

BAB 2

Tinjauan Pustaka

Menurut UU Minerba No.4 Tahun 2009, pertambangan adalah sebagian atau seluruh tahapan kegiatan dalam rangka penelitian, pengelolaan dan pengusahaan mineral atau batubara yang meliputi penyelidikan umum, eksplorasi, studi kelayakan, konstruksi, penambangan, pengolahan, pemurnian, pengangkutan, penjualan dan kegiatan pascatambang. Mineral adalah senyawa anorganik yang terbentuk di alam yang memiliki sifat fisik dan kimia tertentu serta susunan kristal teratur atau gabungannya yang membentuk batuan, baik dalam bentuk lepas atau padu. Batubara adalah endapan yang berasal dari tumbuhan pada masa lampau yang telah mengalami proses penggambutan untuk waktu yang sangat lama [1].

Sistem penambangan secara umum terbagi menjadi dua (terbuka dan bawah tanah). Sistem penambangan terbuka dengan metode gali isi-kembali (*back filling method*) dengan kombinasi alat gali muat dan angkut berupa *backhoe* dan *dumptruck*. Putri, 2020 menyatakan bahwa metode tambang terbuka adalah metode penambangan yang seluruh kegiatan penambangannya berada di permukaan bumi dan tempat kerjanya berhubungan langsung dengan udara luar [2].

Pada metode pertambangan bawah tanah maupun terbuka, pencahayaan dibutuhkan untuk memastikan aktivitas pekerjaan dapat dilakukan secara terus menerus, baik siang maupun malam. Pentingnya pencahayaan telah dikemukakan oleh Morgan, 1936 [3] yang melakukan penelitian mengenai pencahayaan aman bagi pekerja tambang batubara bawah tanah di United Kingdom. Penelitian ini dilakukan karena pada tahun 1812 terjadi ledakan yang menewaskan 92 pekerja. Di Inggris, beberapa hasil dari upaya melakukan pendekatan pencahayaan tambang dari aspek visibilitas

di bawah tanah terhadap efisiensi dan keselamatan telah dijelaskan oleh Roberts pada tahun 1955 [4]. Penelitian mengenai dampak pencahayaan lingkungan pada perilaku keselamatan manusia di tambang batubara bawah tanah telah dilakukan oleh Li et al., 2020 [5]. Penelitian mereka mengungkapkan bahwa pengendalian iluminasi pada tingkat setidaknya 50-75 lx atau lebih di area dengan penerangan umum dan lokal dapat secara signifikan mengurangi kejadian kecelakaan. Berbagai literatur menekankan bahwa pencahayaan merupakan elemen penting dan integral dalam proses pertambangan, yang tidak hanya mempengaruhi efisiensi kerja tetapi juga keselamatan para pekerja tambang.

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil batubara terbesar di dunia. Menurut IEA (*International Energy Agency*) pada tahun 2021, Indonesia dinyatakan sebagai negara penghasil batubara terbesar keempat di dunia [6]. Tingginya tingkat produksi batubara ini berkorelasi dengan jumlah perusahaan tambang batubara yang beroperasi di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian difokuskan pada tambang terbuka, sehingga tinjauan pustaka dalam penelitian ini juga difokuskan pada aspek tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai praktik dan dampak dari penambangan batubara terbuka di Indonesia.

2.1 Pencahayaan pada Tambang Terbuka

Karmakar et al., 2006 [7] telah mengembangkan sebuah program komputer untuk mengoptimalkan konsumsi energi pada setiap jalur angkut. Kinerja desain pencahayaan dievaluasi dari perspektif konsumsi energi menggunakan program tersebut. Selain itu, program komputer yang sama digunakan oleh Karmakar et al., 2006 [8] untuk menilai kelayakan berbagai instalasi pencahayaan guna mencapai solusi yang hemat biaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain optimal berdasarkan konsumsi energi tidak selalu identik dengan desain yang didasarkan pada pertimbangan biaya optimum, karena parameter biaya dapat sangat bervariasi tergantung pada lokasi. Selanjutnya, sistem penerangan yang dirancang untuk dua jalan angkut telah dijelaskan oleh Karmakar et al., 2006 [9] dengan menggunakan

