

BÖLÜM 3

YEŞİL ANALİTİK KİMYADA SÜRDÜRÜLEBİLİR EKSTRAKSİYON YÖNTEMLERİ

Berkay KEPENEK¹
Tuğrul Çağrı AKMAN²

GİRİŞ

Yeşil analitik kimya, çevre dostu yaklaşımlarla kimyasal analiz süreçlerini optimize etmeyi amaçlayan bir disiplindir. Bu alan, sürdürülebilirlik ilkelerini benimseyerek toksik reaktiflerin kullanımını en aza indirmeyi, enerji verimliliğini artırmayı ve atık oluşumunu azaltmayı hedefler. Özellikle analitik süreçlerin önemli bir aşaması olan ekstraksiyon yöntemleri, çevresel etkileri en aza indirecek şekilde yeniden tasarlanmaktadır. Geleneksel ekstraksiyon teknikleri genellikle yüksek miktarda organik çözücü tüketimi, uzun işlem süreleri ve enerji yoğunluğu gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, yeşil analitik kimya perspektifinden geliştirilen sürdürülebilir ekstraksiyon yöntemleri, hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de daha verimli ve güvenilir analiz süreçleri oluşturmak açısından büyük bir öneme sahiptir.

Son yıllarda geliştirilen sürdürülebilir ekstraksiyon yöntemleri, yenilikçi çözümler, enerji tasarruflu teknikler ve biyolojik bazlı yaklaşımlar gibi çeşitli stratejiler içermektedir. Süperkritik akışkan ekstraksiyonu, mikro dalga destekli ekstraksiyon, ultrasonik ekstraksiyon ve derin ötektik çözücüler gibi teknikler, yeşil kimya prensiplerine uygun olarak geliştirilmiş alternatif yöntemler arasında öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel ekstraksiyon tekniklerine kıyasla daha düşük çözücü tüketimi, daha kısa analiz süreleri ve daha yüksek verimlilik gibi avantajlar sunmaktadır. Böylece hem çevreye duyarlı bir analiz süreci sağlanmakta hem de araştırmacılar için daha ekonomik ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

¹ Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Analitik Kimya AD.,
berkay.kepenek@ogr.ebyu.edu.tr, ORCID iD: 0009-0006-6389-9940

² Doç. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Analitik Kimya AD.,
eczacagri87@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-5439-950X

