

Waste Management and Disposal

Recycling of Aluminium–Polymer Composite Packaging Waste Using
Green Solvent-Based Delamination

Tamari Mumladze

tamari.mumladze@atsu.edu.ge

Tsitsino Turkadze

tsitsino.turkadze@atsu.edu.ge

Inga Bochoidze

inga.bochoidze@atsu.edu.ge

Manana Gabidzashvili

manana.gabidzashvili@atsu.edu.ge

Nino Guleishvili

nino.guleishvili@atsu.edu.ge

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2026.1.27.15>

Aluminium–polymer composite packaging waste is among the most difficult packaging streams to recycle because its multilayer structure limits the effectiveness of conventional mechanical processing and often results in landfilling or energy recovery rather than material recovery. This review examines green solvent-based delamination as a sustainable pathway for separating aluminium and polymer fractions from composite packaging waste. The paper discusses the structure of aluminium–polymer laminates, the limitations of conventional recycling, the principles of solvent-based separation, and the performance of major green solvent systems, including ethyl lactate, methyl soyate, gamma-valerolactone, ionic liquids, and deep eutectic solvents. Particular attention is given to the environmental significance of these approaches within the framework of circular economy principles and to their potential relevance for Georgia, where multilayer packaging waste remains insufficiently addressed in current waste management practices. The review demonstrates that green solvent-based delamination offers strong potential for high-purity aluminium recovery and improved valorization of polymer fractions; however, further optimization, scale-up studies, and policy support are required for practical implementation.

Keywords: aluminium–polymer composite packaging, green solvents, delamination, multilayer waste, circular economy, Georgia

1. Introduction. Aluminium–polymer composite packaging waste (APCPW) has become an increasingly important environmental challenge due to the

widespread use of multilayer packaging in the food and pharmaceutical sectors. These materials are designed to combine the barrier performance of aluminium with the flexibility, sealability, and mechanical protection provided by polymers such as polyethylene, polyethylene terephthalate, polypropylene, and polyvinyl chloride (Kaiser et al. 2017, Tamizhdurai et al. 2024). While these structures perform efficiently during use, their end-of-life management remains problematic because the bonded layers are difficult to separate into clean recyclable fractions (Samorì et al. 2023, Seier et al. 2023).

The increasing consumption of packaged products has led to growing volumes of post-consumer composite packaging waste, including pharmaceutical blister packs, beverage cartons, and flexible food laminates (Shukla et al. 2022, Wong et al. 2024). Conventional recycling systems are poorly adapted to such waste streams. Mechanical recycling typically produces mixed and contaminated outputs with limited application value, while thermal processing sacrifices polymer fractions and may reduce the quality of recovered aluminium. Consequently, a large proportion of aluminium–polymer packaging waste is still incinerated or landfilled, resulting in resource loss and environmental burden (Kaiser et al. 2017, Tamizhdurai et al. 2024).

In response to these limitations, solvent-based separation technologies have attracted increasing attention. In particular, green solvent-based delamination has emerged as a promising approach for selectively disrupting interfacial bonding between layers and enabling recovery of valuable material fractions under environmentally preferable conditions compared with conventional chemical treatments (Nieminen et al. 2020, Samorì et al. 2023). This study is based on a critical review of recent scientific literature and examines the scientific basis, technical performance, and environmental relevance of green solvent-based delamination, with particular attention to its potential application in Georgia.

2. Structure and Recycling Challenges of Aluminium–Polymer Composite Packaging. Aluminium–polymer composite packaging is typically composed of thin aluminium foil laminated with one or more polymer layers, often combined with adhesives and, in some cases, paper components. The aluminium layer provides an effective barrier against oxygen, moisture, and light, while polymer layers provide flexibility, heat-sealing properties, and structural integrity (Kaiser et al. 2017, Ciawi et al. 2025). Common configurations include PVC/Al pharmaceutical blisters, PE/Al/PET flexible food packaging, and paper/PE/Al/PE beverage cartons (Nieminen et al. 2020, Wong et al. 2024).

The main recycling challenge arises from the strong adhesion between dissimilar layers. These interfacial bonds are intentionally designed to resist separation during use, but this property complicates material recovery after

disposal (Adam et al., 2025, Tamizhdurai et al., 2024). Mechanical recycling cannot effectively separate these layers, resulting in low-value mixed materials, while hydropulping recovers only paper fibers and leaves aluminium–polymer residues that require further treatment (Georgiopoulou et al. 2021, Kremser et al., 2022). Thermal processes such as incineration or pyrolysis may recover energy or partially recover metals but typically destroy polymer fractions and limit circularity (Shukla et al. 2022).

Representative samples of aluminium–polymer composite packaging waste are shown in Figure 1, while their material characteristics and recycling challenges are summarized in Table 1.



Fig. 1. Representative aluminium–polymer composite packaging waste samples: (a) flexible food packaging; (b) coffee/tea capsules; (c) pharmaceutical blister packs; (d) dairy packaging lids.

To illustrate the diversity and structural complexity of aluminium–polymer composite packaging waste, representative post-consumer samples were collected, including food packaging, beverage capsules, pharmaceutical blisters, and dairy product lids. These materials differ in composition, structure, and recycling difficulty. Table 1 summarizes the key characteristics, material composition, and recovery potential of the selected samples.

Table 1. Representative aluminium–polymer composite packaging waste samples and their characteristics

Material Composition (Typical)	Structure Type	Key Characteristics	Recycling Challenges	Potential Recovery
1. Flexible food packaging (cake/snack, chocolate packaging) Food packaging				
PET / PE / Adhesive / Al (or metallized PET)	Multilayer flexible laminate	Lightweight, glossy surface, high barrier properties	Strong interlayer adhesion; thin Al layer; contamination by food residues	Aluminium (thin foil or coating), polymer fraction (PE, PET)
2. Metallized plastic film (chocolate wrapper – Luppó CakeBite) Confectionery packaging				
BOPP / metallized Al coating / PE	Metallized polymer	Shiny metallic appearance; very thin Al layer	Difficult separation due to vapor-deposited aluminium; low Al content	Polymer recovery more feasible than aluminium
3. Coffee/tea capsules Beverage packaging (MEAMA)				
PP / Al foil / multilayer polymer and organic residue	Rigid multilayer composite	Combination of plastic cup and aluminium lid; contains organic waste	Mixed materials; contamination (coffee/tea); small size complicates sorting	Aluminium lid recovery; polymer cup recycling after cleaning
4. Pharmaceutical blister packs Medical packaging				
PVC / Al or PET / Al	Multilayer rigid laminate	High barrier protection; standardized structure	Strong bonding; small size; mixed waste streams	High-purity aluminium recovery possible; polymer reuse limited
5. Aluminium foil-based pharmaceutical packaging (tablets – Janumet, others) Medical packaging				

