

STUDI LITERATUR TEKNOLOGI LAMPU TAMBANG BAWAH TANAH

Oleh : Darius Agung Prata
Widyaiswara Balai Diklat Tambang Bawah Tanah

Cahaya memainkan peranan yang penting dalam setiap aspek kehidupan manusia. Apabila aktivitas dilakukan di permukaan tanah, maka sumber cahaya dapat berasal dari matahari pada siang hari. Namun kondisi ini tidak dapat ditemukan bila aktivitas dilakukan di dalam terowongan-terowongan tambang di bawah permukaan. Untuk melakukan pekerjaan dengan aman, diperlukan penerangan buatan. Jenis penerangan ini dapat berupa instalasi yang dipasang tetap pada tempat-tempat tertentu di terowongan tambang maupun lampu tambang (cap lamps) yang dipakai oleh masing-masing pekerja. Studi ini dilakukan untuk mengetahui teknologi terkini tentang lampu tambang di dunia. Hasil studi menjelaskan bahwa saat ini penggunaan lampu tambang telah menerapkan penggunaan sel baterai kering dan memanfaatkan LED (Light Emitting Diode) sebagai sumber cahayanya. Cool white LED lebih meningkatkan faktor penglihatan manusia dibandingkan dengan warm white LED. Penggunaan multi LED dalam satu unit lampu tambang juga menunjukkan kemampuan dalam meningkatkan faktor keamanan.

Keyword : Cap lamp, LED

1. Pendahuluan

Tambang bawah tanah merupakan metode penambangan untuk mengambil mineral atau batubara dari dalam tanah. Metode ini dilakukan dengan membuat lubang-lubang di dalam tanah menuju ke tempat dimana bahan tambang berada. Dalam prakteknya lubang-lubang yang digali bisa mencapai panjang hingga ratusan kilometer di dalam tanah. El Teniente yang merupakan tambang bawah tanah tembaga terdalam saat ini memiliki hingga 2400 km drift dan 1500 km jalan di bawah tanah yang sudah digali (16). Tentu saja terowongan-terowongan ini bukan merupakan satu terowongan saja, namun merupakan penjumlahan dari seluruh terowongan yang pernah di buat selama umur tambang.

Tambang bawah tanah juga dikenal sebagai metode penambangan dengan biaya yang tinggi. Dapat dibayangkan hanya untuk menghirup udara pernafasan di perlukan biaya yang tidak sedikit untuk mengalirkan udara ke dalam-terowongan-terowongan tersebut. Hal ini tidak kita temui bila kita mengekstraksi bahan tambang dengan menggunakan metode penambangan terbuka yang masih berhubungan dengan atmosfer udara bebas. Selain tantangan ventilasi, di tambang bawah tanah juga menghadapi tantangan terhadap pencahayaan. Bila di tambang terbuka, penerangan hanya diperlukan pada saat malam hari, maka di tambang bawah tanah lampu penerangan diperlukan baik siang maupun malam hari.

Selama operasi berlangsung, kegiatan-kegiatan di dalam tambang bawah tanah biasanya hanya terfokus di beberapa tempat saja. Tempat-tempat ini antara lain adalah ; permukaan kerja di mana dilakukan ekstraksi bahan tambang dilakukan, permukaan kerja penggalian terowongan untuk pengembangan tambang, tempat-tempat dimana ada mesin-mesin beroperasi (*hoist, belt conveyor, ore bin dll*), serta tempat-tempat dimana terdapat pekerjaan-pekerjaan lainnya (pemeliharaan, perbaikan peralatan). Pada lokasi-lokasi dimana terdapat mesin-mesin beroperasi, seperti pada lokasi operator mesin-mesin *belt conveyor, hoist* pada umumnya diberikan penerangan secara permanen yang menerangi lokasi tersebut. Sistem penerangan yang dipasang diupayakan mampu menekan biaya tanpa mengabaikan keselamatan.

