

RANCANG BANGUN SISTEM PEMANTAUAN TERPADU KESELAMATAN KERJA TAMBANG BAWAH TANAH MENGGUNAKAN SISTEM KABEL DAN TELEMETRI

Development of Integrated Monitoring System for Underground Mine Safety Using Cable and Telemetry System

HASNIATI ASTIKA dan ZULKIFLI PULUNGAN

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung 40211
Telp. (022) 6030483, Fax. (022) 6003373
e-mail: hasniati@tekmira.esdm.go.id

ABSTRAK

Sistem pemantauan terpadu keselamatan kerja tambang bawah tanah dirancang agar dapat menyediakan informasi kondisi di dalam tambang bawah tanah secara langsung (*real time*) dari permukaan tambang. Sistem pemantauan terdiri dari rangkaian perangkat keras, antara lain: *datalogger* sebagai penangkap data dari sensor; *repeater* sebagai penguat data; radio modem sebagai pengirim dan penerima data; dan perangkat lunak pemantauan tambang bawah tanah sebagai pembaca, pengolah dan penyimpan data dalam *database*. Beberapa sensor seperti sensor gas, sensor pergerakan batuan atap dan sensor temperatur batubara ditempatkan di dekat permukaan kerja tambang sebagai alat pendeteksi kondisi di dalam tambang. Ujicoba peralatan dan sistem dilakukan pada salah satu tambang batubara bawah tanah. Perekaman dan penyimpanan data diatur setiap satu menit. Dari hasil ujicoba diperoleh konsentrasi hasil pemantauan kondisi di dalam tambang secara terpadu. Sistem dan peralatan pemantauan telah bekerja dengan baik.

Kata kunci: sistem pemantauan, tambang bawah tanah, keselamatan kerja tambang.

ABSTRACT

The integrated underground mine safety system was designed to provide a real-time information of underground conditions from the surface of the mine. The monitoring system consists of hardware, which among others: datalogger to capture data from the sensor; repeater as a data amplifier; radio modem as the sender and receiver; and underground mine monitoring software as a reader, processor, and storage of data in the database. Several sensors such as gas sensors, roof movement sensor, and a temperature sensor were placed near the coal mine workings face detecting the underground mine conditions. The system and equipment testing carried out in one of the underground coal mine recording and storage of data are set every one minute. From the experiment, the concentration of the underground mine condition was obtained in an integrated manner. All of the system and monitoring equipment have been working properly.

Keywords: underground monitoring system, underground mine, mine safety.

PENDAHULUAN

Bekerja pada tambang bawah tanah memiliki risiko yang lebih tinggi dengan ruang dan lingkungan kerja yang terbatas dibanding bekerja di permukaan. Teknologi pengawasan secara dini sangat diperlukan, dengan tujuan utama untuk melakukan pengawasan dan mengetahui sedini mungkin kondisi tidak aman pada suatu lokasi tambang agar dapat dilakukan tindakan pencegahan dan penanggulangannya. Fokus utama keselamatan kerja tambang batubara bawah tanah adalah sistem pengawasan yang ketat terhadap bahaya kecelakaan yang mungkin timbul seperti adanya gas tambang, kebakaran, tekanan, debu dan banjir. Pengawasan, pengendalian, prediksi dan peringatan dini adalah hal yang harus dipersiapkan dalam melaksanakan keselamatan kerja dengan melakukan tindakan pencegahan kecelakaan yang mungkin dapat terjadi (Zhang *dkk.*, 2014).

Salah satu organisasi yang menangani keamanan dan kesehatan kerja tambang adalah *Mine Safety and Health Administration* (MSHA), yang mempunyai misi memberikan peraturan bagi industri tambang di Amerika Serikat dengan melakukan kontrol dan juga penelitian untuk mengurangi tingginya angka kecelakaan tambang. Berdasarkan data MSHA dari tahun 2012 sampai dengan 2015, 67,69 % dari total kecelakaan fatal yang terjadi pada tambang batubara terjadi pada tambang batubara bawah tanah. Penyebab terbesar terjadinya kecelakaan pada tambang batubara bawah tanah disebabkan oleh ledakan gas atau debu tambang sebanyak 34,52%, setelah itu kecelakaan pada saat pengangkutan, keruntuhan batuan atap, kerusakan mesin dan ambruk batuan (United States Department of Labor, 2016).

