije, ne samo u akademskom okruženju, već i u istraživačko-razvojnim (R&D) aktivnostima, kao i u industrijskoj proizvodnji. Srednjoročni cilj projekta je obezbjeđivanje objektivnih smjernica zasnovanih na konsenzusu međunarodne zajednice, radi daljeg unapređenja ove oblasti, uz istovremeno

povećanje njene vidljivosti i kredibiliteta prema različitim zainteresovanim stranama.

Više informacija o IUPAC projektu: Terminology and Symbolism for Mechanochemistry može se pronaći na: [iupac.org/project/2023-034-2-100](https://iupac.org/project/2023-034-2-100).

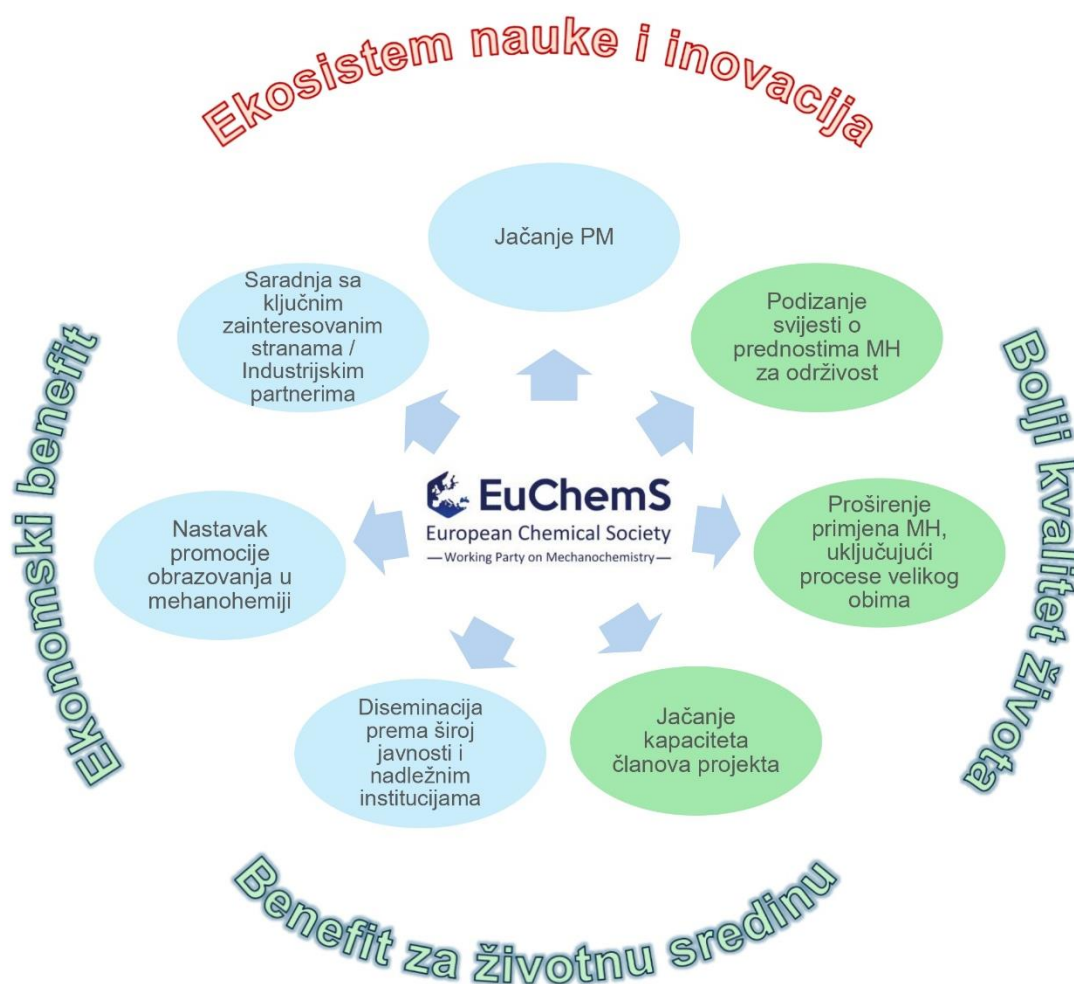
## Radna grupa EuChemS-a za mehanohemiju

---

Prekretnicu za mehanohemiju u Evropi, kao i jedinstvenu inicijativu na globalnom nivou, predstavlja 12. oktobar 2023. godine, kada je u Larnaki (Kipar) osnovana "Radna grupa za mehanohemiju" Evropskog hemijskog društva (EuChemS). Ova profesionalna mreža predstavlja dalju implementaciju COST akcije CA18112 'Mehanohemija za održivu industriju' i formirana je na osnovu snažne volje njenih bivših članova. Zvanično pokrenuta 2024. godine, Radna grupa već broji 32 člana delegirana od strane 22 nacionalna hemijska društva širom Evrope, uz dobru geografsku uravnoteženost. Njeni članovi posjeduju raznovrsnu ekspertizu u različitim oblastima primjene mehanohemije. Broj članova nastavlja da raste, što odražava sve veće interesovanje za ovaj inovativni pristup *"drugачijem razmišljanju o hemiji"*<sup>14</sup>.