KAYNAKLAR

1. Anastas PT, Warner JC. Green Chemistry: Theory and Practice. 2000 [cited 2025 Feb 24]; doi: 10.1093/OSO/9780198506980.001.0001.
2. Hjeresen DL, Schutt DL, Boese JM. Green Chemistry and Education [Internet]. Chemical Education Today JChemEd.chem.wisc.edu •. 2000. Available from: www.lanl.gov/greenchemistry/conf.html.
3. Anastas P, Eghbali N. Green Chemistry: Principles and Practice. Chem Soc Rev. 2010;39:301–312. doi: 10.1039/b918763b. Cited: in : PMID: 20023854.
4. Armenta S, Esteve-Turrillas FA, Garrigues S, de la Guardia M. Green Analytical Chemistry: concepts, evolution, and recent developments. Green Approaches for Chemical Analysis. 2023;1–37. doi: 10.1016/B978-0-12-822234-8.00006-8.
5. Anastas PT, Kirchhoff MM. Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry†. Acc Chem Res [Internet]. 2002 [cited 2025 Feb 25];35:686–694. doi: 10.1021/AR010065M. Cited: in : PMID: 12234198.
6. Anastas P, Eghbali N. Green Chemistry: Principles and Practice. Chem Soc Rev [Internet]. 2009 [cited 2025 Feb 24];39:301–312. doi: 10.1039/B918763B. Cited: in : PMID: 20023854.
7. Sajaniakanta S, Bigyan M, Hazra M. BIGYAN-an interdisciplinary journal of Science Applications of Green Chemistry.
8. Abuhijleh AL. Mononuclear and binuclear copper(II) complexes of the antiinflammatory drug ibuprofen: Synthesis, characterization, and catecholase-mimetic activity. J Inorg Biochem. 1994;55:255–262. doi: 10.1016/0162-0134(94)85010-0. Cited: in : PMID: 7964714.
9. Esteve-Turrillas FA, Garrigues S, de la Guardia M. Green extraction techniques in green analytical chemistry: A 2019–2023 up-date. TrAC - Trends in Analytical Chemistry. Elsevier B.V.; 2024.
10. Ayhan K, Coşansu S, Orhan-Yanikan E, Gülseren G. Advance methods for the qualitative and quantitative determination of microorganisms. Microchemical Journal. Elsevier Inc.; 2021.
11. Armenta S, Garrigues S, de la Guardia M. The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. TrAC - Trends in Analytical Chemistry. Elsevier B.V.; 2015. p. 2–8.
12. Peris-Pastor G, Azorín C, Grau J, Benedé JL, Chisvert A. Miniaturization as a smart strategy to achieve greener sample preparation approaches: A view through greenness assessment. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2024;170:117434. doi: 10.1016/J.TRAC.2023.117434.
13. Petersen L, Minkkinen P, Esbensen KH. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2005;77:261–277. doi: 10.1016/J.CHEMOLAB.2004.09.013.
14. Rodríguez Cabal LF, Vargas Medina DA, Martins Lima A, Lanças FM, Santos-Neto AJ. Robotic-assisted dynamic large drop microextraction. J Chromatogr A. 2019;1608:460416. doi: 10.1016/J.CHROMA.2019.460416. Cited: in : PMID: 31420177.
15. Martínez-Pérez-Cejuela H, Carrasco-Correa EJ, Moga A, Vergara-Barberán M, Beneito-Cambra M, Lerma-García MJ, Simó-Alfonso EF, Herrero-Martínez JM. Reticular framework materials in miniaturized and emerging formats in analytical chemistry. J Chromatogr A. Elsevier B.V.; 2022.
16. Millán-Santiago J, Lucena R, Cárdenas S. Wooden-based materials: Eco-friendly materials for direct mass spectrometric analysis and microextraction. J Sep Sci. John Wiley and Sons Inc; 2022. p. 223–232.
17. Chemat F, Vian MA, Cravotto G. Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles. International Journal of Molecular Sciences 2012, Vol 13, Pages 8615–8627 [Internet]. 2012 [cited 2025 Feb 26];13:8615–8627. doi: 10.3390/IJMS13078615. Cited: in : PMID: 22942724.
18. Xiao Z, Duritan MJM, Han D, Zong Y. How does Green education result in resource extraction and consumption sustainability? Resources Policy. 2024;89:104626. doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2023.104626.
19. Sairam P, Ghosh S, Jena S, Rao K. Süperkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE) - genel bakış. Asya