Menurut Peng (2010), kategori utama penyebab kecelakaan tambang batubara bawah tanah yang terjadi di Cina antara lain kecelakaan tambang yang diakibatkan oleh gas tambang, keruntuhan atap, kebakaran tambang dan pengangkutan. Kecelakaan yang diakibatkan gas tambang pada dasarnya disebabkan oleh ledakan gas dan debu batubara, yang diikuti oleh ledakan gas metana. Penyebab terjadinya ledakan gas tersebut antara lain: akibat tidak adanya sistem pemantauan gas; jika ada, sistem tidak terpasang dengan benar; juga akibat

kurang memadainya sensor yang dipasang. Akumulasi gas berbahaya pada tambang batubara bawah tanah dapat bertambah seiring dengan semakin dalamnya terowongan tambang yang juga dapat meningkatkan risiko terjadinya ledakan batubara dan gas tambang (Chaulya dan Prasad, 2016). Selain itu terdapat faktor alam yang dapat menjadi penyebab terjadinya kecelakaan tambang bawah tanah antara lain: runtuh batuan, ledakan debu batubara dan rembesan air. Ledakan batubara dan gas dapat terjadi pada area ketidakselarasan dan pada lapisan batubara yang mengalami perubahan geologi seperti retakan, rekahan, dan lain-lain (Zhang *dkk.*, 2014).

Oleh sebab itu pemantauan keselamatan kerja tambang menjadi suatu keharusan dalam kegiatan penambangan bawah tanah. Fokus utama dalam kegiatan tambang batubara bawah tanah adalah memperkuat sistem pemantauan dan peringatan dini gas berbahaya, kebakaran, banjir, pergerakan batuan, perubahan temperatur, dan debu tambang. Pemantauan, pengendalian, prediksi dan peringatan dini merupakan syarat dan jaminan keselamatan kerja sebagai kunci utama dalam pencegahan terhadap bahaya tambang (Zhang *dkk.*, 2014). Sistem pemantauan di dalam tambang bawah tanah dibagi berdasarkan fungsinya yaitu sensor yang mengumpulkan berbagai macam informasi, peralatan kontrol yang mengoperasikan mesin menurut sinyal kontrol, rangkaian transmisi yang mengirim informasi ke tempat jauh di luar tambang bawah tanah, terminal penerima sinyal yang mengumpulkan dan mengubah informasi yang dikirim, serta alat pengolah informasi dan penunjuk yang melakukan analisis, pengolahan dan perekaman (penyimpanan) informasi yang telah dikumpulkan (Newman dan Zipf, 2005).

METODE

Metode yang diterapkan adalah dengan melakukan perekayasa dan ujicoba alat dan sistem secara langsung di lokasi tambang batubara bawah tanah.

Perancangan Sistem Pemantauan Terpadu

Komunikasi antara pendeteksi dan ruang kontrol dilakukan dengan menggunakan sistem

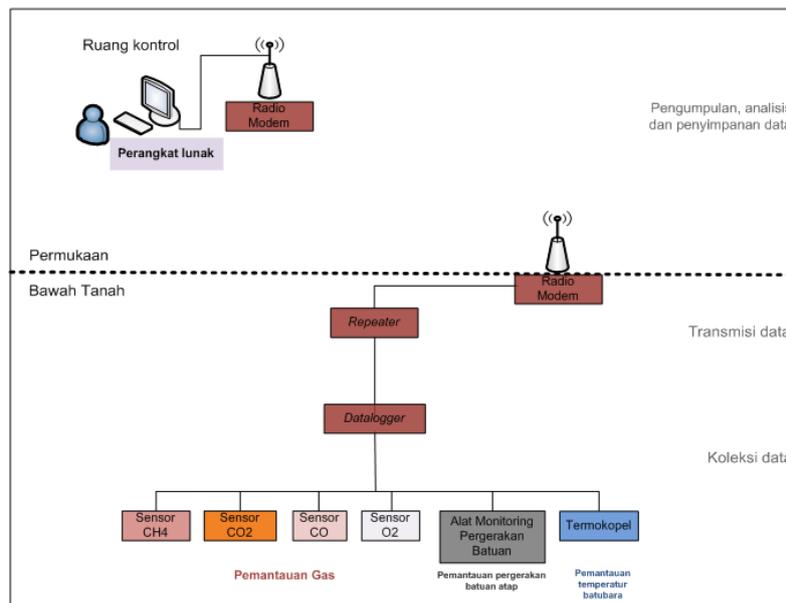
kabel dan telemetri untuk melakukan koleksi, transmisi, pengumpulan, analisis dan penyimpanan data. *Datalogger* melakukan koleksi data hasil pendeteksian berdasarkan sinyal yang diterima oleh sensor di dalam tambang antara lain sensor gas metana (CH₄), gas karbondioksida (CO₂), gas karbon-monoksida (CO), oksigen (O₂), pergerakan batuan atap dan temperatur batubara. Kemudian data ditransmisikan menggunakan kabel data untuk diteruskan melalui *repeater* hingga ke radio modem pengirim. Dari radio modem pengirim data dikomunikasikan ke radio modem penerima lalu data ditampilkan di ruang server menggunakan aplikasi perangkat lunak yang melakukan pengumpulan, analisis dan penyimpanan data secara langsung (Gambar 1).