თ. მუმლაძე, ც. თურქაძე, ი. ბოჭორიძე, მ. გაბიაშვილი, ნ. გულუიშვილი

Al / polymer coating (PVC, PVDC, or lacquer)	Composite foil laminate	Thick aluminium layer; embossed cavities	Residual pharmaceuticals; mixed polymer coatings	Aluminium recovery highly valuable
6. Dairy product lids (yogurt/cream foil lids) Food packaging				
Al / PE or Al / lacquer	Thin foil laminate	Lightweight; easily deformable	Organic contamination; thin structure	Aluminium recovery; limited polymer value
7. Composite dairy packaging (Georgian products – yogurt lids and paper/polymer layers) Food packaging				
Paper / PE / Al / PE	Multilayer composite (similar to Tetra Pak components)	Combination of fibre + polymer + aluminium	Complex separation; multiple material streams	Fibre; aluminium; polymer recovery possible with advanced processes

PET — Polyethylene Terephthalate; PE — Polyethylene; PP — Polypropylene; PVC — Polyvinyl Chloride.

3. Principles of Green Solvent-Based Delamination. Green solvent-based delamination addresses these challenges by targeting the adhesive or polymer interface within multilayer structures. Instead of mechanically breaking the laminate, the solvent weakens interfacial adhesion through swelling, plasticization, or partial dissolution of specific layers, allowing separation of aluminium and polymer components (Nieminen et al. 2020, Loukodimou et al. 2024a). The efficiency of this process depends on solvent properties, including polarity, hydrogen-bonding capacity, and compatibility with target materials, as well as operational parameters such as temperature, contact time, solvent-to-solid ratio, and agitation. Many studies report effective delamination at moderately elevated temperatures, typically between 60°C and 130°C, with processing times ranging from less than one hour to several hours depending on material composition (Samorì et al. 2023, Loukodimou et al. 2024b).

The delamination mechanism involves solvent penetration and weakening of interfacial bonding. A schematic representation of this process is shown in Figure 2.

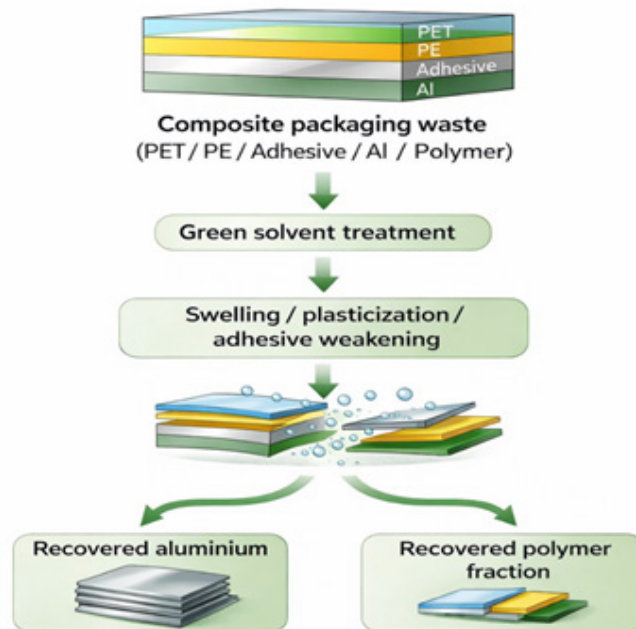


Fig. 2. Schematic representation of green solvent-based delamination of aluminium–polymer composite packaging waste.

The solvent penetrates the adhesive or polymer interface, weakens interlayer bonding, and enables recovery of aluminium and polymer fractions.

Structure of multilayer aluminium–polymer packaging and its separation by green solvent-based delamination. The solvent penetrates the adhesive or polymer interface, weakens interlayer bonding, and enables recovery of aluminium and polymer fractions.

In addition to visual classification, selected samples were analyzed using a handheld near-infrared (NIR) spectroscopic device to identify polymer components within multilayer structures. This approach enables rapid, non-destructive material characterization and supports more accurate classification of composite packaging waste. The results confirm the presence of different polymer types across packaging categories, highlighting the variability of multilayer structures and the importance of selecting appropriate solvent systems for efficient delamination. The overall NIR-based material identification workflow applied in this study is illustrated in Figure 3. The process includes sample placement, spectral acquisition, real-time material classification (e.g., PVC/PP), and data recording and analysis via the associated software (PlasTell, Matoha, <https://www.matoha.com/plastics-identification>).



Fig. 3. Schematic representation of the material identification workflow using handheld NIR spectroscopy.

NIR-based material identification workflow enabled rapid preliminary identification of the polymeric component of the analyzed packaging samples and provided a practical basis for subsequent delamination studies.

4. Green Solvent Systems and Performance. Among green solvents, ethyl lactate has received considerable attention due to its renewable origin, relatively low toxicity, and favorable solvent properties. It can effectively swell polymer layers or disrupt adhesive interfaces, although its performance depends on laminate composition and may require optimized conditions. Methyl soyate, derived from vegetable oils, is another promising solvent characterized by good biodegradability and low volatility, although it may require longer treatment times due to its milder interaction with polymers. Gamma-valerolactone has shown particular promise in treating complex multilayer systems such as beverage cartons, where multiple components must be recovered. Its ability to selectively interact with polymer layers while preserving other fractions makes it a valuable candidate for advanced recycling applications.

Ionic liquids and deep eutectic solvents represent more advanced solvent systems with high tunability and strong separation performance. Ionic liquids

offer high efficiency and thermal stability but may face limitations related to cost and toxicity. Deep eutectic solvents, often composed of relatively benign components such as choline chloride and organic acids, have demonstrated strong performance in multilayer packaging delamination and are considered promising for further development (Loukodimou et al. 2024a, Loukodimou et al. 2024b).