Pada tempat-tempat dimana tidak ada penerangan, maka pekerja tambang bawah tanah mengandalkan lampu yang merupakan peralatan kerja wajib mereka. Lampu ini merupakan lampu portabel yang dipasang pada helm. Lampu portabel ini dikenal dengan nama *cap lamp*/lampu tambang. Peralatan ini sangat vital dikenakan oleh seorang pekerja tambang bawah tanah bukan hanya pada tempat-tempat yang tidak dilengkapi dengan lampu penerangan, namun juga pada tempat-tempat kerja yang dipasang lampu-lampu penerangan permanen, ataupun permukaan kerja yang diterangi oleh lampu dari peralatan yang digunakan (*jumbo drill, road header* dll). Hal ini dikarenakan keterbatasan dari arah sorotan lampu yang biasanya fokus pada bagian yang sedang dikerjakan, sehingga bagian di kiri dan kanan sorotan lampu tetaplah gelap. Sehingga bila seorang pekerja berpindah ataupun melakukan aktivitas di sisi ini, sorotan dari lampu tambang akan sangat membantu.

Tulisan ini dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik lampu tambang yang baik digunakan dalam lingkungan tambang bawah tanah untuk meningkatkan efisiensi kerja dengan tingkat keselamatan yang tinggi. Untuk menjawab hal tersebut dilakukan dengan mengumpulkan literatur-literatur dari buku-buku maupun penelitian-penelitian yang sudah ada dalam bidang lampu penerangan tambang.

2. Lampu Tambang

Berikut ini adalah sejarah lampu tambang yang digunakan pekerja di Amerika (11). Sebelum tahun 1850, penambang menggunakan lilin dan api terbuka sebagai penerangan. Antara tahun 1850 hingga 1915 telah ditemukan lampu-lampu tambang yang diciptakan khusus untuk mengatasi tidak baiknya pencahayaan di bidang depan pekerja dengan menempatkannya pada topi pekerja. Lampu tambang pengganti lilin ini adalah lampu minyak sederhana (*oil-wick cap lamp*) dengan bentuk seperti teko teh yang dapat dikaitkan pada topi pekerja, lampu ini memiliki cahaya yang lebih terang dan juga tahan lebih lama digunakan dibandingkan lilin. Lampu jenis ini memiliki kelemahan karena mengeluarkan asap. Kekurangan lampu ini kemudian diperbaiki dengan ditemukan lampu karbit dengan reflektor pada tahun 1910 yang lebih bersih dari asap dan lebih fokus dalam pencahayaan. Bahaya lainnya dari lampu terbuka ini yang dapat menyulut gas-gas di dalam tambang kemudian diperbaiki pada tahun 1915 dengan pemakaian lampu tambang elektrik (*MSA Edison Flameless Electric Miners' Cap Lamp*).



Sumber (13)

Gambar 1. Lampu Tambang Sel Basah



Sumber (15)

Gambar 2. Lampu Tambang Sel Kering

Sebenarnya ada jenis lampu yang lebih aman yang telah ditemukan pada tahun 1815 di Inggris. Lampu ini dikenal sebagai lampu Davy (dibuat oleh Sir Humphrey Davy). Lampu ini dibuat untuk mendeteksi adanya gas-gas di dalam tambang, terutama gas metana. Namun karena cahaya yang dikeluarkannya tidak besar

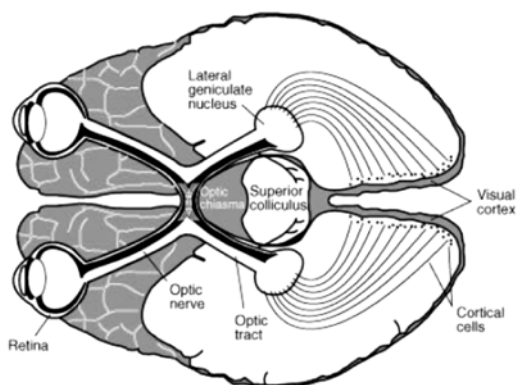
maka lampu ini tidak begitu populer di tambang. Sehingga penggunaan lampu-lampu dengan nyala api terbuka terutama ditambang-tambang bukan batubara lebih populer (12).

