

Produksi tahunan kertas dan karton dunia diperkirakan mencapai 400 juta ton dan akan meningkat menjadi 550 juta ton pada tahun 2050, yang berpotensi meningkatkan produksi *pulp and paper mill sludge* (PPMS) sebesar 48–86% dibandingkan produksi aktual. PPMS yang dihasilkan rata-rata sekitar 50 kg lumpur kering per ton kertas, belum memiliki opsi pengelolaan yang optimal. Oleh karena itu, konversi termokimia seperti *hydrothermal carbonization* (HTC) dan pirolisis menjadi alternatif yang menarik untuk pemanfaatan energi terbarukan.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kelayakan teknis dan ekonomi untuk menilai potensi pemanfaatan PPMS melalui proses pirolisis dan HTC. Pemilihan teknologi termokimia ini dilatarbelakangi oleh upaya global dalam mendorong terciptanya industri hijau yang berkelanjutan

Pirolisis PPMS dilakukan pada suhu 300, 350, dan 400°C dengan waktu tinggal 10, 30, dan 60 menit menggunakan reaktor *fixed-bed* skala bench. Produksi *yield biochar* berada pada kisaran 54,4–61,6% dan menurun seiring meningkatnya suhu. *Energy recovery* tertinggi yaitu 60.36% diperoleh pada suhu 300°C dan waktu tinggal 10 menit.

Pada proses HTC, PPMS diolah pada suhu 200–280°C dengan kenaikan 20°C, kelembapan 50–90%, durasi 10–50 menit, dan pH 3–11. *Response Surface Methodology* (RSM) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter operasi terhadap rendemen hidrochar (HC) dan pemulihan energi. Hasil menunjukkan *yield hydrochar* maksimum sebesar 41% dengan nilai kalor (HHV) 12,6 MJ/kg diperoleh pada suhu 240°C, durasi 30 menit, pH 7, dan kelembapan 50%. HHV tertinggi mencapai 14,2 MJ/kg pada suhu 240°C, durasi 30 menit, pH 11, dan kelembapan 70%

Berdasarkan *net energy recovery*, maka pembakaran langsung (*direct burning*) menunjukkan nilai tertinggi yaitu 69,7%, diikuti oleh pirolisis sebesar 29,6%, dan HTC 13%. Sementara analisis kelayakan ekonomi, pirolisis menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan HTC. Pirolisis memiliki NPV lebih tinggi, IRR sebesar 19,98% yang melebihi HTC (14,81%), serta periode pengembalian modal yang lebih cepat, yaitu 8 tahun dibandingkan HTC yang memerlukan 12 tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa pirolisis lebih menguntungkan, efisien dalam mengonversi modal menjadi keuntungan, dan memiliki risiko investasi yang lebih rendah

Kata kunci: *pulp and paper mill sludge* (PPMS); *hydrothermal carbonization* (HTC); pirolisis; analisis kelayakan ekonomi

The annual global production of paper and cardboard is estimated at 400 million tons and is projected to reach 550 million tons by 2050, potentially increasing the production of pulp and paper mill sludge (PPMS) by 48–86% compared to current levels. PPMS, which is generated at an average of approximately 50 kg of dry sludge per ton of paper produced, currently lacks optimal management options. Therefore, thermochemical conversion processes such as hydrothermal carbonization (HTC) and pyrolysis have emerged as attractive alternatives for renewable energy utilization.

This study focuses on evaluating the technical and economic feasibility to assess the potential use of PPMS through pyrolysis and HTC processes. The selection of these thermochemical technologies is driven by global efforts to promote the realization of a sustainable green industry.

PPMS pyrolysis was conducted at temperatures of 300, 350, and 400°C with residence times of 10, 30, and 60 minutes using a bench-scale fixed-bed reactor. The resulting biochar yields ranged from 54.4% to 61.6%, decreasing with increasing temperature. The highest energy recovery, approximately 60.36%, was obtained at 300°C with a residence time of 10 minutes.

In the HTC process, PPMS was treated at temperatures ranging from 200–280°C with 20°C increments, moisture content of 50–90%, durations of 10–50 minutes, and pH values of 3–11. Response Surface Methodology (RSM) was applied to evaluate the effects of operational parameters on hydrochar (HC) yield and energy recovery. The results showed that the maximum hydrochar yield of 41% with a higher heating value (HHV) of 12.6 MJ/kg was achieved at 240°C, 30 minutes, pH 7, and 50% moisture. The highest HHV, reaching 14.2 MJ/kg, was obtained at 240°C, 30 minutes, pH 11, and 70% moisture.

Based on net energy recovery, direct burning shows the highest value at 69.7%, followed by pyrolysis at 29.6%, and HTC at 13%. Based on the economic feasibility analysis, pyrolysis demonstrated superior performance compared to HTC. Pyrolysis had a higher NPV, an IRR of 19.98% which exceeds that of HTC (14.81%), and a shorter payback period of 8 years compared to HTC's 12 years. These findings indicate that pyrolysis is more profitable, efficient in converting capital into profit, and carries lower investment risks.

Keywords: *pulp and paper mill sludge (PPMS); hydrothermal carbonization (HTC); pyrolysis; economic feasibility*