

Sustainable and Pseudo-Strain-Hardening Metakaolin and Fly Ash–Based Fiber-Reinforced Geopolymer Composites Activated with Potassium: Development and Carbon Footprint Analysis

PROBLEMA

Los compuestos cementicios reforzados con fibras de alto desempeño mejoran la ductilidad y el control de fisuras, pero dependen de grandes cantidades de cemento Portland, cuya producción genera elevadas emisiones de CO₂. Los geopolímeros basados en metakaolín y ceniza volante representan una alternativa más sostenible; sin embargo, existe información limitada sobre sistemas activados con potasio y sobre el efecto de distintos tipos de fibras en su comportamiento mecánico y ambiental. Por ello, es necesario desarrollar compuestos geopoliméricos con mejor desempeño estructural y menor impacto climático.

OBJETIVO GENERAL

El estudio busca desarrollar y evaluar compuestos geopoliméricos reforzados con fibras, elaborados con metakaolín y ceniza volante activados con potasio, mediante ensayos de trabajabilidad, resistencia a compresión y tracción, así como análisis de huella de carbono mediante Life Cycle Assessment (LCA), para determinar su desempeño mecánico y ambiental.

PROPUESTA

Se propone desarrollar compuestos geopoliméricos reforzados con fibras utilizando una mezcla de metakaolín y ceniza volante activada con hidróxido de potasio. Inicialmente se evalúan diferentes contenidos de ceniza volante y relaciones agua/sólidos para identificar la composición óptima del mortero.

Posteriormente, se incorpora humo de sílice y distintos tipos de fibras, incluyendo PVA, polipropileno y polietileno, tanto de forma individual como en sistemas híbridos. Los materiales se caracterizan mediante ensayos de trabajabilidad, resistencia a compresión y tracción uniaxial.

Paralelamente, se desarrolla un análisis de ciclo de vida para cuantificar la huella de carbono y compararla con materiales cementicios convencionales.

RESULTADOS

Los resultados demostraron que la trabajabilidad de los morteros geopoliméricos aumentó con mayores contenidos de ceniza volante y relaciones agua/sólidos más elevadas. La mezcla óptima estuvo compuesta por 50 % de metakaolín y 50 % de ceniza volante, con una relación agua/sólidos de 2, alcanzando un diámetro de flujo de 180.38 mm y una resistencia a compresión de 10.81 MPa. La incorporación de fibras incrementó significativamente la resistencia a compresión, obteniéndose valores entre 18 y 21 MPa. Las fibras de PVA presentaron el mejor desempeño debido a su mayor adherencia con la matriz geopolimérica.

En los ensayos de tracción, varias mezclas exhibieron comportamiento pseudo-strain-hardening, caracterizado por la formación de múltiples microfisuras y el aumento de capacidad resistente después de la primera fisura. La mayor capacidad de deformación a tracción fue de 0.54 %, obtenida con una combinación de 1 % de PVA y 0.75 % de polipropileno.

El análisis de ciclo de vida mostró que los compuestos geopoliméricos presentaron huellas de carbono entre 805.71 y 1277.83 kg CO₂-eq/m³, inferiores a las del ECC de referencia. El principal contribuyente al impacto ambiental fue la producción de hidróxido de potasio utilizado como activador alcalino.

CONCLUSIONES

- Los compuestos geopoliméricos activados con potasio desarrollados presentaron comportamiento pseudo-strain-hardening y mejoras significativas en resistencia y capacidad de deformación a tracción.
- La huella de carbono fue menor que la de los ECC convencionales; sin embargo, la producción de hidróxido de potasio fue el principal contribuyente al impacto ambiental.