Untuk mendukung sistem tersebut terdapat tiga rangkaian utama yang disiapkan, yaitu rangkaian *datalogger*, rangkaian *repeater* dan rangkaian radio modem. Rangkaian *datalogger* merupakan rangkaian yang langsung terhubung dengan sensor, terdiri dari *microcontroller* yang membaca dan mencacah data dari sensor dan RS 485 *interface* sebagai penghubung dengan rangkaian *repeater*.

Rangkaian *repeater* merupakan rangkaian penerima data dan meneruskan data pada level yang lebih tinggi, atau disebut sebagai penguat yang mampu mendukung dan menyangga komunikasi data dalam jarak hingga 1200

meter. *Repeater* yang digunakan adalah RS485 *repeater* keluaran RE-Smith (Gambar 2). RS 485 *repeater* mempunyai fungsi sebagai alat untuk memperjauh jaringan data dan mampu memperkecil *noise* (gangguan) pada data yang diterima dan diteruskan. Data dari *repeater* kemudian diteruskan ke radio modem pengirim. Seluruh sistem tersebut terhubung dengan menggunakan sistem kabel. RS485 dalam setiap rangkaian akan melewati data dari hasil pemrosesan oleh *microcontroller* ke *repeater* dan/atau melewati data antar *microcontroller*. Dalam sistem pemantauan terpadu ini terdapat dua buah RS 485 *repeater* yang dipasang di mulut tambang dan pada jarak 1000 meter setelahnya.

Radio modem merupakan perangkat utama dalam sistem telemetri. Radio modem yang digunakan dalam kegiatan ini adalah X-stream™ PKG RF modems, keluaran DIGI Internasional, Amerika Serikat (Gambar 2). Radio modem berfungsi sebagai perangkat *interface* untuk mengkondisikan data hasil pengukuran ke dalam format standar komunikasi data dengan menggunakan media transmisi radio. Rangkaian radio modem terdiri dari rangkaian radio modem pengirim yang diletakan pada mulut tambang dan rangkaian radio modem penerima yang ditempatkan di ruang kontrol.



Gambar 1. Skema sistem pemantauan terpadu tambang batubara bawah tanah

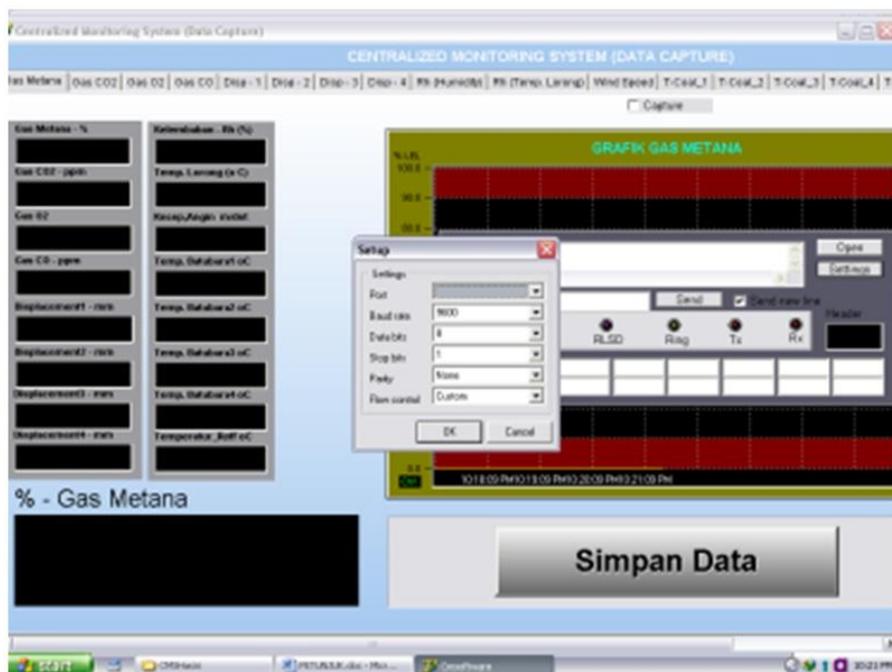
Pada perangkat komputer data direkam, disimpan dan dibaca secara langsung oleh aplikasi perangkat lunak *centralized monitoring system* (CMS). Perangkat lunak tersebut mampu melakukan pembacaan, pengolahan dan penyimpanan data dalam *database* komputer, sehingga kondisi di dalam tambang batubara dapat dimonitor secara langsung dari ruang kontrol di permukaan tambang. Perangkat lunak juga dapat memberikan tanda berupa alarm apabila terjadi kondisi yang melampaui ambang batas. Proses perekaman dan penyimpanan data oleh perangkat lunak pada sistem masih dilakukan secara manual dikarenakan kapasitas dari