Table 2. Comparative characteristics of major green solvent systems for Aluminium–polymer composite packaging waste (APCPW) delamination

Solvent system	Main advantages	Main limitations	Typical relevance for APCPW delamination
Ethyl lactate	Renewable origin, relatively low toxicity, biodegradable, good solvency for some adhesives/polymers	Not universally effective; may require elevated temperature and longer contact time	Suitable for selective swelling and adhesive disruption in some multilayer laminates
Methyl soyate	Bio-based, low volatility, favorable environmental profile, safer handling	Slower action, may need process intensification	Promising for polyolefin-rich laminates and gentle delamination conditions
Gamma-valerolactone	Renewable platform solvent, good selectivity, promising for complex systems	Still limited large-scale industrial evidence	Particularly relevant for beverage-carton-type and multi-component packaging
Ionic liquids	High separation efficiency, negligible vapor pressure, tunable properties	Cost, synthesis complexity, possible toxicity concerns	Strong technical performance for targeted composite separation
Deep eutectic solvents	Relatively simple formulation, tunable, lower cost than many ionic liquids, promising green profile	Performance depends strongly on composition and process design	Highly promising for PE/Al/PET and related multilayer laminates

5. Environmental Relevance and Georgian Context. From an environmental perspective, green solvent-based delamination supports circular economy principles by enabling recovery of valuable materials from otherwise difficult-

to-recycle waste streams. Secondary aluminium production requires significantly less energy than primary production, making high-purity aluminium recovery particularly beneficial. Similarly, cleaner polymer fractions improve opportunities for reuse and material valorization. However, the environmental performance of the process depends not only on separation efficiency but also on solvent recovery, energy demand, emissions, and the marketability of recovered outputs.

The relevance of this approach for Georgia is significant. Current waste management systems remain largely disposal-oriented, and complex packaging waste is rarely recovered as a resource. The introduction of advanced recycling technologies, such as solvent-based delamination, could contribute to improved resource efficiency and alignment with European circular economy strategies. At the same time, practical implementation would require locally grounded waste characterization, pilot-scale validation, infrastructure development, technical training, and supportive policy frameworks. Therefore, for Georgia, green solvent-based delamination should presently be viewed as a strategically important research and development direction rather than an immediately deployable industrial solution.

6. Conclusion. Green solvent-based delamination represents a promising and environmentally sound approach for recycling aluminium–polymer composite packaging waste. The reviewed literature demonstrates that various solvent systems can effectively weaken interfacial bonding and enable separation of multilayer structures while preserving material quality. Among the studied systems, bio-based solvents and deep eutectic solvents appear especially promising due to their balance of technical performance and greener profile.

Although no single solvent system is universally applicable, the development of tailored solvent strategies offers important opportunities for improving recovery of both aluminium and polymer fractions. For Georgia, this field represents a relevant direction for advancing sustainable waste management and circular economy practice. Further research should focus on locally relevant waste streams, solvent selection, process optimization, solvent recovery, and pilot-scale implementation.

References

- Adam, F., et al. 2025. Recycling of multilayer polymeric barrier films: An overview of recent pioneering works and main challenges.
- Ciawi, E., et al. 2025. Multilayer packaging recycling: Challenges, current practices, and future prospects.
- EU4Georgia. 2024–2028. *Circular cities and regions in Georgia: Building local capacities to advance waste prevention and circular economy*.
- Georgiopoulou, I., et al. 2021. „Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the selective dissolution-precipitation process.“ *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105268>
- GIZ. 2024. *Circular economy in Georgia: Opportunities for reusable packaging systems and women's participation*.
- Golkaram, M., et al. 2025. „Advancing circularity in multilayer film recycling: Balancing quality and sustainability.“ *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym17212868>
- Jasiński, D., et al. 2025. „Sustainability assessment of employing chemical recycling technologies on multilayer packaging waste.“ *Sustainability*, 17(2), 556. <https://doi.org/10.3390/su17020556>
- Kaiser, K., et al. 2017. „Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review.“ *Recycling*. <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>
- Kremser, K., et al. 2022. „Bioleaching/enzyme-based recycling of aluminium and polyethylene from beverage cartons packaging waste.“ *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106444>
- Loukodimou, E., et al. 2024a. „Delamination and evaluation of multilayer PE/Al/PET packaging waste separated using a hydrophobic deep eutectic solvent.“ *Polymers*, 16(19), 2718. <https://doi.org/10.3390/polym16192718>
- Loukodimou, E., et al. 2024b. „Formulation and characterization of deep eutectic solvents and potential application in recycling packaging laminates.“ *Polymers*, 16(19), 2781. <https://doi.org/10.3390/polym16192781>
- Miękoś, E., et al. 2023. „Separation technology of components of waste pharmaceutical blisters.“ *Ecological Chemistry and Engineering S*. <https://doi.org/10.2478/eces-2023-0034>
- Mumladze, T., et al. 2019–2020. *Research on aluminium-polymer composite packaging recycling in Georgia*. Kaunas University of Technology.
- Nieminen, H., et al. 2020. „Green solvents in recovery of aluminium and plastic from waste pharmaceutical blister packaging.“ *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.03.014>

- Rosato, A., et al. 2020. *New strategy for multilayers packaging recycling*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4247372>
- Samorì, C., et al. 2023. „Recycling of multilayer packaging waste with sustainable solvents.“ *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106832>
- Seier, M., et al. 2023. „Prospects for recyclable multilayer packaging: A case study.“ *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym15132966>
- Shukla, A., et al. 2022. „Waste pharmaceutical blister packages as a source of secondary aluminum.“ *JOM*. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05038-6>
- Sufeng, et al. 2017. *Plastic-aluminum composite packaging material separating agent based on ionic liquid and separation method thereof*.
- Tamizhdurai, P., et al. 2024. „A state-of-the-art review of multilayer packaging recycling: Challenges, alternatives, and outlook.“ *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141403>
- USAID/ICMA. 2016. *Waste management technologies in regions, Georgia – Quarterly report*.
- Vagnoni, M., et al. 2023. „Recycling of multilayer packaging waste with switchable anionic surfactants.“ *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107141>
- Wong, S. S., et al. 2024. „Solvent-targeted recovery of all major materials in beverage carton packaging waste.“ *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107367>

This work was supported by “Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia” (SRNSFG) [Grant number - FR-24-2116].