Glavni cilj novoosnovane Profesionalne mreže za mehanohemiju u okviru EuChemS-a jeste da služi kao ekosistem za nauku i inovacije, s ciljem unapređenja vidljivosti i integracije ove oblasti unutar evropske naučne zajednice i šire.

Među ciljevima (Slika 4), Radna grupa za mehanohemiju nastoji da: i) se uspostavi kao primarna platforma za diskusiju i razmjenu znanja, čime se unapređuju razumijevanje i značaj mehanohemije i njenih principa, što omogućava smanjenje negativnih uticaja tradicionalne hemijske i energetske proizvodnje kroz prelazak na održivije tehnologije i doprinos ostvarivanju 17 Ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih nacija; ii) promoviše široku primjenu mehanohemije u fundamentalnoj i primijenjenoj hemiji, kao i u srodnim interdisciplinarnim oblastima, kroz njenu integraciju u akademske i istraživačke institucije, industriju, profesionalnu praksu i obrazovne programe; iii) podstiče i pruža podršku nacionalnim hemijskim društvima u promovisanju značaja, uloge i razvoja mehanohemije u okviru njihovih država; iv) jača ulogu i kredibilitet mehanohemije unutar hemijskih nauka uključivanjem šire javnosti i donosilaca odluka putem društvenih mreža, biltena, kao i organizacijom konferencija i radionica dostupnih društvu i ključnim zainteresovanim stranama; v) podstiče saradnju i umrežavanje između nacionalnih grupa i sekcija društava članica EuChemS-a koje djeluju u oblasti hemije i šire, kao i sa relevantnim evropskim i međunarodnim organizacijama; i vi) prepoznaje izvrsnost kroz takmičenja i dodjelu nagrada.



**Slika 4.** Radna grupa EuChemS-a za mehanohemiju: ciljevi i zadaci. *Legenda:* MH-mechanochemija, PM-profesionalna mreža. *Figure credit :* Zara Cherkezova-Zheleva (Institute of Catalysis, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia).

Navedeni ciljevi ne predstavljaju potpunu listu jer je spisak neisrcpan, dodatne informacije će se redovno ažurirati putem zvanične veb-stranice<sup>40</sup>.

## Zaključak

---

Zaključno, ovih šest prekretnica predstavljaju samo mali izbor od velikog broja inicijativa vezanih za mehanohemiju širom svijeta, koje stvaraju dinamičnu kulturu unutar ove oblasti: od konferencija, predavanja, serija webinarâ, međunarodnih grantova do ciljanih primjena u industriji. Mehanohemija je oblast koja se snažno razvija i ima potencijal da postane ključni alat u dekarbonizaciji hemijskih procesa, omogućavajući sprovođenje tehnologija koje izbjegavaju ili značajno smanjuju upotrebu štetnih rastvarača, ali i šire od toga. Ostvarenje ovog cilja biće moguće zahvaljujući zajedničkom radu hiljada naučnika i zainteresovanih aktera koji aktivno doprinose daljem razvoju mehanohemije.

## Odricanje od odgovornosti

---

Stavovi i mišljenja izražena u ovom radu pripadaju isključivo autoru(ima). Objavljivanje u časopisu Open Research Europe ne odražava nužno i stavove Evropske komisije.

Autori su učesnici EU Horizon projekta IMPACTIVE, jedne od ključnih inicijativa istaknutih u ovom članku.

## Izjava o dostupnosti podataka

---

Nema podataka povezanih sa ovim člankom.



## ZAHVALNICA

---

Autori izražavaju zahvalnost predsjedniku International Mechanochemical Association-e (IMA), prof. dr Vladimir Šepeláku (Karlsruhe Institute of Technology, Njemačka), na izdvojenom vremenu i spremnosti da pruži vrijedne informacije za potrebe ovog rada.