harddisk komputer yang belum mencukupi untuk penyimpanan data secara kontinu. Tampilan dari perangkat lunak CMS dapat dilihat pada Gambar 3.

Setiap rangkaian elektronik yaitu rangkaian *datalogger*, *repeater* dan radio modem masing-masing dirangkai dalam kotak khusus (*powerbox*) yang didesain kuat dan aman untuk digunakan pada tambang bawah tanah dan terhubung dengan baterai kering dan *charger*, sehingga apabila listrik padam sistem masih dapat bekerja selama kurang lebih 8 jam sesuai dengan kapasitas dari baterai kering (Gambar 4).



Gambar 2. RS485 repeater dan X-stream™ PKG RF modem



Gambar 3. Tampilan dari perangkat lunak CMS



Gambar 4. Rangkaian dalam *powerbox*

Alat Pemantauan

Alat pemantau kondisi tambang batubara yang disiapkan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya antara lain: pemantauan gas metana (CH_4), gas karbondioksida (CO_2), gas karbonmonoksida (CO), gas oksigen (O_2), pergerakan batuan atap dan temperatur batubara.

Terdapat dua jenis sensor yang digunakan pada alat pemantau gas yaitu sensor gas inframerah keluaran Dynament Ltd. (sensor gas CH_4 dan CO_2) dan sensor gas elektrokimia keluaran Membrapor (sensor gas CO dan O_2) seperti yang terlihat pada Gambar 5. Sensor gas elektrokimia merupakan jenis sensor gas yang dapat mendeteksi gas beracun dengan konsentrasi yang rendah. Untuk gas yang mudah meledak jenis sensor gas infrared lebih handal terutama untuk pengukuran yang terus menerus (Chaulya dan Prasad, 2016).

Sensor CH_4 yang digunakan memiliki kemampuan deteksi 0-5% volume sedangkan kemampuan deteksi sensor CO_2 adalah 0-5000 ppm. Sensor gas CO menggunakan *high sensitive CO sensor* tipe CO-CF 200 yang dapat mendeteksi konsentrasi gas 0-200 ppm. Untuk sensor O_2 digunakan tipe $\text{O}_2/\text{M}-100$. Sensor gas inframerah memiliki keunggulan dibanding sensor elektrokimia karena tingkat sensitifitasnya yang tinggi dan lebih tahan lama, juga telah memiliki paten untuk dapat digunakan pada area berbahaya seperti pada area tambang (International Sensor Technology, 2010).

Kemampuan deteksi dari tiap sensor gas tersebut disesuaikan dengan ambang batas

konsentrasi gas yang diperbolehkan di dalam tambang antara lain berdasarkan standar dalam Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No.555.K/26/M.PE/1995 mengenai keselamatan dan kesehatan kerja pertambangan umum, yaitu standar O_2 minimum 19,5% volume, CO maksimum adalah 50 ppm (0,005% Volume), sedangkan CO_2 maksimum 5000 ppm (0,5% volume). Kadar CH_4 pada tambang batubara bawah tanah kadar maksimum adalah 1% volume pada sistem ventilasi udara, pada area permukaan kerja konsentrasi maksimum adalah 0,5% volume pada jalan udara masuk dan 0,8% volume pada jalan udara keluar.

