

INTISARI

Taillings merupakan limbah hasil ekstraksi bijih mineral yang masih mengandung sisa logam berat dan bahan kimia berpotensi mencemari lingkungan. Di PT Freeport Indonesia, tailing dialirkan dari dataran tinggi ke *Modified Ajkwa Deposition Area* (ModADA) yang dibatasi oleh sistem *tanggul ganda*. Sistem ini meningkatkan keamanan penyimpanan limbah dengan mencegah kegagalan struktur tanggul, mengurangi pencemaran lingkungan, dan mendukung reklamasi lahan tambang. Proses pembuangan tailing mengubah karakteristik tanah, seperti meningkatkan kepadatan dan menurunkan porositas serta kandungan unsur hara. Tujuan penelitian ini adalah (1) mengidentifikasi jenis Collembola di area reklamasi Tanggul Ganda dan di hutan alam, (2) mengetahui keanekaragaman di area reklamasi tailing Tanggul Ganda dan hutan alam LIP Kuala Kencana, (3) mengetahui potensi Collembola sebagai bioindikator evaluasi kegiatan reklamasi. Pemilihan plot ditentukan secara sengaja pada 3 area reklamasi dan 1 area hutan alam dan berdasarkan luasan 1% yaitu 26.800 m² (total luasan 2.680.000 m²). Pada masing-masing area dibuat 7 plot utama berukuran 20 x 20 m dan 5 subplot berukuran 1 x 1 m dengan pengambilan sampel sebanyak 6 ulangan sehingga diperoleh 840 plot sampel.

Individu Collembola sebanyak 7.035 individu yang berasal dari 4 ordo dan 9 famili yang berhasil dikumpulkan, dengan dominasi oleh famili Entomobryidae dan Isotomidae dari ordo Entomobryomorpha. Indeks keanekaragaman Shannon-Wiener menunjukkan nilai tertinggi pada hutan alam ($H' = 3,38$) dan reklamasi 21 tahun ($H' = 3,32$), menunjukkan kondisi ekosistem yang lebih stabil dan mendekati alami. Indeks kemerataan (E) tinggi ditemukan pada hutan alam dan reklamasi 21 dan 10 tahun, menunjukkan distribusi individu yang merata tanpa dominansi spesies tertentu. Sementara itu, area reklamasi 14 tahun menunjukkan kemerataan sedang dan dominansi tinggi akibat kondisi lingkungan yang tergenang dan kurang mendukung dekomposisi organik. Hasil uji Kruskal-Wallis dan Dunn Test menunjukkan perbedaan signifikan antara hutan alam dan area reklamasi, namun tidak terdapat perbedaan signifikan antar tingkat usia reklamasi.

Mengevaluasi perkembangan vegetasi, keanekaragaman Collembola, dan kualitas tanah pada tiga area reklamasi (10, 14, dan 21 tahun) dibandingkan dengan hutan alam. Hasil menunjukkan bahwa meskipun jumlah individu tumbuhan lebih tinggi di area reklamasi, keanekaragaman spesies lebih besar di hutan alam, terutama pada fase pohon. Keanekaragaman meningkat seiring usia reklamasi, tetapi struktur komunitas vegetasi dan fauna tanah belum menyamai hutan alami. Keragaman $H' = 2,59$ pada area reklamasi 10 tahun dan $H' = 1,94$ pada area reklamasi 14 tahun; kedua area ini lebih rendah keragamannya daripada area reklamasi 21 tahun dan hutan alam. Famili Entomobryidae dan Isotomidae mendominasi area reklamasi yang lebih tua, sedangkan Sminthuridae dan Neelidae lebih banyak ditemukan di hutan alam. Hasil *Canocical Correspondence Analysis* (CCA) menunjukkan bahwa keberadaan Collembola berhubungan erat dengan parameter kesuburan tanah seperti kandungan nitrogen, fosfor, bahan organik, KTK, dan



pH. Famili *Onychiuridae* menunjukkan jumlah yang lebih melimpah di area dengan kandungan nitrogen tinggi dan kondisi ini ditemukan di plot area reklamasi 21 tahun, sedang di plot area 14 tahun famili *Entomobryoidea* lebih dipengaruhi oleh kondisi keasaman tanah (pH). Famili *Bourletiellidae* dan *Neelidae* menunjukkan respons yang serupa terhadap faktor kadar air, dengan dominasi respon di area hutan alam sebagai kontrol. Kandungan P total memiliki hubungan dengan keberadaan *Isotomidae* yang lebih dominan ditemukan di area reklamasi 14 tahun, famili *Poduridae* terlihat memiliki hubungan dengan kandungan bahan organik tanah dan karbon; sedang famili *Onychiuridae* menunjukkan hubungan dengan KTK.

Hasil *Canocical Correspondence Analysis* (CCA) menunjukkan bahwa kelompok *Neanuridae* dan *Entomobryidae* lebih cenderung terhubung dengan nilai positif pada CCA1, sedangkan *Neelidae* lebih terkait dengan nilai negatif pada CCA1. Nilai positif menjelaskan hubungan yang lebih kuat dengan Hg, sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa *Neelidae* lebih dipengaruhi oleh Cu. Logam Pb di area reklamasi memengaruhi *Entomobryidae* dan *Poduridae*. Hubungan ini paling potensial ditemukan di area reklamasi yang berusia 21 tahun, dibandingkan dengan area yang lebih muda. *Neanuridae* menunjukkan respon terhadap Hg, terutama di area reklamasi 14 tahun, di mana kandungan Hg lebih rendah sehingga jumlah individunya lebih tinggi dibandingkan dengan area reklamasi 21 tahun. Beberapa famili menunjukkan toleransi terhadap logam berat (Hg, Cu, Pb), dengan variasi distribusi yang mencerminkan tingkat pencemaran dan umur reklamasi.