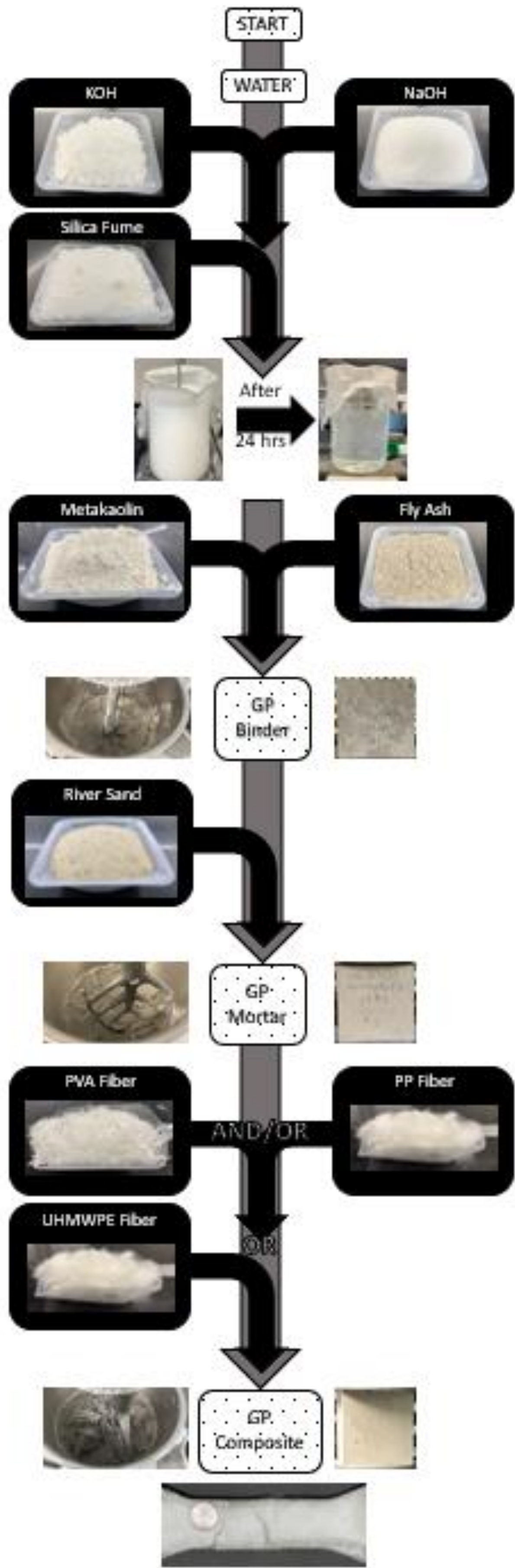


Figure 2. Geopolymer manufacturing.

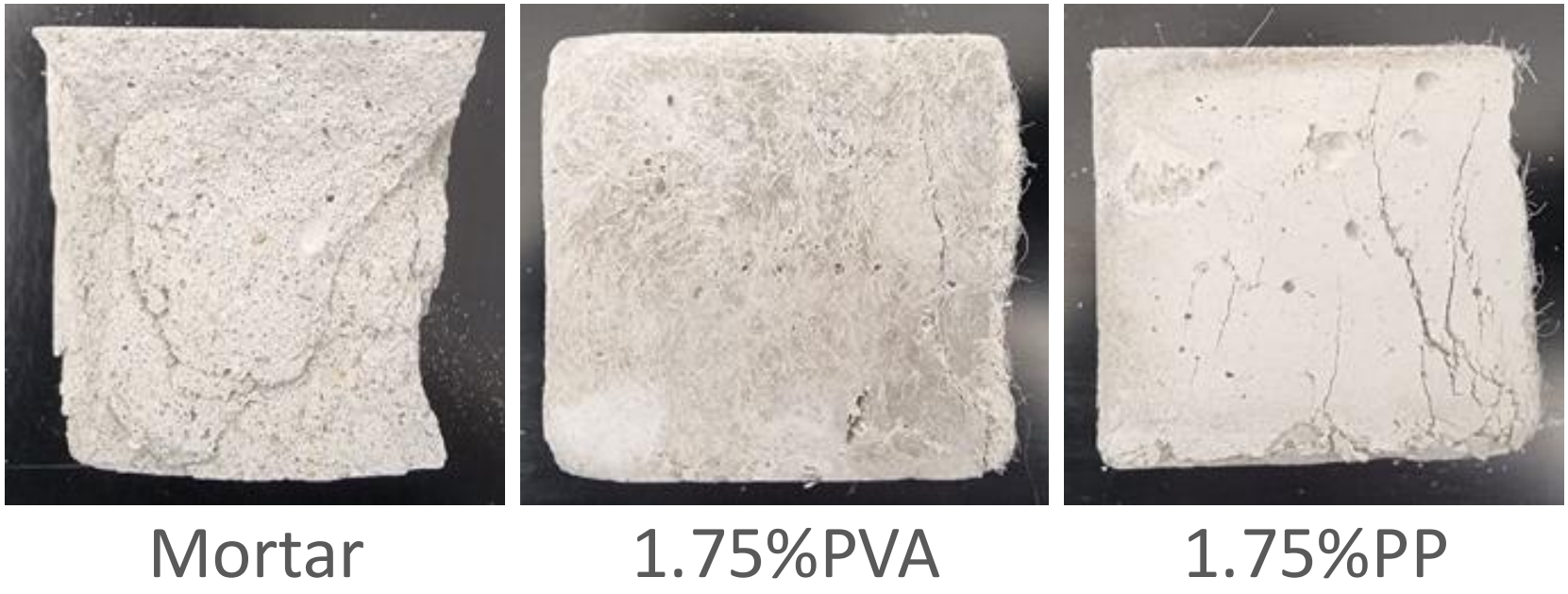


Figure 9. Compressive Strength Failure Mode of the K321 GP Mortar and Composites.