## REFERENCES

---

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). [Reference Source](#)
2. Takacs L: Quicksilver from cinnabar: the first documented mechanochemical reaction? *JOM*. 2000; **52**: 12–13. [Publisher Full Text](#)
3. Takacs L: The historical development of mechanochemistry. *Chem Soc Rev*. 2013; **42**(18): 7649–7659. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
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. [Publisher Full Text](#)
5. For current TRL definitions in the European Union, please visit: Horizon Europe Work Programme 2023–2025 Annexes. (accessed, 02 March 2025). [Reference Source](#)

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. [Publisher Full Text](#)
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. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
9. Colacino E, Isoni V, Crawford D, *et al.*: Upscaling mechanochemistry: challenges and perspectives. *Trends Chem.* 2021; **3**: 335–339.
10. Gomollón-Bel F: Mechanochemists want to shake up industrial chemistry. *ACS Cent Sci.* 2022; **8**(11): 1474–1476. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
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. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
13. European Commission: Innovative mechanochemical processes to synthesize green ACTIVE pharmaceutical ingredients. IMPACTIVE Project - Fact Sheet - HORIZON. CORDIS, European Commission, (October 1, 2022). [Reference Source](#)
14. 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. [Publisher Full Text](#)
15. COST Programme: Action CA18112. (accessed 02 March 2025). [Reference Source](#)
16. For more information on COST Action CA18112 Mechanochemistry for Sustainable Industry. (MechSustInd). (accessed 02 March, 2025). [Reference Source](#)
17. Baláž 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. [Reference Source](#)
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. [Publisher Full Text](#)
19. Lim X: Interlocking screws crank out pharmaceuticals. *Chem Eng News*. 2020; **98**(38). (30 September, 2020). [Reference Source](#)
20. COST Programme: Memorandum of Understanding (MoU) for the implementation of the COST Action “Mechanochemistry for Sustainable Industry” (MechSustInd) CA18112. [Reference Source](#)
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. [Publisher Full Text](#)
22. For more information: Beyond Benign. About partnerships—beyond benign. (accessed 02 March, 2025). [Reference Source](#)
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. [Publisher Full Text](#)
24. Introduction to practical mechanochemistry: from soft to hard materials. Colacino, E., Ennas, G., Halasz, I., Porcheddu, A., Scano, A. Eds.; De Gruyter, 2021. [Publisher Full Text](#)
25. Mechanochemistry and emerging technologies for sustainable chemical manufacturing. Eds. Colacino, E., Garcia, F.; CRC press, Taylor & Francis Group. ISBN 9780367775018, 2023. [Reference Source](#)
26. EuChemS: European young chemists' network. (accessed 02 March, 2025). [Reference Source](#)
27. Biela J, Stalla M, Rabe L, et al.: Impact assessment study on innovation in COST actions. November, 2024; accessed 02 March, 2025. [Reference Source](#)
28. De Merlier J: Is mechanochemistry set to disrupt chemical manufacturing? The Venturi Tribe, 23 February, 2023; (accessed 02 March, 2025). [Reference Source](#)
29. Sansom C: Solvents and sustainability. *Chemistry World.* 2018. [Reference Source](#)
30. Clarke CJ, Tu WC, Levers O, et al.: Green and sustainable solvents in chemical processes. *Chem Rev.* 2018; **118**(2): 747–800. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
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. [Publisher Full Text](#)
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. [Publisher Full Text](#)
33. Ball milling towards green synthesis: applications, projects, challenges. Ranu, B.; Stolle, A. Eds.; Royal Society of Chemistry, 2014. [Publisher Full Text](#)
34. Fantozzi N, Volle JN, Porcheddu A, et al.: Green metrics in mechanochemistry. *Chem Soc Rev.* 2023; 52(19): 6680–6714. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
35. Crawford DE, Porcheddu A, McCalmont AS, et al.: Solvent-Free, Continuous synthesis of Hydrazone-based active pharmaceutical ingredients by twin-screw extrusion. *ACS Sustainable Chem Eng.* 2020; 8(32): 12230–12238. [Publisher Full Text](#)
36. Clark JH, Hunt A, Topi C, et al.: Sustainable solvents: perspectives from research, business and international policy. The Royal Society of Chemistry, 2017. [Publisher Full Text](#)
37. Mullin R: COVID-19 is reshaping the pharmaceutical supply chain. *Chem Eng News.* 2020; 98(16). (accessed 02 March, 2025). [Reference Source](#)
38. European Commission: First in-depth review of strategic areas of Europe's interests. May, 2021; accessed, 02 March, 2025. [Reference Source](#)

39. Terminology and symbolism for mechanochemistry. *Chem Int.* 2024; **46**(2): 34–34. [Publisher Full Text](#)
40. <https://www.euchems.eu/divisions/working-party-on-mechanochemistry/>.