ნარჩენების მართვა და უტილიზაცია

**ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების
გადამუშავება მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევების
მეთოდების გამოყენებით**

თამარი მუმლაძე

tamari.mumladze@atsu.edu.ge

ციცინო თურქაძე

tsitsino.turkadze@atsu.edu.ge

ინგა ბოჭოიძე

inga.bochoidze@atsu.edu.ge

მანანა გაბიძაშვილი

manana.gabidzashvili@atsu.edu.ge

ნინო გულეიშვილი

nino.guleishvili@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

DOI: <https://doi.org/10.52340/atsu.2026.1.27.15>

ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენები მიეკუთვნება გადამუშავებისთვის ერთ-ერთ ყველაზე რთულ შეფუთვით ნაკადს, რადგან მათი მრავალშრიანი სტრუქტურა ზღუდავს ტრადიციული მექანიკური დამუშავების ეფექტიანობას და ხშირად იწვევს მათ განთავსებას ნაგავსაყრელებზე ან ენერგეტიკულ აღდგენას, მასალის აღდგენის ნაცვლად. წინამდებარე მიმოხილვა განიხილავს მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებულ განცალკევებას, როგორც მდგრად მიდგომას კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენებიდან ალუმინისა და პოლიმერული ფრაქციების გამოსაყოფად. ნაშრომში განხილულია ალუმინ-პოლიმერული ლამინატების სტრუქტურა, ტრადიციული გადამუშავების შეზღუდვები, გამხსნელზე დაფუძნებული განცალკევების პრინციპები და ძირითადი მწვანე გამხსნელური სისტემების მოქმედების ეფექტიანობა, მათ შორის ეთილლექტრის, მეთილ-სოიატის, გამა-ვალეროლაქტონის, იონური სითხეებისა და ღრმა ევტექტიკური გამხსნელების. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ამ მიდგომების გარემოსდაცვით მნიშვნელობას ცირკულარული ეკონომიკის პრინციპების ფარგლებში და მათ პოტენციურ აქტუალობას საქართველოსთვის, სადაც მრავალშრიანი შეფუთვის ნარჩენები ნარჩენების მართვის არსებულ პრაქტიკაში ჯერ კიდევ არასაკმარისადაა გათვალისწინებული. მიმოხილვა აჩვენებს, რომ მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება მნიშვნელოვან პოტენციალს ქმნის მაღალი სისუფთავის ალუმინის აღდგენისა და პოლიმერული ფრაქციების უკეთესი ვალორიზაციისათვის; თუმცა, პრაქტიკული დანერგვისთვის აუცილებელია შემდგომი ოპტიმიზაცია, მასშტაბირების კვლევები და შესაბამისი პოლიტიკის მხარდაჭერა.

საკვანძო სიტყვები: ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვა, მწვანე გამხსნელები, განცალკევება, მრავალშრიანი ნარჩენები, ცირკულარული ეკონომიკა, საქართველო

1. შესავალი. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენები (APCPW) სულ უფრო მნიშვნელოვან გარემოსდაცვით გამოწვევად იქცა, რაც განპირობებულია საკვებისა და ფარმაცევტულ სექტორებში მრავალშრიანი შეფუთვის ფართო გამოყენებით. ეს მასალები შექმნილია ისე, რომ გააერთიანოს ალუმინის ბარიერული თვისებები და ისეთი პოლიმერების მიერ უზრუნველყოფილი მოქნილობა, დალუქვის უნარი და მექანიკური დაცვა, როგორცაა პოლიეთილენი, პოლიეთილენტერეფტალატი, პოლიპროპილენი და პოლივინილქლორიდი (Kaiser et al. 2017, Tamizhdurai et al. 2024). მიუხედავად იმისა, რომ ეს სტრუქტურები გამოყენების ეტაპზე ეფექტიანად ფუნქციონირებს, მათი სიცოცხლის ციკლის დასასრულის შემდგომი მართვა კვლავ პრობლემურ საკითხად რჩება, რადგან ერთმანეთთან შეკავშირებული შრეების სუფთა, გადამუშავებისთვის ვარგის ფრაქციებად გამოყოფა რთულია (Samori et al. 2023, Seier et al. 2023).

შეფუთული პროდუქციის მოხმარების ზრდამ განაპირობა მომხმარებლის მიერ გამოყენების შემდგომ წარმოქმნილი კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების მოცულობის ზრდა, მათ შორის ფარმაცევტული ბლისტერული შეფუთვების, სასმელის მუყაოს შეფუთვების და მოქნილი საკვები ლამინატების სახით (Shukla et al. 2022; Wong et al. 2024). ტრადიციული გადამუშავების სისტემები ასეთ ნარჩენთა ნაკადებთან სამუშაოდ არასათანადოდ არის მორგებული. მექანიკური გადამუშავება, როგორც წესი, იძლევა შერეულ და დაბინძურებულ პროდუქტს, რომელსაც შეზღუდული გამოყენებითი ღირებულება აქვს, მაშინ როდესაც თერმული დამუშავება იწვევს პოლიმერული ფრაქციების დაკარგვას და შესაძლოა შეამციროს აღდგენილი ალუმინის ხარისხიც. შედეგად, ალუმინ-პოლიმერული შეფუთვის ნარჩენების მნიშვნელოვანი ნაწილი კვლავ ინსინერაციას ან ნაგავსაყრელზე განთავსებას ექვემდებარება, რაც იწვევს რესურსების დაკარგვას და გარემოზე დამატებით ზემოქმედებას (Kaiser et al. 2017, Tamizhdurai et al. 2024).

ამ შეზღუდვებზე საპასუხოდ, გამხსნელზე დაფუძნებულმა განცალკევების ტექნოლოგიებმა მზარდი ყურადღება მიიპყრო. კერძოდ, მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება ჩამოყალიბდა, როგორც პერსპექტიული მიდგომა, რომელიც უზრუნველყოფს შრეებს შორის სასაზღვრო ზედაპირებზე არსებული კავშირის სელექციურ დარღვევას

და ღირებული მასალების ფრაქციების აღდგენას ეკოლოგიურად უპირატეს პირობებში, ტრადიციულ ქიმიურ დამუშავებასთან შედარებით (Nieminen et al. 2020, Samorì et al. 2023). წინამდებარე სტატია ეფუძნება უახლესი სამეცნიერო ლიტერატურის კრიტიკულ მიმოხილვას და განიხილავს მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევების სამეცნიერო საფუძვლებს, ტექნიკურ ეფექტიანობასა და გარემოსდაცვით მნიშვნელობას, განსაკუთრებული ყურადღებით მის პოტენციურ გამოყენებაზე საქართველოში.

2. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის სტრუქტურა და გადამუშავების გამოწვევები. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვა, როგორც წესი, შედგება ერთი ან რამდენიმე პოლიმერული შრით ლამინირებული თხელი ალუმინის ფოლგისგან, რომელსაც ხშირად ერთვის ადჰეზიური ფენები და, ზოგიერთ შემთხვევაში, ქაღალდის კომპონენტებიც. ალუმინის შრე წარმოადგენს ეფექტიან ბარიერს ჟანგბადის, ტენიანობისა და სინათლის მიმართ, ხოლო პოლიმერული შრეები განაპირობებს მოქნილობას, თბოდალუქვის თვისებებსა და სტრუქტურულ სიმტკიცეს (Kaiser et al. 2017, Ciawi et al. 2025). გავრცელებულ კონფიგურაციებს შორისაა PVC/Al ფარმაცევტული ბლისტერები, PE/Al/PET მოქნილი საკვები შეფუთვა და paper/PE/Al/PE სასმლის მუყაოს შეფუთვა (Nieminen et al. 2020, Wong et al. 2024).

გადამუშავების მთავარი სირთულე განპირობებულია განსხვავებულ შრეებს შორის არსებული ძლიერი ადჰეზიით. ეს ინტერფეისული ბმები მიზანმიმართულად არის შექმნილი იმისათვის, რომ გამოყენების პროცესში განცალკევებას გაუძლოს, თუმცა სწორედ ეს თვისება ართულებს მასალების აღდგენას მათი გამოყენების შემდეგ (Adam et al. 2025, Tamizhdurai et al. 2024). მექანიკური გადამუშავება ვერ უზრუნველყოფს ამ შრეების ეფექტიან განცალკევებას, რის შედეგადაც მიიღება დაბალი ღირებულების შერეული მასალები, ხოლო ჰიდროპულპინგი მხოლოდ ქაღალდის ბოჭკოების აღდგენის საშუალებას იძლევა და ტოვებს ალუმინ-პოლიმერულ ნარჩენებს, რომლებიც შემდგომ დამუშავებას საჭიროებს (Georgiopoulou et al. 2021, Kremser et al. 2022). თერმულ პროცესებს, როგორიცაა ინსინერაცია ან პიროლიზი, შეუძლია ენერგიის აღდგენა ან მეტალების ნაწილობრივი აღდგენა, თუმცა, როგორც წესი, ისინი ანადგურებს პოლიმერულ ფრაქციებს და ზღუდავს ცირკულარობას (Shukla et al. 2022).

ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების ნიმუშები ნაჩვენებია 1-ელ ნახაზზე, ხოლო მათი მასალობრივი მახასიათებლები და გადამუშავების გამოწვევები შეჯამებულია 1-ელ ცხრილში.



სურ. 1. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის წარმომადგენლობითი ნიმუშები: (a) მოქნილი საკვები შეფუთვა; (b) ყავის/ჩაის კაფსულები; (c) ფარმაცევტული ბლისტერ-შეფუთვები; (d) რძის პროდუქტების შეფუთვის სახურავები.

ცხრილი 1. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების ნიმუშები და მათი მახასიათებლები

მასალობრივი შემადგენლობა (ტიპური)	სტრუქტურის ტიპი	ძირითადი მახასია- თებლები	გადამუშავების გამოწვევები	პოტენციური აღდგენა
1. მოქნილი საკვები შეფუთვა (ნამცხვრის/სნეკის, შოკოლადის შეფუთვა) / საკვები შეფუთვა				
PET / PE / ადჰეზივი / Al (ან მეტალი- ზებული PET)	მრავალ- შრიანი მოქნილი ლამინატი	მსუბუქი, პრიალა ზედაპირი, მაღალი ბარიერული თვისებები	ძლიერი შრეტაშორისი ადჰეზია; ალუმინის თხელი შრე; საკვების ნარჩენებით დაბინძურება	ალუმინი (თხელი ფოლგა ან საფარი), პოლიმერული ფრაქცია (PE, PET)

2. მეტალიზებული პლასტიკური ფირი (შოკოლადის შესაფუთი — Luppo CakeBite) / საკონდიტრო ნაწარმის შეფუთვა				
BOPP / მეტალი- ზებული Al საფარი / PE	მეტალი- ზებული პოლიმერი	ბზინვარე მეტალური იერსახე; ალუმინის ძალიან თხელი შრე	ვაკუუმური დეკონირებით დატანილი ალუმინის გამო რთული განცალკევება; Al-ის დაბალი შემცველობა	პოლიმერის აღდგენა უფრო რეალის- ტურია, ვიდრე ალუმინის
3. ყავის/ჩაის კაფსულები (MEAMA) / სასმლის შეფუთვა				
PP / Al ფოლგა / მრავალ- შრიანი პოლიმერი; ორგანული ნარჩენი	ხისტი მრავალ- შრიანი კომპოზიტი	პლასტმასის ჭიქისა და ალუმინის სახურავის კომბინაცია; შეიცავს ორგანულ ნარჩენებს	შერეული მასალები; დაბინძურება (ყავა/ჩაი); მცირე ზომა ართულებს დახარისხებას	ალუმინის სახურავის აღდგენა; პლასტმასის ჭიქის გადამუშავება გაწმენდის შემდეგ
4. ფარმაცევტული ბლისტერ-შეფუთვები / სამედიცინო შეფუთვა				
PVC / Al ან PET / Al	მრავალ- შრიანი ხისტი ლამინატი	მაღალი ბარიერული დაცვა; სტანდარ- ტიზებული სტრუქ- ტურა	ძლიერი შეკავშირება; მცირე ზომა; შერეული ნარჩენების ნაკადები	შესაძლებელია მაღალი სისუფთავის ალუმინის აღდგენა; პოლიმერის ხელახალი გამოყენება შეზღუდულია
5. ალუმინის ფოლგაზე დაფუძნებული ფარმაცევტული შეფუთვა (ტაბლეტები — Janumet და სხვ.) / სამედიცინო შეფუთვა				
Al / პოლი- მერული საფარი (PVC, PVDC ან ლაქი)	კომპო- ზიტური ფოლგის ლამინატი	სქელი ალუმინის შრე; შტამპი- რებული ღრმეულები	ფარმაცევ- ტული ნარჩენები; შერეული პოლი- მერული საფარები	ალუმინის აღდგენა მაღალ- ღირებულია