Penggunaan lampu elektrik menjadi sangat populer terkait dengan efektivitas dan tingkat keselamatannya. Awalnya lampu-lampu yang dipakai merupakan jenis lampu pijar dengan sinar berwarna kuning. Lampu ini umumnya menggunakan sumber tenaga sel aki basah yang diletakkan di pinggang, dengan dihubungkan kabel ke lampu yang berada di helm (Gambar 1). Jenis lampu ini mengurangi kenyamanan pekerja, karena harus membawa baterai yang cukup berat. Selain adanya kabel penghubung antara helm dan sumber tenaganya yang cukup mengganggu. Lampu-lampu tambang dengan desain seperti ini masih dapat dijumpai di pasaran saat ini. Namun rata-rata telah menggunakan sel baterai kering yang lebih ringan. Sel baterai kering nickel-cadmium mulai digunakan semenjak tahun 1980an, dimana dengan memanfaatkan baterai jenis ini dapat mengurangi bobot hingga 48%, ukuran hingga 15% dan umur pemakaian yang lebih lama 3 hingga 4 tahun (2).

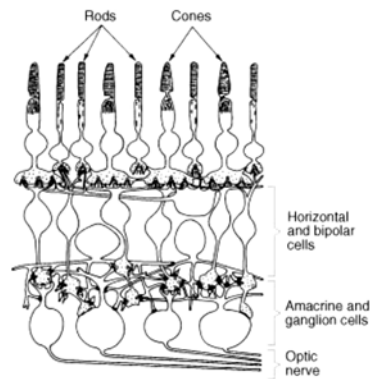
Lampu-lampu dengan teknologi saat ini umumnya sudah mengaplikasikan lampu-lampu LED dengan cahaya berwarna putih. Sumber tenaga juga telah menggunakan baterai kering yang ringan. Bahkan dengan berkembangnya teknologi baterai, saat ini sudah ada lampu tambang yang tidak lagi menempatkan baterainya di pinggang pengguna, namun telah menyatu dengan lampu tersebut (gambar 2), sehingga sangat praktis dan efisien. Perhatian penting utama dari lampu tambang adalah kemampuannya untuk memberikan pencahayaan yang jelas dan nyaman bagi penggunanya.

3. Mekanisme Penglihatan

Untuk lebih memahami pencahayaan yang baik di tambang bawah tanah, maka kita perlu memahami bagaimana manusia dapat melihat. Mekanisme penglihatan manusia sangat dipengaruhi oleh cahaya, mata manusia mampu menangkap cahaya pada panjang gelombang 380-750 nm (1). Umumnya setiap benda yang dapat dilihat oleh mata manusia adalah benda yang terpapar oleh cahaya. Foton dari cahaya yang masuk ke dalam mata manusia ditangkap oleh photoreceptor pada retina untuk kemudian diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal ini kemudian ditransmisikan menuju *visual cortex* untuk diolah menjadi gambar (gambar 2.a.) (5).



Gambar a (sumber 5)



Gambar b (sumber 5)

Gambar 2. a.Diagram Struktur Penglihatan, b. Photoreceptor

Retina memegang peranan penting dalam mengubah gelombang cahaya menjadi sinyal listrik yang disalurkan melalui saraf optik ke otak oleh *photoreceptor*. Retina memiliki dua jenis *photoreceptor*

(gambar 2.b.) yaitu batang dan kerucut. *Photoreceptor* batang sensitif terhadap cahaya sehingga sangat dominan bertanggung jawab terhadap penglihatan malam hari. Dimana *photoreceptor* kerucut sensitif terhadap warna sehingga menjadi dominan terhadap penglihatan di siang hari. *Photoreceptor* batang juga dominan ketika level cahaya menurun, terutama pada saat perubahan cahaya di sore hari. Tipe pencahayaan ini dikenal sebagai *mesopic*, dan identik dengan pencahayaan di dalam terowongan tambang (10). Sensitivitas tertinggi dari *photoreceptor* batang adalah 555 nm dimana *photoreceptor* kerucut adalah 507 nm (4).