program komputer yang dikembangkan pada penelitian sebelumnya, serta membandingkan kinerja dan biaya sistem dari penerangan yang ada. Potensi penghematan biaya total sekitar 26% dan 48% untuk kedua sistem ditunjukkan oleh program tersebut. Perangkat lunak bernama SURLux telah dikembangkan oleh Aruna and Udaykumar, 2006 [10] di MATLAB untuk desain sistem pencahayaan yang menggabungkan semua parameter desain serta menghitung total biaya sistem pencahayaan. Penelitian dan desain oleh McKie, 2007 [11] telah menguraikan aspek-aspek utama yang menyebabkan masalah pencahayaan di tambang batubara, termasuk *high walls*, *high-wall slippages*, dan *high-wall setbacks*. Tinjauan umum tentang penambangan batubara terbuka dan proses desain konseptual untuk mengembangkan desain baru *portabel high-wall lighting* telah diberikan. Sistem pencahayaan di pit tambang terbuka menggunakan *Compact Fluorescent Lamp (CFL)* dengan *stand-alone* bersumber dari sinar matahari (*photovoltaic*) telah dibuat oleh Pal et al., 2012 [12]. Pengamatan lapangan untuk pencahayaan di tambang bawah tanah dan tambang terbuka telah dilakukan oleh Mishra, 2012 [13], yang menunjukkan persyaratan umum pencahayaan dan sumber pencahayaan. Mereka menemukan bahwa sistem pencahayaan *LED (Light Emitting Diode)* memiliki lebih banyak keunggulan dibandingkan dengan sistem pencahayaan konvensional. Desain penerangan pada *bench* mineral maupun *overburden* telah dibuat oleh Aruna and Jaralikal, 2012 [14], berdasarkan cahaya pantulan minimum yang dapat diterima dan rasio keseragaman yang dipantulkan. Tujuannya adalah untuk membandingkan berbagai jenis sistem pencahayaan dengan menggunakan lima jenis lampu yang berbeda. Pengamatan dan analisis mendalam mengenai kebutuhan energi serta perhitungan biaya penerangan menggunakan energi matahari melalui teknologi solar PV (*photovoltaic*) telah dilakukan oleh Tripathi, 2014 [15]. Dengan penurunan biaya panel surya yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir, energi surya telah menjadi lebih efisien dan kompetitif dibandingkan dengan sumber energi lainnya. Penelitian ini menunjukkan potensi besar energi surya sebagai alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan penerangan. Survei iluminasi terhadap sistem pencahayaan yang ada di berbagai area kerja di tambang telah dilakukan oleh Chowdhury and

Tripathy, 2014 [16]. Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat iluminasi yang ada tidak memadai di sebagian besar tempat kerja, sehingga diperlukan desain sistem pencahayaan yang efektif dan dimodifikasi menggunakan perangkat lunak DIALux. Studi iluminasi di proyek open-cast Kasmunda, SECL, Bilaspur, telah dilakukan oleh Chowdhary, 2014 [17]. Studi ini mencakup survei iluminasi dari sistem pencahayaan yang ada di jalan angkut, *dump yard*, permukaan batubara, dan *OB (overburden)*, diikuti dengan analisis serta langkah-langkah perbaikan. Jenis sistem pencahayaan yang umum digunakan dalam proyek pertambangan permukaan telah diteliti oleh Lakshmipathy, 2014 [18]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutaan bintik-bintik buta disebabkan terutama oleh tiang, bagian belakang kabin operator, dan oleh lampu serta braket lampu yang ada pada alat *Heavy Earth Moving Machinery (HEMM)*. Sistem pencahayaan efektif yang dapat digunakan secara efisien untuk tambang terbuka dengan menggunakan energi ramah lingkungan telah dijelaskan oleh Pal et al., 2014 [19]. Perbandingan antara sistem pencahayaan neon dengan sistem pencahayaan terdahulu juga telah dilakukan. Tata letak pencahayaan yang efektif di berbagai tempat kerja untuk memastikan lingkungan kerja visual yang aman di proyek tambang terbuka, dengan memperhatikan standar perundang-undangan, telah dirancang oleh Parida, 2015 [20]. Studi sistem penerangan pada proyek penambangan terbuka dan pengembangan parameter desain pencahayaan yang optimal untuk melakukan optimasi biaya demi meningkatkan kinerja proyek penambangan telah dilakukan oleh Lakshmipathy, 2017 [21]. Tingkat pencahayaan di lokasi-lokasi strategis berbeda di tambang telah dinilai oleh Prakash and Naik, 2022 [22], sebagaimana disebutkan dalam surat edaran hukum oleh *Directorate General of Mines Safety (DGMS)*, Kementerian Pertambangan, dan Pemerintah India.