თ. მუმლაძე, ც. თურქაძე, ი. ბოჭორიძე, მ. გაბიაშვილი, ნ. გულეიშვილი

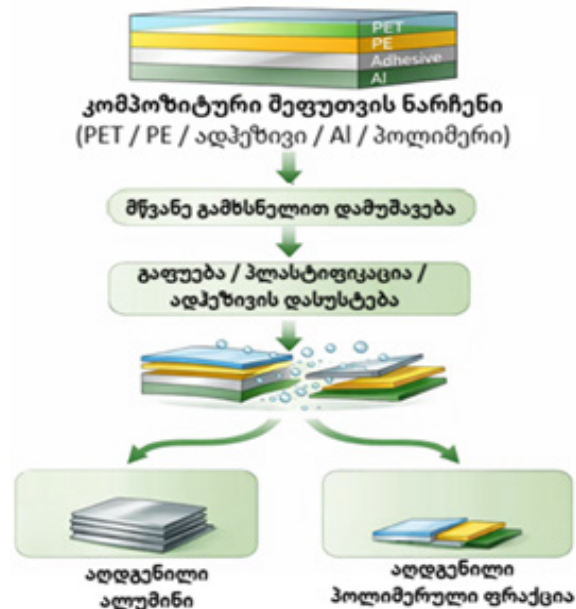
6. რძის პროდუქტების სახურავები (იოგურტის/ნაღების ფოლგის სახურავები) / საკვები შეფუთვა				
Al / PE ან Al / ლაქი	თხელი ფოლგის ლამინატი	მსუბუქი; ადვილად დეფორ- მირებადი	ორგანული დაბინძურება; თხელი სტრუქტურა	ალუმინის აღდგენა; პოლიმერის შეზღუდული ღირებულება
7. რძის პროდუქტების კომპოზიტური შეფუთვა (ქართული პროდუქტები — იოგურტის სახურავები და ქაღალდის/პოლიმერის შრეები) / საკვები შეფუთვა				
ქაღალდი / PE / Al / PE	მრავალ- შრიანი კომპოზიტი (Tetra Pak-ის კომპო- ნენტების მსგავსი)	ბოჭკოს, პოლიმერის და ალუმინის კომბინაცია	რთული განცალკევება; მასალების მრავალი ნაკადი	ბოჭკოს, ალუმინისა და პოლიმერის აღდგენა შესაძლებელია მოწინავე პროცესების გამოყენებით

PET - პოლიეთილენტერეფტალატი; PE - პოლიეთილენი; PP - პოლიპროპილენი; PVC - პოლივინილქლორიდი.

ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების მრავალფეროვნების, სტრუქტურული სირთულისა და რეციკლირების შესაძლებლობების კვლევის მიზნით შესწავლილია საქართველოში წარმოქმნილი ალუმინ-პოლიმერული ნარჩენების ნიმუშები, მათ შორის საკვები შეფუთვა, სასმელის კაფსულები, ფარმაცევტული ბლისტერები და რძის პროდუქტების სახურავები. ეს მასალები განსხვავდება შემადგენლობით, სტრუქტურითა და გადამუშავების სირთულით. 1-ელ ცხრილში შეჯამებულია შერჩეული ნიმუშების ძირითადი მახასიათებლები, მასალობრივი შემადგენლობა და აღდგენის პოტენციალი.

3. მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევების პრინციპები. მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება ამ გამოწვევებს მრავალშრიანი სტრუქტურების შიგნით არსებული ადჰეზიური ან პოლიმერული ინტერფეისის მიზანმიმართული ზემოქმედებით პასუხობს. ლამინატის მექანიკურად დაშლის ნაცვლად, გამხსნელი შრეთაშორის ადჰეზიას ასუსტებს გაფუების, პლასტიფიკაციის ან კონკრეტული შრეების ნაწილობრივი გახსნის გზით, რაც შესაძლებელს ხდის ალუმინისა და პოლიმერული კომპონენტების განცალკევებას (Nieminen et al. 2020, Loukodimou et al. 2024a). ამ პროცესის ეფექტიანობა დამოკიდებულია გამხსნელის თვისებებზე, მათ შორის პოლარობაზე, წყალბადური ბმის

წარმოქმნის უნარზე და სამიზნე მასალებთან თავსებადობაზე, აგრეთვე ოპერაციულ პარამეტრებზე, როგორცაა ტემპერატურა, კონტაქტის დრო, გამხსნელისა და მყარი ფაზის თანაფარდობა და მორევა. მრავალ კვლევაში აღწერილია ეფექტიანი განცალკევება ზომიერად მომატებულ ტემპერატურაზე, ჩვეულებრივ 60°C-დან 130°C-მდე დიაპაზონში, ხოლო დამუშავების ხანგრძლივობა მასალის შემადგენლობიდან გამომდინარე მერყეობს ერთ საათზე ნაკლებიდან რამდენიმე საათამდე (Samori et al. 2023, Loukodimou et al. 2024b). განცალკევების მექანიზმი მოიცავს გამხსნელის შეღწევას და ინტერფეისული ბმის შესუსტებას. ამ პროცესის სქემატური წარმოდგენა ნაჩვენებია მე-2 ნახაზზე.



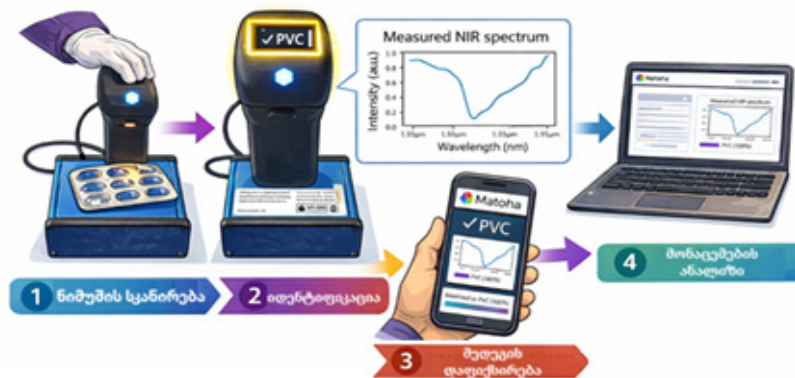
სურ. 2. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევების სქემატური წარმოდგენა.

გამხსნელი აღწევს ადჰეზიურ ან პოლიმერულ ინტერფეისში, ასუსტებს შრეთაშორის ბმას და უზრუნველყოფს ალუმინისა და პოლიმერული ფრაქციების აღდგენას.

ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის სტრუქტურა და მისი განცალკევება მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევების გზით. გამხსნელი აღწევს ადჰეზიურ ან პოლიმერულ ინტერფეისში, ასუსტებს შრეთაშორის ბმას და უზრუნველყოფს ალუმინისა და პოლიმერული ფრაქციების აღდგენას. ვიზუალური კლასიფიკაციის გარდა, შერჩეული

ნიმუშები გაანალიზდა ხელში დასაჭერი ახლო ინფრაწითელი (NIR) სპექტროსკოპიული მოწყობილობის გამოყენებით, რათა მრავალშრიანი სტრუქტურების ფარგლებში პოლიმერული კომპონენტები იდენტიფიცირებულიყო. ეს მიდგომა უზრუნველყოფს მასალების სწრაფ, არადესტრუქციულ დახასიათებას და ხელს უწყობს კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების უფრო ზუსტ კლასიფიკაციას. მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ შეფუთვის სხვადასხვა კატეგორიაში სხვადასხვა ტიპის პოლიმერები გვხვდება, რაც ხაზს უსვამს მრავალშრიანი სტრუქტურების ცვალებადობას და ეფექტიანი განცალკევებისათვის შესაბამისი გამსწორებული სისტემების შერჩევის მნიშვნელობას. ამ ნაშრომში გამოყენებული NIR-ზე დაფუძნებული მასალების იდენტიფიკაციის სამუშაო სქემა მთლიანობაში წარმოდგენილია მე-3 ნახაზზე.

პლასტმასის იდენტიფიკაცია: სკანირების პროცესი



სურ. 3. მასალების იდენტიფიკაციის სამუშაო სქემის სქემატური წარმოდგენა ხელში დასაჭერი ინფრაწითელი (NIR) სპექტროსკოპიის გამოყენებით.

პროცესი მოიცავს ნიმუშის განთავსებას, სპექტრის მიღებას, მასალის რეალურ დროში კლასიფიკაციას (მაგ., PVC/PP), ასევე მონაცემების აღრიცხვასა და ანალიზს შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებით (PlasTell, Matoha, <https://www.matoha.com/plastics-identification>).

NIR-ზე დაფუძნებული მასალების იდენტიფიკაციის სამუშაო სქემამ შესაძლებელი გახადა გაანალიზებული შეფუთვის ნიმუშებში პოლიმერული კომპონენტის სწრაფი წინასწარი იდენტიფიკაცია და შექმნა პრაქტიკული საფუძველი შემდგომი განცალკევების კვლევებისთვის.

4. მწვანე გამხსნელების სისტემები და მათი ეფექტიანობა. მწვანე გამხსნელებს შორის ეთილლაქტატმა მნიშვნელოვანი ყურადღება მიიპყრო მისი განახლებადი წარმოშობის, შედარებით დაბალი ტოქსიკურობისა და ხელსაყრელი თვისებების გამო. მას შეუძლია ეფექტიანად მოახდინოს პოლიმერული შრეების გაფუჭება ან დაარღვიოს ადჰეზიური ინტერფეისები, თუმცა მისი ეფექტიანობა დამოკიდებულია ლამინატის შემადგენლობაზე და შესაძლოა ოპტიმიზებულ პირობებს მოითხოვდეს. მეთილ-სოიატი, რომელიც მცენარეული ზეთებიდან მიიღება, კიდევ ერთი პერსპექტიული გამხსნელია, რომელიც ხასიათდება კარგი ბიოდეგრადირებადობით, თუმცა პოლიმერებთან შედარებით უფრო რბილი ურთიერთქმედების გამო, შეიძლება დამუშავების უფრო ხანგრძლივ დროს საჭიროებდეს. გამა-ვალეროლაქტონმა განსაკუთრებული პერსპექტიულობა აჩვენა ისეთი რთული მრავალშრიანი სისტემების დამუშავებისას, როგორიცაა სასმელის მუყაოს შეფუთვები, სადაც აუცილებელია რამდენიმე კომპონენტის აღდგენა. მისი უნარი, სელექციურად იმოქმედოს პოლიმერულ შრეებზე სხვა ფრაქციების შენარჩუნებით, მას ღირებულ კანდიდატად აქცევს მოწინავე გადამამუშავების პროცესებში.

ცხრილი 2. ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების (APCPW) განცალკევებისათვის გამოყენებული ძირითადი მწვანე გამხსნელური სისტემების შედარებითი მახასიათებლები

გამხსნელური სისტემა	ძირითადი უპირატესობები	ძირითადი შეზღუდვები	ტიპური მნიშვნელობა APCPW-ის განცალკევებისათვის
ეთილ-ლაქტატი	განახლებადი წარმოშობა, შედარებით დაბალი ტოქსიკურობა, ბიოდეგრადირებადობა, ზოგიერთი ადჰეზივისა და პოლიმერის მიმართ კარგი გამხსნელ-უნარიანობა	არ არის უნივერსალურად ეფექტიანი; შესაძლოა საჭირო გახდეს მომატებული ტემპერატურა და უფრო ხანგრძლივი კონტაქტის დრო	შესაფერისია ზოგიერთი მრავალშრიანი ლამინატის შემთხვევაში სელექციური გაფუჭებისა და ადჰეზიური ზმის დარღვევისათვის

თ. მუმლაძე, ც. თურქაძე, ი. ბოჭორიძე, მ. გაბიაშვილი, ნ. გულიშვილი

მეთილ-სოიატი	ბიოლოგიური წარმოშობის, დაბალი წებადობა, ხელსაყრელი გარემოსდაცვითი პროფილი, უსაფრთხო გამოყენება	შედარებით ნელი მოქმედება; შესაძლოა საჭირო გახდეს პროცესის ინტენსიფიკაცია	პერსპექტიულია პოლიოლეფინებით მდიდარი ლამინატებისა და რბილი განცალკევების პირობებისათვის
გამა-ვალერო-ლაქტონი	განახლებადი პლატფორმული გამხსნელი, კარგი სელექციურობა, პერსპექტიულია რთული სისტემებისთვის	მასშტაბურ სამრეწველო გამოყენებაზე მტკიცებულებები ჯერ კიდევ შეზღუდულია	განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სასმლის მუყაოს ტიპისა და მრავალკომპონენტური შეფუთვისათვის
იონური სითხეები	განცალკევების მაღალი ეფექტიანობა, უმნიშვნელო ორთქლის წნევა, რეგულირებადი თვისებები	ღირებულება, სინთეზის სირთულე, შესაძლო ტოქსიკურობის საკითხები	მიზნობრივი კომპოზიტური განცალკევებისათვის ძლიერი ტექნიკური ეფექტიანობა
ღრმა ევტექტიკური გამხსნელები	შედარებით მარტივი ფორმულირება, რეგულირებადობა, უფრო დაბალი ღირებულება ბევრ იონურ სითხესთან შედარებით, პერსპექტიული „მწვანე“ პროფილი	ევტექტიანობა ძლიერ არის დამოკიდებული შემადგენლობასა და პროცესის დიზაინზე	მეტად პერსპექტიულია PE/Al/PET და მასთან დაკავშირებული მრავალშრიანი ლამინატებისთვის