Cahaya yang dikeluarkan oleh sumber cahaya akan disebarkan ke segala arah. Manusia akan mampu mengenali benda maupun warna ketika benda tersebut menerima cahaya yang datang dari sumber cahaya. Cahaya ini akan diserap, dilewatkan ataupun dipantulkan tergantung jenis materialnya. Kondisi ketika cahaya mengenai benda ini dikenal sebagai iluminasi. Iluminasi memegang peranan yang penting pada pekerja tambang bawah tanah untuk mendeteksi bahaya di area penglihatannya (3).

Penglihatan manusia dipengaruhi oleh beberapa faktor yang memegang peranan terhadap kemampuan manusia melihat dan juga terkait dengan bahaya (1). Faktor faktor ini adalah ; tingkat illuminasi, perubahan level illuminasi, aspek kualitatif cahaya (kesilauan dan kontras), kedipan dan efek strobe (ketika benda bergerak tidak terlihat karena cahaya yang mengenainya berada dalam frekuensi yang sama dengan frekuensi perputaran benda tersebut), karakteristik orang (umur), dan aspek lainnya (cahaya kuning yang membuat warna benda menjadi berbeda dari warna aslinya).

4. Kecelakaan Akibat Kurang Baiknya Pencahayaan

Bahaya yang ada di dalam tambang bawah tanah dapat saja tidak terlihat karena minimnya pencahayaan. Mesin-mesin yang bergerak, runtuh batuan, lantai yang licin, maupun peralatan di lantai dapat saja tidak terlihat oleh pekerja bila pencahayaan dari lampu tambang tidak mencukupi ataupun pekerja mengalami kesilauan. Terowongan tambang merupakan areal kerja yang berbahaya dalam hal penglihatan karena memiliki ruangan yang terbatas, memiliki bidang reflektif yang terbatas, rendah kontras visual, dan juga terdapat banyak sumber kesilauan, yang selalu berubah seiring waktu (12).

Pencahayaan telah menjadi perhatian di banyak tempat di dunia terkait dengan kecelakaan yang sering terjadi pada tambang bawah tanah. Umumnya kecelakaan yang terjadi akibat pencahayaan ini adalah STF (*Slip, Trip, Fall*) dan terjepit atau tertabrak kendaraan bergerak karena pekerja kurang cepat merespon adanya bahaya. Di Amerika Serikat tercatat bahwa STF yang menempati urutan kedua kecelakaan yang sering terjadi dalam kurun waktu 2005-2009, sangat dipengaruhi oleh faktor pencahayaan. Demikian juga dengan kondisi di Inggris dan Afrika Selatan, dimana dari penelitian yang telah dilakukan faktor pencahayaan merupakan hal yang sangat disarankan untuk diperhatikan guna menghindari kecelakaan(6).

Selain itu kecelakaan juga terjadi akibat terjepit maupun tertabrak kendaraan yang bergerak di sekitar pekerja. Selama kurun waktu 1984- 2004 terdapat 29 kecelakaan fatal serta 67 tidak berakibat fatal antara tahun 1999 hingga tahun 2004 di Amerika (10). Lampu tambang memegang peranan yang penting untuk mengetahui kendaraan yang bergerak di sekitar pekerja ($\pm 10^\circ$ sd $\pm 40^\circ$ dari sumbu penglihatan manusia). Karena pendengaran tidak begitu dapat diandalkan karena lingkungan kerja yang bising dari mesin-mesin yang beroperasi cukup mengganggu pendengaran.