Dalam merancang sistem pencahayaan untuk tambang terbuka, variasi karakteristik lokasi, termasuk iklim, topografi, dan kebutuhan pencahayaan lokal, perlu dipertimbangkan untuk mencapai efektivitas maksimal. Meskipun beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan teknologi pencahayaan seperti LED dan CFL, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mendalami aspek efisiensi energi, biaya investasi, dan biaya operasional. Aspek keselamatan pekerja tambang

juga penting, dengan pencahayaan yang cukup diperlukan untuk mengurangi risiko kecelakaan dan kelelahan visual, sehingga standar lux perlu ditentukan. Sistem pencahayaan di tambang juga memerlukan strategi pemantauan dan pemeliharaan yang efektif untuk memastikan kinerja optimal secara berkelanjutan. Pengetahuan dalam bidang ini perlu diperbarui dengan penelitian terbaru dan teknologi terkini, terutama dalam konteks kemajuan teknologi energi terbarukan dan pencahayaan.

2.2 Sumber Penerangan pada Tambang Terbuka

Dari penelitian mengenai penerangan pada tambang terbuka, sumber energi yang digunakan berasal dari fosil dan energi terbarukan. Penggunaan generator berbahan bakar solar sebagai sumber energi fosil telah dijelaskan dalam penelitian McKie [11], Chowdury and Tripathy [16], Chowdhary [17] dan Parida [20]. Sementara itu, penggunaan solar PV sebagai sumber energi terbarukan telah dibahas dalam penelitian Pal et al., [12], Tripathi [15] dan Pal et al., [19].

Penelitian tentang pencahayaan di tambang terbuka menyoroti penggunaan sumber energi fosil seperti generator berbahan bakar solar, namun adopsi energi terbarukan seperti solar PV masih terbatas. Perluasan penelitian yang komprehensif tentang desain, efisiensi, biaya, dan keberlanjutan energi terbarukan dalam tambang batubara terbuka diperlukan.

2.3 Teknologi Penerangan pada Tambang Terbuka

Teknologi dalam penerangan ditentukan oleh jenis lampu yang digunakan. Jenis lampu mempengaruhi intensitas cahaya yang dapat menerangi suatu area atau objek. Beberapa jenis lampu yang digunakan meliputi: *Compact Florescent Lights (CFL)*, *Fluorescent Tube (FL Tube)*, *High-Pressure Sodium Vapour (HPSV)*, *High-Pressure Mercury Vapour (HPMV)* dan *Light Emitting Diode (LED)*. **Tabel II. 1** menjelaskan jenis lampu yang digunakan pada tambang terbuka

Tabel II. 1 Jenis Lampu

Jenis Lampu	Definisi	Penelitian Tambang Terbuka
CFL	Lampu <i>fluorescent</i> yang berbentuk seperti	[12]

Jenis Lampu	Definisi	Penelitian Tambang Terbuka
	lampu tungsten, ataupun lampu pijar [23]	
FL Tube	Jenis lampu pelepasan gas berbentuk tabung, berisi uap raksa bertekanan rendah [23]	[19]
HPSV	Lampu sodium tekanan tinggi [24]	[7], [8], [9], [10], [14], [16], [17], [20], [22]
HPMV	Lampu merkuri tekanan tinggi [25]	
LED	Dioda semikonduktor yang terdiri dari sebuah chip bahan semikonduktor diolah untuk menciptakan sebuah struktur yang disebut pn (positif-negatif) persimpangan [23]	[13], [15], [18]

Pada tahun 2001-2010, penggunaan lampu jenis HPMV, HPSV, dan LED telah meluas. Pada periode ini, penggunaan ketiga jenis lampu tersebut seimbang. Namun, penggunaan lampu LED semakin meningkat untuk penerangan di pertambangan. Hal ini mengindikasikan bahwa lampu LED sangat efektif dalam mendukung pencahayaan baik di tambang bawah tanah maupun tambang permukaan.



Gambar II. 1 Lampu Fluorescent



Gambar II. 2 Lampu HPMV



Gambar II. 3 Lampu LED

Perkembangan jenis lampu seiring dengan perkembangan teknologi dengan mengutamakan efisiensi dari hasil teknologi yang dikembangkan. Penggunaan

lampu LED dipilih karena mempertimbangkan efisiensi daya dan besarnya lumen yang dihasilkan. Perbedaan kedua parameter tersebut dapat dilihat pada **Gambar II. 4**.