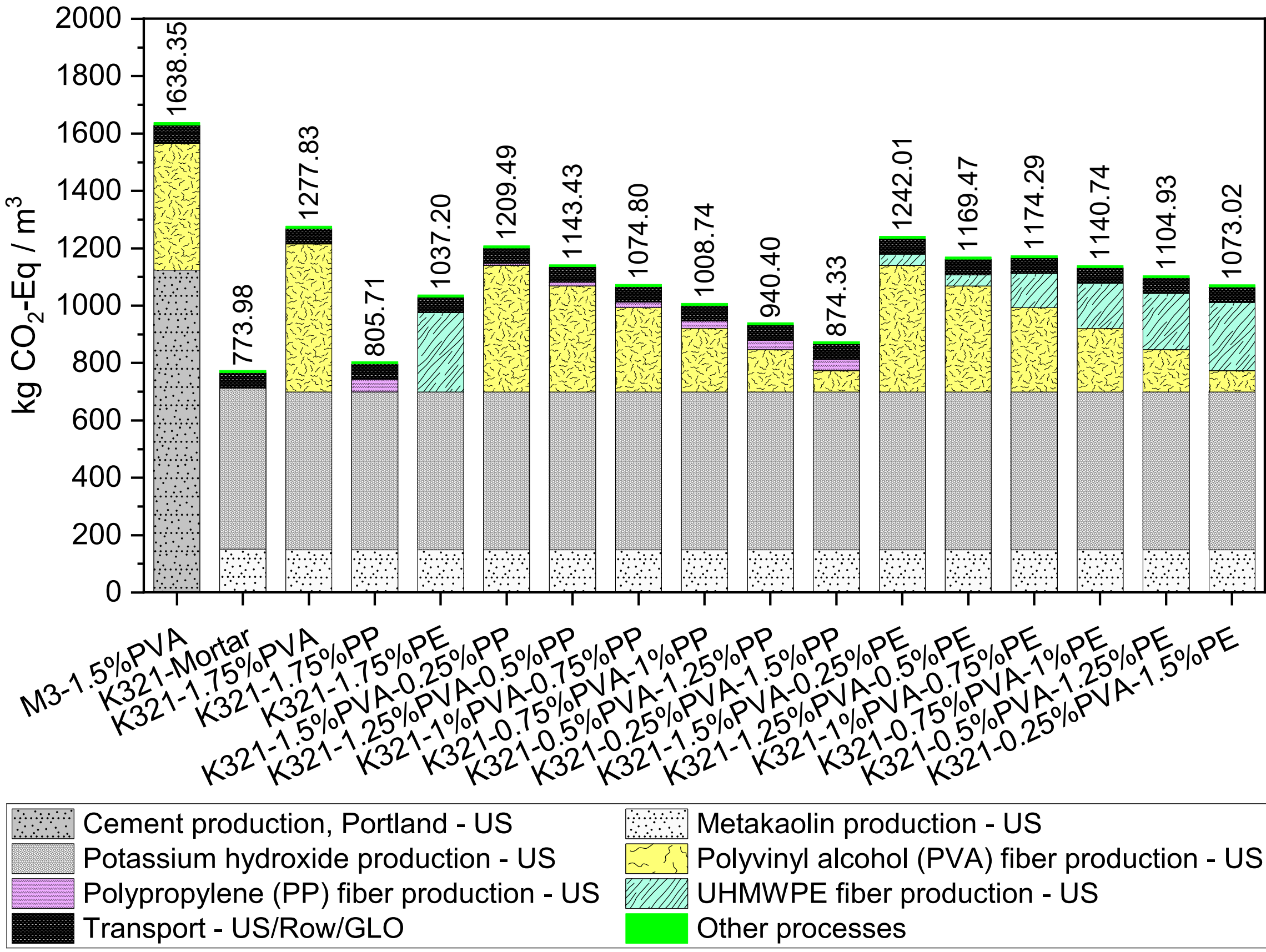


Figure 13. Result of GWP100 life cycle assessment for 1 m³ of ECC, mortar and FRGCs.