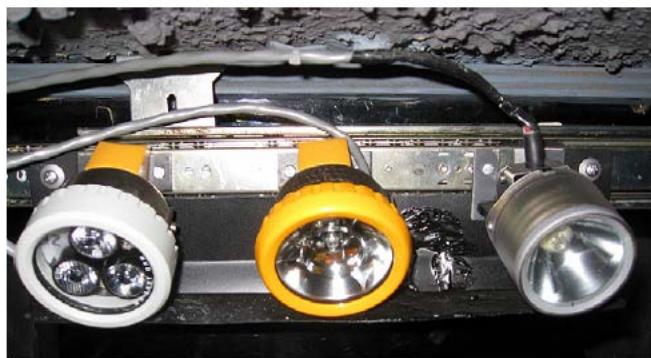
5. Teknologi Pencahayaan Lampu Tambang

Dengan pemahaman tentang mekanisme penglihatan digabungkan dengan data-data empiris, penelitian dari pencahayaan yang dihasilkan oleh lampu tambang telah sangat berkembang saat ini. Riset-riset terbaru mengenai pencahayaan pada lampu tambang terus dilakukan oleh NIOSH (National Institute Occupational Safety and Health). Perkembangan teknologi lampu tambang sebelum tahun 1995 di Amerika dapat dilihat dari tabel 1 yang disarikan dari buku yang ditulis oleh Brune (7).

Awalnya lampu-lampu yang digunakan masih menggunakan lampu pijar. Seiring dengan ditemukannya LED yang berwarna putih pada tahun 1995 (17), maka penggunaan LED mulai dilirik untuk menggantikan bola pijar. Saat ini lampu-lampu tambang telah menggunakan LED (*Light Emitting Diode*) dengan cahaya yang dikeluarkan umumnya berwarna putih. Penggunaan lampu-lampu berteknologi LED ini menjadi populer karena dapat menghemat energi yang digunakan untuk membangkitkan cahaya, tahan terhadap panas dan juga memiliki masa pakai yang panjang. Samarco dkk (9) menunjukkan bahwa LED dapat meningkatkan rata-rata iluminansi vertical sebesar 9,5% dimana lampu pijar malah turun sebesar 4%. LED juga lebih efisien 38% pengukuran mesopic luminansi dibanding lampu pijar setelah 10 jam siklus kerja.

Tabel 1. Ringkasan Perkembangan di Bidang Lampu Tambang di Amerika

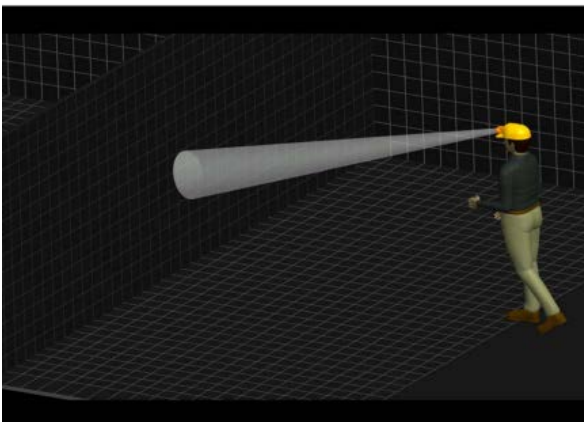
Tahun	Kegiatan atau Area Penelitian
1910	Pendirian US Bureau of Mines
1912-1913	Ekspose penelitian bahwa filamen pijar dapat menyulut metana
1913-1917	Penelitian lampu listrik dan keselamatan
1913-1973	USBM menyetujui lampu tambang elektrik
1916-1926	Mengembangkan aturan dan petunjuk untuk lampu elektrik
1935	Petunjuk pemeriksaan dan pemeliharaan lampu tambang
1935	Petunjuk menjaga permissibility
1969	Mengembangkan iluminasi yang diperlukan di tambang batubara bawah tanah
1976-1978	Konferensi dan seminar pencahayaan tambang yang dihadiri lebih dari 1000 orang
1980	Prototipe lampu tambang dengan baterai NiCd dan lampu pijar tungsten halogen
1982	Handbook pencahayaan tambang bawah tanah
1983	Mengembangkan luminansi yang diperlukan pada tambang logam dan nonlogam
1995	Pengembangan software CAP untuk analisa penerangan
1995	Perubahan USBM



(sumber 6)