Brightness in Lumens					
Edison 	220+	400+	700+	900+	1300+
Edison 25W	25W	40W	60W	75W	100W
Halogen 	18W	28W	42W	53W	70W
CFL 	6W	9W	42W	15W	20W
LED 	4W	6W	10W	13W	18W

Gambar II. 4 Perbandingan Lumen dan Daya Lampu (farreys.com)

Selain efisiensi daya dan lumen yang dihasilkan, umur lampu juga menjadi parameter yang penting. Chow et al., 2009 [26] telah melakukan studi mengenai perbandingan tiga jenis lampu, yaitu lampu pijar (*incandescent*), CLF, and LED. Dari penelitian ini, ditemukan bahwa umur lampu pijar adalah 1.500 jam, lampu CFL 10.000 jam dan LED 60.000 jam. Ogrutan and Gerigan, 2012 [27] telah menginformasikan jika lampu pijar berumur 1.000 jam, *Fluorescent lamp* berumur 6.000 jam dan LED berumur 100.000 jam. Mishra, 2012 [13] juga menunjukkan bahwa lampu pijar berumur 1.000 jam, CFL 12.000 dan LED 100.000 jam. Ketiga artikel ini menunjukkan bahwa lampu LED memiliki umur yang lebih panjang dibandingkan dengan jenis lampu lainnya. Keunggulan ini menjelaskan alasan meningkatnya penggunaan lampu LED di sektor pertambangan, karena efisiensinya yang lebih tinggi dan biaya perawatan yang lebih rendah.

2.4 Desain Penerangan pada Tambang Terbuka

Karmakar et al., 2006 [7] menyatakan bahwa aspek penting dari desain pencahayaan adalah menyediakan pencahayaan yang memadai untuk tugas-tugas visual, yang sangat bergantung pada intensitas sumber cahaya yang digunakan. Penggunaan lampu berdaya watt lebih tinggi dapat mengurangi investasi awal karena jumlah tiang yang diperlukan lebih sedikit dibandingkan dengan sistem berdaya watt lebih rendah. Djurestic and Arsic, 2013 [28] telah menganalisis kebutuhan visual pekerja sebagai dasar utama untuk desain pencahayaan. Kebutuhan ini ditentukan oleh persyaratan untuk fungsi optimal sistem sensor visual dan cahaya yang dibutuhkan untuk menetapkan tingkat visibilitas tepat yang diperlukan untuk kinerja kerja yang aman dan efisien. Proses desain pencahayaan dimulai dengan menentukan kebutuhan ini secara hati-hati. Faktor-faktor praktis, teknis, dan ekonomis dipertimbangkan untuk menetapkan desain sistem yang sesuai. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan visual para penambang batubara dan memberikan panduan umum tentang cara mengakomodasi kebutuhan tersebut. Chowdary, 2014 [17] menyatakan bahwa proses desain pencahayaan dimulai dengan menentukan kebutuhan secara cermat, kemudian faktor praktis, teknis, dan ekonomi dipertimbangkan dalam menetapkan desain sistem pencahayaan yang sesuai. Proses desain pencahayaan mengidentifikasi kebutuhan visual penambang batubara dan menunjukkan secara umum langkah-langkah yang dapat diambil untuk mengakomodasi kebutuhan tersebut. Menurut Parida, 2015 [20] aspek penting dari desain pencahayaan adalah memberikan penerangan yang cukup untuk pekerjaan visual. Distribusi cahaya, keseragaman cahaya, dan silau yang membuat tidak nyaman perlu diperhatikan dalam setiap desain pencahayaan. Untuk menunjang desain dengan baik, parameter lain seperti sudut kemiringan, panjang lengan lampu, tinggi tiang, dan jarak antar tiang perlu dipastikan. Prakash and Naik, 2022 [22] sudah mengungkapkan penerangan tambang adalah masalah yang sangat penting bagi industri pertambangan. Keamanan manusia dan mesin ditentukan oleh lingkungan pencahayaan di tambang. Setiap kekurangan dalam sistem penerangan tercermin dalam produktivitas dan status keselamatan.

Dalam merancang pencahayaan, aspek-aspek yang harus diperhatikan mencakup kemampuan membantu pekerja dengan visualisasi yang baik, distribusi cahaya yang merata ke semua area kerja, dan tidak menyilaukan mata sehingga tidak menyebabkan ketidaknyamanan. Tingkat pencahayaan minimal tergantung pada masing-masing tempat dan jenis tambang, karena standar pencahayaan dapat berbeda di setiap negara atau lokasi. Standar pencahayaan penting untuk dijadikan acuan dalam menilai apakah suatu area pertambangan sudah memenuhi persyaratan yang ditentukan atau tidak. Hal ini dilakukan untuk memastikan keselamatan para pekerja tambang. Selain perancangan yang membahas aspek cahaya, parameter terkait energi dan biaya juga menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan pencahayaan. Selain itu, tingkat keamanan alat pencahayaan, kemudahan pemasangan, dan kemudahan dalam proses pemeliharaan juga harus dipastikan.

