

NANOPOROUS CARBON DERIVED FROM BREAKFAST WASTE AS SUSTAINABLE HYDROGEN STORAGE MATERIALS

Kostoglou N.^{1,2}, Steriotis T.A.³, Spirk S.⁴, Gupta R.K.⁵, Paris O.⁶, Mitterer C.², Rebholz C.⁷, and Stock S.^{6,8}

¹*Institute of Geoenergy, Foundation for Research & Technology – Hellas, Chania, Greece, Email: nkostoglou@ig.forth.gr*

²*Department of Materials Science, Technical University of Leoben, Leoben, Austria*

³*Institute of Nanoscience & Nanotechnology, National Center for Scientific Research “Demokritos”, Athens, Greece*

⁴*Institute of Bioproducts & Paper Technology, Graz University of Technology, Graz, Austria*

⁵*Department of Chemistry, Pittsburg State University, Pittsburg, Kansas, USA*

⁶*Department of Physics, Mechanics & Electrical Engineering, Technical University of Leoben, Leoben, Austria*

⁷*Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, University of Cyprus, Nicosia, Cyprus*

⁸*Department of Chemistry & Physics of Materials, University of Salzburg, Salzburg, Austria*

ABSTRACT

The transition towards a low-carbon energy landscape requires the development of efficient and sustainable hydrogen (H₂) storage technologies. Nanoporous carbons represent promising adsorbents due to their high specific surface area, chemical stability and relatively low production cost. At the same time, the utilization of organic waste as precursor materials offers significant environmental and circular-economy benefits. In this work, the conversion of common breakfast bio-waste such as spent coffee grounds, orange peels and used tea leaves into nanoporous activated carbons is presented. The materials are synthesized through thermochemical carbonization followed by chemical activation using potassium hydroxide (KOH). This process results in highly microporous carbons with very large specific surface areas (up to 3300 m²/g) and significant pore volumes (up to 1.6 cm³/g), which are favorable for H₂ adsorption [1,2]. The materials were characterized using a combination of advanced techniques including gas sorption analysis, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray diffraction and small-angle X-ray scattering. H₂ adsorption measurements performed under cryogenic conditions (77 K) reveal excess hydrogen uptakes of up to ~6 wt.% at pressures of 30-40 bar, while total storage capacities may exceed 9 wt.% at 100 bar, depending on the pore structure characteristics of the materials [1,2]. These results demonstrate that widely available organic waste streams can be transformed into high-value nanoporous carbons for H₂ storage applications, contributing simultaneously to waste valorization, circular economy strategies and the advancement of clean energy technologies.

References

[1] S. Stock, N. Kostoglou, J. Selinger, S. Spirk, C. Tampaxis, G. Charalambopoulou, T. Steriotis, C. Rebholz, C. Mitterer, O. Paris, Coffee Waste-Derived Nanoporous Carbons for Hydrogen Storage, *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5, 10915–10926.

[2] S. Stock, C.O.W. Trost, M. Seyffertitz, J. Selinger, R.K. Gupta, C. Tampaxis, T. Steriotis, C. Rebholz, C. Mitterer, O. Paris, N. Kostoglou, Transforming breakfast bio-waste into hydrogen storage materials, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 114, 519–533.

ΝΑΝΟΠΟΡΩΔΕΙΣ ΑΝΘΡΑΚΕΣ ΑΠΟ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ ΠΡΩΙΝΟΥ ΩΣ ΒΙΩΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Kostoglou N.^{1,2}, Steriotis T.A.³, Spirk S.⁴, Gupta R.K.⁵, Paris O.⁶, Mitterer C.², Rebholz C.⁷,
and Stock S.^{6,8}

¹*Institute of Geoenergy, Foundation for Research & Technology – Hellas, Chania, Greece, Email: nkostoglou@ig.forth.gr*

²*Department of Materials Science, Technical University of Leoben, Leoben, Austria*

³*Institute of Nanoscience & Nanotechnology, National Center for Scientific Research “Demokritos”, Athens, Greece*

⁴*Institute of Bioproducts & Paper Technology, Graz University of Technology, Graz, Austria*

⁵*Department of Chemistry, Pittsburg State University, Pittsburg, Kansas, USA*

⁶*Department of Physics, Mechanics & Electrical Engineering, Technical University of Leoben, Leoben, Austria*

⁷*Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, University of Cyprus, Nicosia, Cyprus*

⁸*Department of Chemistry & Physics of Materials, University of Salzburg, Salzburg, Austria*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μετάβαση προς ένα ενεργειακό τοπίο χαμηλών εκπομπών άνθρακα απαιτεί την ανάπτυξη αποδοτικών και βιώσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου. Τα νανοπορώδη υλικά άνθρακα αποτελούν ελκυστικούς υποψήφιους προσροφητές λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειας, της σταθερότητας και του χαμηλού κόστους παραγωγής τους. Παράλληλα, η αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων ως πρώτων υλών προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μετατροπή βιοαποβλήτων που προέρχονται από καθημερινά υπολείμματα πρωινού, όπως χρησιμοποιημένους κόκκους καφέ, φλούδες πορτοκαλιού και χρησιμοποιημένα φύλλα τσαγιού, σε νανοπορώδεις ενεργούς άνθρακες μέσω θερμοχημικής ανθρακοποίησης και χημικής ενεργοποίησης με υδροξείδιο του καλίου (ΚΟΗ). Η διαδικασία οδηγεί στη δημιουργία μικροπορώδους δομής με πολύ υψηλές ειδικές επιφάνειες (έως 3300 m²/g) και σημαντικούς όγκους πόρων (έως 1.6 cm³/g), χαρακτηριστικά που ευνοούν την προσρόφηση υδρογόνου [1,2]. Ο χαρακτηρισμός των υλικών πραγματοποιήθηκε με συνδυασμό τεχνικών όπως προσρόφηση αερίων, ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), φασματοσκοπία Raman, περίθλαση ακτινών X (XRD) και σκέδαση μικρών γωνιών ακτινών X (SAXS). Οι μετρήσεις προσρόφησης υδρογόνου σε κρυογονικές συνθήκες (77 K) δείχνουν ότι τα υλικά παρουσιάζουν περίσσεια προσρόφησης (excess adsorption) έως περίπου 6 wt.% σε πιέσεις 30-40 bar, ενώ η συνολική χωρητικότητα μπορεί να υπερβαίνει το 9 wt.% σε 100 bar, ανάλογα με τη δομή των πόρων [1,2]. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι τα οργανικά βιοαπόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε υψηλής προστιθέμενης αξίας νανοπορώδη υλικά για εφαρμογές αποθήκευσης υδρογόνου, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην κυκλική οικονομία και στην ανάπτυξη τεχνολογιών καθαρής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

[1] S. Stock, N. Kostoglou, J. Selinger, S. Spirk, C. Tampaxis, G. Charalambopoulou, T. Steriotis, C. Rebholz, C. Mitterer, O. Paris, Coffee Waste-Derived Nanoporous Carbons for Hydrogen Storage, *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5, 10915–10926.

[2] S. Stock, C.O.W. Trost, M. Seyffertitz, J. Selinger, R. K. Gupta, C. Tampaxis, T. Steriotis, C. Rebholz, C. Mitterer, O. Paris, N. Kostoglou, Transforming breakfast bio-waste into hydrogen storage materials, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 114, 519–533.