

Peningkatan intensitas budidaya perairan menyebabkan akumulasi limbah organik dan nutrisi, terutama senyawa nitrogen, yang berpotensi menurunkan kualitas perairan dan memicu eutrofikasi. *Constructed wetland* (CW) banyak dikembangkan sebagai teknologi fitoremediasi karena bersifat ramah lingkungan, efisien, dan berbiaya relatif rendah. Namun, desain CW umumnya masih mengacu pada nilai *hydraulic loading rate* (HLR) yang rendah, sehingga kurang sesuai untuk limbah akuakultur dengan debit tinggi dan fluktuatif. Penerapan HLR yang lebih tinggi dari kriteria desain konvensional berpotensi menurunkan waktu tinggal hidraulik dan memengaruhi kinerja proses biologis pengolahan nitrogen. Oleh karena itu, diperlukan kajian mengenai kinerja CW pada HLR menengah–tinggi dengan pengelolaan hidraulik yang adaptif guna meningkatkan efisiensi penyisihan nitrogen pada limbah akuakultur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *horizontal subsurface flow constructed wetland* (HSSF-CW) yang ditanami *Cyperus haspan* dan dioperasikan dengan sistem resirkulasi pada variasi HLR sebesar 0,031; 0,063; 0,094; dan 0,125 m³/m²·hari dalam mengolah air limbah akuakultur. Evaluasi difokuskan pada pengaruh variasi HLR yang melebihi kriteria desain terhadap efisiensi penghilangan NH₃-N, NO₂⁻-N, dan NO₃⁻-N, serta kemampuan sistem dalam mempertahankan kinerja pengolahan nitrogen secara stabil selama periode pengamatan tujuh hari. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi HLR yang memberikan performa paling optimal dalam pengendalian dan transformasi nitrogen pada sistem HSSF-CW beraliran resirkulasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi HLR berpengaruh nyata terhadap transformasi nitrogen pada sistem HSSF-CW resirkulasi dengan *Cyperus haspan*. Efisiensi penurunan NH₃-N pada HLR 0,031; 0,063; 0,094; dan 0,125 m³/m²·hari masing-masing berada pada kisaran 75,17–76,78%; 78,08–79,08%; 84,07–85,92%; dan 80,35–83,78%, yang menunjukkan proses nitrifikasi berlangsung aktif meskipun akumulasi NO₂⁻-N dan NO₃⁻-N meningkat seiring kenaikan HLR akibat denitrifikasi yang belum optimal. Penerapan resirkulasi menghasilkan kinerja penyisihan nitrogen yang tinggi pada seluruh variasi HLR pada fase awal operasi (hari ke-2–3) sebagai respons transien sistem, namun kinerja tersebut tidak dapat dipertahankan secara konsisten karena efisiensi mulai menurun setelah hari ke-3 dan mencapai 0% pada hari ke-5 akibat berkurangnya waktu tinggal hidraulik dan efektivitas proses biologis dalam operasi berkelanjutan. Secara keseluruhan, HLR 0,094 m³/m²·hari merupakan kondisi paling optimal karena menghasilkan efisiensi penurunan NH₃-N tertinggi dan paling stabil (84,07–85,92%), dengan akumulasi NO₂⁻-N dan NO₃⁻-N yang relatif lebih terkendali dibandingkan HLR yang lebih rendah (0,031–0,063 m³/m²·hari) maupun HLR yang lebih tinggi (0,125 m³/m²·hari).

Kata kunci: *Subsurface flow constructed wetland*, *Hydraulic loading rate*, Sistem resirkulasi, Penghilangan nitrogen, *Cyperus haspan*, Limbah akuakultur.

The increasing intensity of aquaculture practices leads to the accumulation of organic waste and nutrients, particularly nitrogen compounds, which have the potential to degrade water quality and trigger eutrophication. Constructed wetlands (CW) have been widely developed as a phytoremediation technology due to their environmentally friendly nature, efficiency, and relatively low cost. However, CW design generally still refers to low hydraulic loading rate (HLR) values, making it less suitable for aquaculture wastewater with high and fluctuating discharge. The application of HLR values higher than conventional design criteria may reduce hydraulic retention time and affect the performance of biological nitrogen removal processes. Therefore, studies are needed to evaluate CW performance under medium–high HLR conditions with adaptive hydraulic management to improve nitrogen removal efficiency in aquaculture wastewater.

This study aimed to evaluate the performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF-CW) planted with *Cyperus haspan* and operated with a recirculation system under HLR variations of 0.031; 0.063; 0.094; and 0.125 m³/m²·day for treating aquaculture wastewater. The evaluation focused on the effect of HLR values exceeding conventional design criteria on the removal efficiency of NH₃–N, NO₂[–]–N, and NO₃[–]–N, as well as the system's ability to maintain stable nitrogen treatment performance during a seven-day observation period. In addition, this study aimed to identify the HLR level that provides the most optimal performance in controlling and transforming nitrogen in a recirculating HSSF-CW system.

The results showed that HLR variation significantly influenced nitrogen transformation in the recirculating HSSF-CW planted with *Cyperus haspan*. The removal efficiencies of NH₃–N at HLRs of 0.031; 0.063; 0.094; and 0.125 m³/m²·day ranged from 75.17–76.78%; 78.08–79.08%; 84.07–85.92%; and 80.35–83.78%, respectively, indicating that nitrification occurred actively, although NO₂[–]–N and NO₃[–]–N accumulation increased with higher HLR due to suboptimal denitrification. The recirculation system produced high nitrogen removal performance across all HLR variations during the early operational phase (days 2–3) as a transient system response; however, this performance could not be maintained consistently, as efficiency declined after day 3 and reached 0% on day 5 due to reduced hydraulic retention time and decreased effectiveness of biological processes during prolonged operation. Overall, an HLR of 0.094 m³/m²·day was the most optimal condition, yielding the highest and most stable NH₃–N removal efficiency (84.07–85.92%), with relatively more controlled accumulation of NO₂[–]–N and NO₃[–]–N compared to lower HLRs (0.031–0.063 m³/m²/day) and the higher HLR (0.125 m³/m²/day).

Keywords: Subsurface flow constructed wetland. Hydraulic loading rate, Recirculating system, Nitrogen removal, *Cyperus haspan*, Aquaculture wastewater