2.5 Biaya Penerangan pada Tambang Terbuka

Karmakar et al., 2006 [9] menyatakan bahwa dalam sistem pencahayaan apa pun, biaya konsumsi energi merupakan komponen utama. Namun, tidak selalu dapat dikatakan bahwa sistem pencahayaan hemat energi selalu hemat biaya. Setelah sistem pencahayaan dipasang, biaya operasionalnya (selain tenaga kerja untuk pemeliharaan) terdiri dari dua hal utama; biaya lampu dan biaya daya listrik yang dikonsumsi oleh lampu tersebut. Penelitian ini membandingkan jarak antar tiang 12 dan 16 meter. Aruna and Udaykumar, 2006 [10] menginformasikan bahwa pemilihan lampu terutama dibuat berdasarkan kemampuan dan kesesuaian untuk setiap situasi. Dengan daya tahan tinggi dan karakteristik efisien dalam penetrasi di lingkungan berdebu dan berkabut tinggi, lampu uap natrium bertekanan memberikan kinerja yang sangat baik dalam pencahayaan tambang permukaan. Untuk proyek kecil, pencahayaan dapat dirancang dengan mempertimbangkan konsumsi energi yang optimal. Desain yang efisien dalam penggunaan energi memiliki pengaruh signifikan terhadap pengurangan biaya. Meskipun demikian, keputusan akhir mengenai pemasangan sistem pencahayaan harus didasarkan pada

evaluasi biaya total yang mencakup biaya awal instalasi, operasional, dan pemeliharaan. Tripathi, 2014 [15] sudah menyatakan bahwa biaya untuk penerangan tambang terdiri dari tiga komponen utama: biaya tetap, biaya energi, dan biaya lampu serta pemeliharaan. Dalam kajiannya, Tripathi secara komprehensif membandingkan biaya penggunaan energi fosil dengan penggunaan solar PV. Temuan penelitian menunjukkan bahwa biaya penggunaan panel surya lebih rendah, karena biaya energi yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan generator. Meskipun demikian, biaya perawatan dan baterai cenderung lebih tinggi dalam penggunaan solar PV, namun secara keseluruhan total biaya tetap lebih rendah dibandingkan dengan biaya penggunaan generator. Pentingnya mempertimbangkan konsumsi energi dalam desain pencahayaan telah disoroti oleh beberapa penelitian, meskipun masih terdapat kekurangan dalam analisis biaya secara menyeluruh. Sebagai contoh, penelitian oleh Karmakar et al., 2006 [9] menyoroti pentingnya mempertimbangkan biaya total, termasuk biaya awal instalasi, biaya energi, dan biaya pemeliharaan, dalam menentukan sistem pencahayaan yang optimal. Namun, pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana memperhitungkan biaya pemeliharaan dan baterai dalam perbandingan antara penggunaan energi fosil dan energi terbarukan seperti solar PV masih diperlukan, seperti yang dicontohkan dalam penelitian oleh Tripathi, 2014 [15]. Pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi biaya total dapat membantu memastikan bahwa keputusan yang diambil didasarkan pada keseimbangan antara efisiensi energi, keterbaruan, dan biaya total dari seluruh siklus hidup sistem pencahayaan.

Penelitian menunjukkan bahwa biaya konsumsi energi dianggap sebagai komponen utama dalam sistem pencahayaan, meskipun sistem pencahayaan hemat energi tidak selalu hemat biaya. Setelah pemasangan, biaya operasional terutama terdiri dari biaya lampu dan biaya daya listrik. Pemilihan lampu harus didasarkan pada kemampuan dan kesesuaian untuk situasi tertentu, dengan beberapa jenis lampu lebih efektif di lingkungan berdebu dan berkabut tinggi. Selain itu, penggunaan energi fosil dan solar PV telah dibandingkan, menunjukkan bahwa meskipun biaya perawatan dan baterai lebih tinggi pada solar PV, total biaya tetap lebih rendah

dibandingkan dengan penggunaan generator. Pentingnya mempertimbangkan konsumsi energi dalam desain pencahayaan telah disoroti, namun analisis biaya secara menyeluruh masih diperlukan. Pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi biaya total, termasuk biaya awal instalasi, operasional, dan pemeliharaan, dapat membantu memastikan keputusan yang diambil didasarkan pada keseimbangan antara efisiensi energi, keterbaruan, dan biaya total dari seluruh siklus hidup sistem pencahayaan