Untuk pemantauan pergerakan batuan atap (*highwall*) digunakan potensiometer hasil pengembangan tahun 2008 yang telah diujicoba dan bekerja dengan baik. Potensiometer sebagai transduser membaca pergerakan pada atap dalam satuan mm/waktu.

Pada pemantauan temperatur batubara digunakan termokopel tipe-K yang terhubung dengan *thermocouple input module ADAM-4018+*. Modul menerima input temperatur dari empat buah termokopel yang dimasukkan ke dalam lapisan batubara yang terlebih dahulu telah dibuat lubang bor dengan kedalaman kurang lebih 2 meter.

Penerapan Sistem Pemasangan Jaringan Pemantauan Terpadu

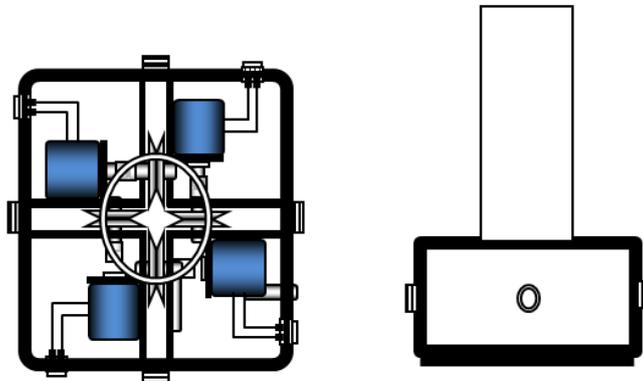
Langkah pertama yang dilakukan adalah membentangkan kabel data mulai dari mulut tambang pada titik 1 sampai dengan titik-titik pemasangan alat pengawasan di sekitar J5C (titik 5) dengan jarak sekitar 1500 meter dari mulut tambang. Bentangan kabel tersebut digantungkan di sepanjang dinding terowongan agar aman dan tidak mengganggu kegiatan tambang bawah tanah. Rangkaian radio modem dan *receiver* ditempatkan pada titik 1 dan 2 di dekat mulut tambang (Gambar 7). Rangkaian *repeater* ditempatkan pada titik 4 sebagai penguat data sehingga dapat menyampaikan data hasil pengukuran dari *datalogger* hingga ke *receiver* sebagai penerima yang diletakan pada mulut tambang (titik 2). Data lalu dikirimkan menggunakan sistem telemetri oleh radio modem (titik 1) dari mulut tambang ke permukaan tambang

(ruang kontrol) dengan jarak sekitar 1 km. Lokasi penempatan peralatan pemantauan yang tepat adalah di dekat permukaan tambang, agar sistem dapat memonitor sampai ke

tempat terjauh dari terowongan tambang juga merupakan titik yang masih beresiko. Skema titik lokasi pemasangan peralatan dan jaringan dapat dilihat pada Gambar 8.