იონური სითხეები და ღრმა ევტექტიკური გამხსნელები უფრო განვითარებულ გამხსნელურ სისტემებს წარმოადგენს, რომლებიც გამოირჩევა მაღალი რეგულირებადობითა და განცალკევების ძლიერი ეფექტიანობით. იონური სითხეები უზრუნველყოფს მაღალ ეფექტიანობასა და თერმულ სტაბილურობას, თუმცა მათ გამოყენებას შეიძლება ზღუდავდეს ღირებულებასა და ტოქსიკურობასთან დაკავშირებული საკითხები. ღრმა ევტექტიკურმა გამხსნელებმა, რომლებიც ხშირად შედგება შედარებით უვნებელი კომპონენტებისგან,

როგორიცაა ქოლინის ქლორიდი და ორგანული მჟავები, აჩვენებს მაღალი ეფექტიანობა მრავალშრიანი შეფუთვის განცალკევებაში და შემდგომი განვითარებისათვის პერსპექტიულ მიმართულებად მიიჩნევა (Loukodimou et al. 2024a, Loukodimou et al. 2024b).

5. გარემოსდაცვითი მნიშვნელობა და ქართული კონტექსტი.

გარემოსდაცვითი თვალსაზრისით, მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება პასუხობს ცირკულარული ეკონომიკის პრინციპებს, რადგან შესაძლებელს ხდის ღირებული მასალების აღდგენას ისეთი ნარჩენების ნაკადებიდან, რომელთა გადამუშავება სხვა შემთხვევაში რთულია. მეორეული ალუმინის წარმოება მნიშვნელოვნად ნაკლებ ენერგიას მოითხოვს, ვიდრე პირველადი ალუმინის წარმოება, რის გამოც მაღალი სისუფთავის ალუმინის აღდგენა განსაკუთრებით სასარგებლოა. ანალოგიურად, უფრო სუფთა პოლიმერული ფრაქციები ზრდის მათი ხელახალი გამოყენებისა და მასალობრივი ვალორიზაციის შესაძლებლობებს. თუმცა, პროცესის გარემოსდაცვითი ეფექტიანობა დამოკიდებულია არა მხოლოდ განცალკევების ეფექტიანობაზე, არამედ გამხსნელის აღდგენის ხარისხზე, ენერგომომხმარებაზე, ემისიებზე და აღდგენილი პროდუქტების საბაზრო გამოყენებადობაზეც.

ამ მიდგომის მნიშვნელობა საქართველოსთვის არსებითია. ნარჩენების მართვის არსებული სისტემები ჯერ კიდევ ძირითადად განთავსებულია ორიენტირებული, ხოლო რთული შეფუთვის ნარჩენები იშვიათად განიხილება, როგორც აღდგენადი რესურსი. ისეთი მოწინავე გადამუშავების ტექნოლოგიების დანერგვა, როგორიცაა გამხსნელზე დაფუძნებული განცალკევება, შეიძლება ხელი შეუწყოს რესურსეფექტიანობის გაუმჯობესებას და ევროპულ ცირკულარული ეკონომიკის სტრატეგიებთან დაახლოებას. ამავე დროს, პრაქტიკული დანერგვა საჭიროებს ადგილობრივ პირობებზე დაფუძნებულ ნარჩენების დახასიათებას, საპილოტე მასშტაბზე ვალიდაციას, ინფრასტრუქტურის განვითარებას, ტექნიკურ გადამზადებასა და მხარდამჭერ პოლიტიკურ ჩარჩოებს. შესაბამისად, საქართველოსთვის მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება ამ ეტაპზე უფრო სტრატეგიულად მნიშვნელოვან სამეცნიერო-კვლევით და განვითარების მიმართულებად უნდა განიხილებოდეს, ვიდრე დაუყოვნებლივ დასაწერ სამრეწველო გადაწყვეტად.

6. დასკვნა. მწვანე გამხსნელებზე დაფუძნებული განცალკევება წარმოადგენს ალუმინ-პოლიმერული კომპოზიტური შეფუთვის ნარჩენების გადამუშავების პერსპექტიულ და გარემოსდაცვითად გამართულ მიდგომას. განხილული ლიტერატურა აჩვენებს, რომ

თ. მუმლაძე, ც. თურქაძე, ი. ბოჭოიძე, მ. გაბიაშვილი, ნ. გულიშვილი

სხვადასხვა გამხსნელურ სისტემას შეუძლია ეფექტიანად შეასუსტოს ინტერფეისული ბმა და უზრუნველყოს მრავალშრიანი სტრუქტურების განცალკევება მასალის ხარისხის შენარჩუნებით. შესწავლილ სისტემებს შორის განსაკუთრებით პერსპექტიულად მიიჩნევა ბიოლოგიური წარმოშობის გამხსნელები და ღრმა ევტექტიკური გამხსნელები, მათი ტექნიკური ეფექტიანობისა და ეკოლოგიურად ხელსაყრელი პროფილის ბალანსის გამო.

მიუხედავად იმისა, რომ არც ერთი გამხსნელური სისტემა არ არის უნივერსალურად გამოსადეგი, მიზნობრივად მორგებული გამხსნელური სტრატეგიების განვითარება მნიშვნელოვან შესაძლებლობებს ქმნის როგორც ალუმინის, ისე პოლიმერული ფრაქციების აღდგენის გასაუმჯობესებლად. საქართველოსთვის ეს სფერო წარმოადგენს მდგრადი ნარჩენების მართვისა და ცირკულარული ეკონომიკის პრაქტიკის განვითარების მნიშვნელოვან მიმართულებას. შემდგომი კვლევები უნდა იყოს ორიენტირებული ადგილობრივი მნიშვნელობის ნარჩენთა ნაკადებზე, გამხსნელების შერჩევაზე, პროცესის ოპტიმიზაციაზე, გამხსნელების აღდგენასა და საპილოტე მასშტაბზე დანერგვაზე.

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის“ მხარდაჭერით [გრანტის ნომერი - FR-24-2116].