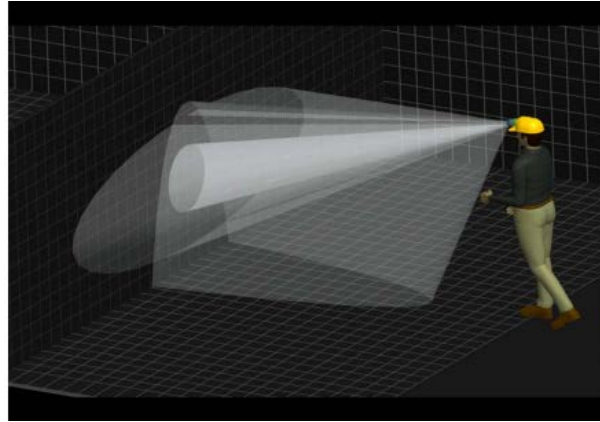
Gambar 3. Lampu Prototipe 3 LED Paling Kiri, dan Pembanding 1 LED Gambar Tengah dan Sebelah Kanan

Penelitian dari CDC (10), menunjukkan bahwa penggunaan lampu LED dengan jenis *cool white* dibandingkan dengan lampu pijar (*warm white*) menghasilkan peningkatan 11-15% kecepatan mendeteksi kendaraan bergerak pada jarak 3,83 m dalam sudut 20°, 40° dan 60° dari depan pekerja. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa dalam kondisi mesopic (seperti di tambang bawah tanah) dengan semakin banyaknya cahaya gelombang pendek (*cool white* LED) akan meningkatkan kemampuan penglihatan dibandingkan dengan (*warm white incandescent bulb lamp*) yang menghasilkan cahaya gelombang pendek lebih rendah (4).



(sumber 7)

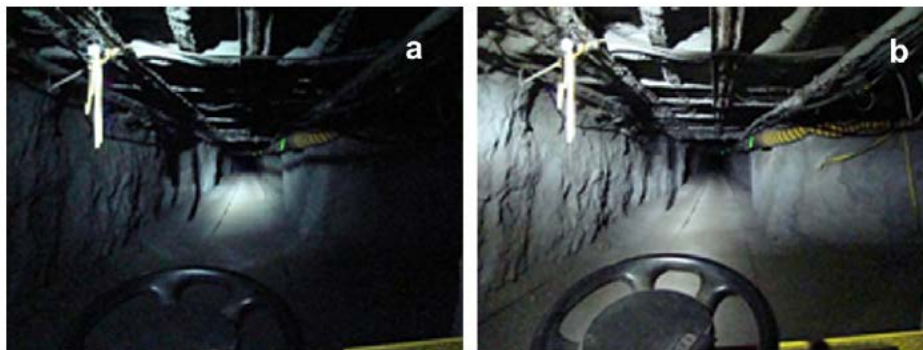
Gambar 4. Lampu Tambang Dengan Satu LED



(sumber 7)

Gambar 5. Lampu Tambang Dengan 3 LED

Perubahan akan jumlah lampu yang digunakan menjadikan luas pandangan dari pekerja tambang menjadi lebih baik dengan menggunakan tiga buah lampu LED yang dipasang dalam satu unit lampu tambang (gambar 4 dan 5). Terlihat bahwa dengan luas area yang diterangi menjadi lebih luas, pekerja dapat merespon bahaya di lantai, dinding samping maupun atap terowongan menjadi lebih baik. Gambar 7 memperlihatkan perbandingan pencahayaan yang didapatkan dari jenis lampu tambang umum dengan lampu tambang prototipe NIOSH. Dalam penelitiannya Samarcon dkk (7) mendapatkan bahwa lampu tambang dengan tiga LED (gambar 3) sebagai sumber cahaya yang diatur dengan sudut berbeda tidak menyebabkan ketidaknyamanan karena kesilauan pekerja yang memakainya. Malahan meningkatkan kewaspadaan akan kendaraan bergerak di sekitar sebanyak 79,5% dan meningkatkan respon terhadap material yang dapat menyebabkan tersandung di lantai sebesar 194,1%. Tingkat iluminasi dari lampu yang didesain juga lebih tinggi dari lampu pembanding yang menggunakan 1 LED (gambar 6).