- Dergisi [Internet]. 2012 [cited 2025 Feb 26];
20. Brondz I, Sedunov B, Sivaraman N. Modifierlerin süperkritik akışkan kromatografisi (SFC) ve süperkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE) üzerindeki etkisi, bölüm I. Uluslararası Analitik Dergisi [Internet]. 2017 [cited 2025 Feb 26];5:17–39. doi: 10.4236/ijamsc.2017.52002.
 21. Ahmad T, Masoodi F, Rather S, Wani S. Süperkritik akışkan ekstraksiyonu : Bir inceleme. J Biol Kimya [Internet]. 2019 [cited 2025 Feb 26];
 22. Herrero M, Mendiola JA, Cifuentes A, Ibáñez E. Süperkritik akışkan ekstraksiyonu : Son gelişmeler ve uygulamalar. Kromatografi Dergisi [Internet]. 2010 [cited 2025 Feb 26];1217:2495–2511. doi: 10.1016/j.chroma.2009.12.019.
 23. Destandau E, Michel T. Microwave-assisted Extraction. 2022 [cited 2025 Feb 26];144–201. doi: 10.1039/9781839165894-00144.
 24. Vinatoru M, Mason TJ, Calinescu I. Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2017;97:159–178. doi: 10.1016/J.TRAC.2017.09.002.
 25. Picó Y. Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2013;43:84–99. doi: 10.1016/J.TRAC.2012.12.005.
 26. Goswami MJ, Dutta U, Kakati D. Ultrasound-Assisted Extraction for Food, Pharmacy, and Biotech Industries. 2024 [cited 2025 Feb 26];103–128. doi: 10.1007/978-1-0716-3601-5_5.
 27. Lavilla I, Bendicho C. Fundamentals of Ultrasound-Assisted Extraction. Water Extraction of Bioactive Compounds: From Plants to Drug Development. 2017;291–316. doi: 10.1016/B978-0-12-809380-1.00011-5.
 28. Cunha SC, Fernandes JO. Extraction techniques with deep eutectic solvents. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2018;105:225–239. doi: 10.1016/J.TRAC.2018.05.001.
 29. Emami S, Shayanfar A. Deep eutectic solvents for pharmaceutical formulation and drug delivery applications. Pharm Dev Technol [Internet]. 2020 [cited 2025 Feb 26];25:779–796. doi: 10.1080/10837450.2020.1735414. Cited: in: : PMID: 32096665.
 30. Ruesgas-Ramón M, Figueroa-Espinoza MC, Durand E. Application of Deep Eutectic Solvents (DES) for Phenolic Compounds Extraction: Overview, Challenges, and Opportunities. J Agric Food Chem [Internet]. 2017 [cited 2025 Feb 26];65:3591–3601. doi: 10.1021/ACS.JAFC.7B01054/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JF-2017-01054V_0001.GIF. Cited: in: : PMID: 28414232.
 31. Pena-Pereira F, Namieśnik J. Ionic Liquids and Deep Eutectic Mixtures: Sustainable Solvents for Extraction Processes. ChemSusChem [Internet]. 2014 [cited 2025 Feb 26];7:1784–1800. doi: 10.1002/CSSC.201301192. Cited: in: : PMID: 24811900.
 32. Shamshina JL, Berton P, Wang H, Zhou X, Gurau G, Rogers RD. Ionic Liquids in Pharmaceutical Industry. Green Techniques for Organic Synthesis and Medicinal Chemistry [Internet]. 2018 [cited 2025 Feb 26];539–577. doi: 10.1002/9781119288152.CH20.
 33. Pawliszyn J. Theory of Solid-Phase Microextraction. Handbook of Solid Phase Microextraction. 2012;13–59. doi: 10.1016/B978-0-12-416017-0.00002-4.
 34. Spietelun A, Pilarczyk M, Kloskowski A, Namieśnik J. Current trends in solid-phase microextraction (SPME) fibre coatings. Chem Soc Rev [Internet]. 2010 [cited 2025 Feb 26];39:4524–4537. doi: 10.1039/C003335A.
 35. Owczarzy A, Kulig K, Piordas K, Piśła P, Sarkowicz P, Rogóż W, Maciążek-Jurczyk M. Solid-phase microextraction – a future technique in pharmacology and coating trends. Analytical Methods [Internet]. 2024 [cited 2025 Feb 26];16:3164–3178. doi: 10.1039/D4AY00187G. Cited: in: : PMID: 38717233.
 36. Xu C, Xie T. Review of Microfluidic Liquid-Liquid Extractors. Ind Eng Chem Res [Internet]. 2017 [cited 2025 Feb 26];56:7593–7622. doi: 10.1021/ACS.IECR.7B01712/SUPPL_FILE/IE7B01712_SI_001.PDF.
 37. Wang K, Luo G. Microflow extraction: A review of recent development. Chem Eng Sci. 2017;169:18–33. doi: 10.1016/J.CES.2016.10.025.
 38. Gañán-Calvo AM, Montanero JM, Martín-Banderas L, Flores-Mosquera M. Building functi-

onal materials for health care and pharmacy from microfluidic principles and Flow Focusing. Adv Drug Deliv Rev. 2013;65:1447–1469. doi: 10.1016/J.ADDR.2013.08.003. Cited: in: : PMID: 23954401.

39. Marathe SJ, Jadhav SB, Bankar SB, Singhal RS. Enzyme-Assisted Extraction of Bioactives. Food Bioactives: Extraction and Biotechnology Applications [Internet]. 2017 [cited 2025 Feb 26];171–201. doi: 10.1007/978-3-319-51639-4_8/TABLES/5.
40. Amalia Kartika I, Pontalier PY, Rigal L. Twin-screw extruder for oil processing of sunflower seeds: Thermo-mechanical pressing and solvent extraction in a single step. Ind Crops Prod. 2010;32:297–304. doi: 10.1016/J.INDCROP.2010.05.005.