Indeks kesamaan spesies menunjukkan bahwa reklamasi 21 tahun memiliki kemiripan komunitas tertinggi dengan hutan alam (84%). Klasterisasi menunjukkan bahwa area reklamasi yang lebih tua semakin menyerupai hutan alam dalam struktur komunitas Collembola, menandakan bahwa waktu dan kondisi lingkungan berperan penting dalam proses suksesi ekologis. Secara keseluruhan menunjukkan bahwa proses reklamasi memerlukan waktu panjang untuk mendekati kondisi ekosistem alami, dan Collembola dapat digunakan sebagai indikator bioekologis untuk memantau keberhasilan reklamasi lahan pasca tambang.

Kata Kunci: Tailing, Reklamasi, Bioindikator, Collembola

Abstract

Tailing is a waste product from the extraction of mineral ores that still contains residual heavy metals and chemicals with the potential to pollute the environment. At PT Freeport Indonesia, tailings are transported from highland areas to the Modified Ajkwa Deposition Area (ModADA), which is enclosed by a dual embankment system. This system enhances the safety of waste storage by preventing embankment failure, reducing environmental contamination, and supporting mine land reclamation. The disposal of tailings alters soil characteristics, such as increasing compaction and decreasing porosity and nutrient content. This study aims to: (1) identify Collembola species in the dual embankment reclamation areas and in natural forest, (2) assess the species diversity in the tailings reclamation areas and the natural forest at LIP Kuala Kencana, and (3) evaluate the potential of Collembola as bioindicators for reclamation activities. Plot selection was conducted purposively across three reclamation areas and one natural forest area, based on a coverage of 1% of the total area (26,800 m² of 2,680,000 m²). In each area, seven main plots (20 × 20 m) and five subplots (1 × 1 m) were established, with six sampling replications, resulting in a total of 840 sample plots.

A total of 7,035 Collembola individuals were collected, representing 4 orders and 9 families, with Entomobryidae and Isotomidae (order Entomobryomorpha) being the most dominant. The Shannon-Wiener diversity index showed the highest values in the natural forest ($H' = 3.38$) and the 21-year reclamation area ($H' = 3.32$), indicating more stable and near-natural ecosystem conditions. High evenness index (E) values were also found in the natural forest and the 21- and 10-year reclamation areas, reflecting an even distribution of individuals without species dominance. In contrast, the 14-year reclamation area exhibited moderate evenness and high dominance, likely due to waterlogging and poor organic matter decomposition. Kruskal-Wallis and Dunn test results revealed significant differences between the natural forest and reclamation areas, but no significant differences among the different reclamation ages.

Vegetation development, Collembola diversity, and soil quality were evaluated in the three reclamation sites (10, 14, and 21 years) and compared to the natural forest. Although the number of individual plants was higher in the reclamation areas, species diversity was greater in the natural forest, particularly at the tree stage. Species diversity increased with reclamation age, although the community structure of vegetation and soil fauna still lagged behind that of the natural ecosystem. Collembola were identified as important indicators in assessing soil recovery post-reclamation. Entomobryidae and Isotomidae were dominant in older reclamation areas, while Sminthuridae and Neelidae were more abundant in the natural forest. Canonical Correspondence Analysis (CCA) showed strong associations between Collembola presence and soil fertility parameters such as nitrogen, phosphorus, organic matter, cation exchange capacity (CEC), and pH. Onychiuridae was closely related to total nitrogen (Ntot), with higher abundance in the 21-year reclamation plots. In the 14-year plots, Entomobryoidae were more influenced by soil acidity (pH). Bourletiellidae and Neelidae responded similarly to moisture content, mainly in the natural forest control plots. Total phosphorus was linked to the presence of Isotomidae, especially in the 14-year reclamation area, while Poduridae correlated with soil organic matter and carbon, and Onychiuridae with cation exchange capacity.

The Canonical Correspondence Analysis (CCA) results indicated that Neanuridae and Entomobryidae were more strongly associated with positive CCAI values, while Neelidae was linked to negative CCAI values. Positive values corresponded to stronger relationships with



mercury (Hg), while negative values suggested Neelidae was more influenced by copper (Cu). Lead (Pb) in reclamation soils influenced Entomobryidae and Poduridae, particularly in the 21-year reclamation area. Neanuridae responded to Hg levels, being more abundant in the 14-year area where Hg content was lower than in the 21-year area. Several families exhibited tolerance to heavy metals (Hg, Cu, Pb), with distribution variations reflecting contamination levels and reclamation age.

Species similarity indices showed that the 21-year reclamation area had the highest community similarity with the natural forest (84%). Cluster analysis indicated that older reclamation areas more closely resembled the natural forest in Collembola community structure, emphasizing that time and environmental conditions are key factors in ecological succession. Overall, the study demonstrates that reclamation requires a long-term process to approximate natural ecosystem conditions, and Collembola can serve as effective bioecological indicators for monitoring post-mining land reclamation success.

Keywords: Tailing, Reclamation, Bioindicator, Collembola