Sumber (6)

Gambar 6. Perbandingan Pencahayaan Dua Jenis Lampu, a. Lampu Dengan Satu LED, b. Lampu Dengan Tiga LED

6. Kesimpulan

Berdasarkan paparan hasil studi literatur di atas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan lampu tambang dengan sumber tenaga baterai sel basah saat ini sudah tergantikan dengan baterai sel kering yang memanfaatkan LED sebagai sumber cahaya menggantikan lampu pijar.
2. Kondisi pencahayaan di lingkungan kerja tambang bawah tanah berada pada kondisi *mesopic*, yang membuat *photoreceptor* batang lebih dominan kerjanya dibandingkan *photoreceptor* kerucut. Namun dengan lampu yang menggunakan cahaya *cool white* LED, dimana menghasilkan gelombang lebih pendek dibanding *warm white* LED maka *photoreceptor* kerucut akan bekerja juga, sehingga kemampuan membedakan warna dalam kondisi *mesopic* akan meningkat.
3. Hasil penelitian di NIOSH (*National Institute of Occupation Safety and Health*) Amerika telah berhasil membuat prototipe lampu tambang dengan memanfaatkan multi LED sehingga mampu meningkatkan respons pemakai terhadap pergerakan di sekitar bidang pandang sebesar 79,5% dan respon terhadap sumber bahaya di lantai sebesar 194,1%

DAFTAR PUSTAKA

1. Brauer, Roger L, 1994, "Safety and Health for Engineers", John Wileys & Sons Inc, USA (hal 297)
2. Brune, Jürgen F., 2010, "Extracting the Science: A Century of Mining Research" Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc, Engineering, Colorado, USA
3. Cornelius, K., L. Steiner and F. Turin, (1998). "Using Coal Miners' Experience to Identify Effective Operating Cues," 2nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society.
4. J. Van Derlofske and J. D. Bullough, 2003, "Spectral effects of high-intensity discharge automotive forward lighting on visual performance," presented at the Society Automotive Engineers World Congr., Detroit, MI, 2003, Paper 2003-01-0559.
5. Rea, Mark Stanley, 2000, "The IESNA Lighting Handbook, Reference & Application", Illuminating Engineering Society of North America, USA
6. Sammarco, J.J., Jonisha P. Pollard, William L. Porter, Patrick G. Dempsey, Caitlin T. Moore, 2012, "The effect of cap lamp lighting on postural control and stability," International Journal of Industrial Ergonomics, Elsevier
7. Sammarco, J.J., Mayton, A., Lutz, T., Gallagher, S., 2011. Discomfort glare comparison for various LED cap lamps. IEEE Transactions of the Industry Applications Society 47 (3).
8. Sammarco J.J., Carr J.R., 2010, "Mine Illumination: A Historical and Technological Perspective", Center for Disease Control and Prevention, USA
9. Sammarco J.J., Freyssonier J.P, Bullough J.D., Zhang X., Reyes M.A., 2009, "Technological Aspects of Solid-State and Incandescent Sources for Miner Cap Lamps", Industry Applications, IEEE Transactions Journal (Volume:45 , Issue: 5

10. Sammarco, J.J.; M.A.Reyes, J. Bartels and S. Gallagher, (2008), "Evaluation of Peripheral Visual Performance When Using Incandescent and Led Miner Cap Lamps," Proceedings of the IEEE Industry Applications Society 43rd Annual Meeting, Edmonton, Canada, October 2008.
11. <http://americanhistory.si.edu/collections/object-groups/mining-lights-and-hats>
12. http://americanhistory.si.edu/collections/object-groups/mining-lights-and-hats?ogmt_page=miners-safety-lamps
13. http://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_872030
14. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/dledc.pdf>
15. <http://www.directindustry.com/prod/kse-lights-gmbh/work-lights-cordless-61836-1297235.html>
16. <http://www.mining-technology.com/projects/el-teniente-new-mine-level-project/>
17. http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/led-home/professional-knowledge/led-basics/led-history/index.jsp
18. http://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html