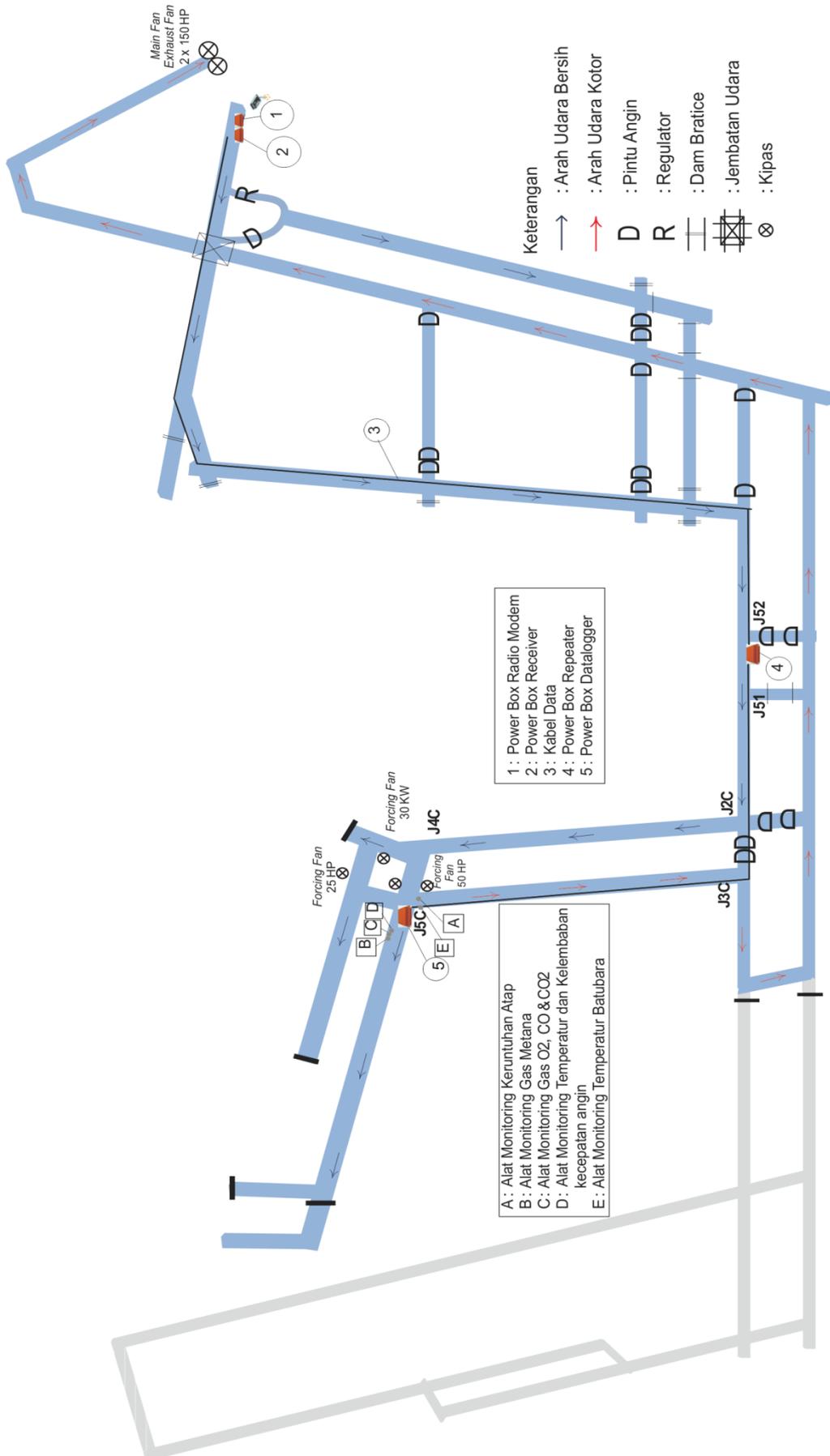
Gambar 5. Sensor gas



Gambar 6. Rangkaian peralatan pemantauan pergerakan atap



Gambar 7. Pemasangan rangkaian power box



Gambar 8. Skema lokasi pemasangan sistem dan peralatan pemantauan terpadu di lokasi tambang batubara bawah tanah

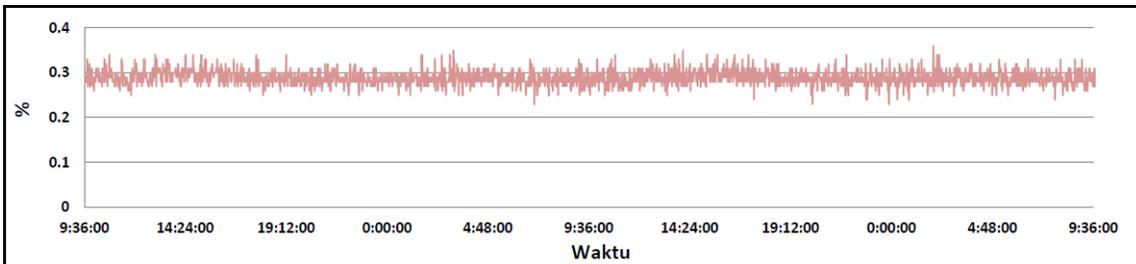
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari kegiatan ujicoba sistem pemantauan kondisi di dalam tambang dapat terbaca pada layar perangkat lunak di ruang kontrol kanal 1 sampai dengan 4 secara berturut turut untuk kondisi gas O₂, CH₄, CO, dan CO₂; kanal 5 sampai dengan 8 untuk pergerakan batuan; kanal 9 untuk kelembaban; kanal 10 temperatur udara; kanal 11 untuk kecepatan angin; dan pembacaan temperatur batubara pada kanal 12 sampai dengan 16. Contoh hasil pemantauan berupa grafik perubahan konsentrasi terhadap waktu.

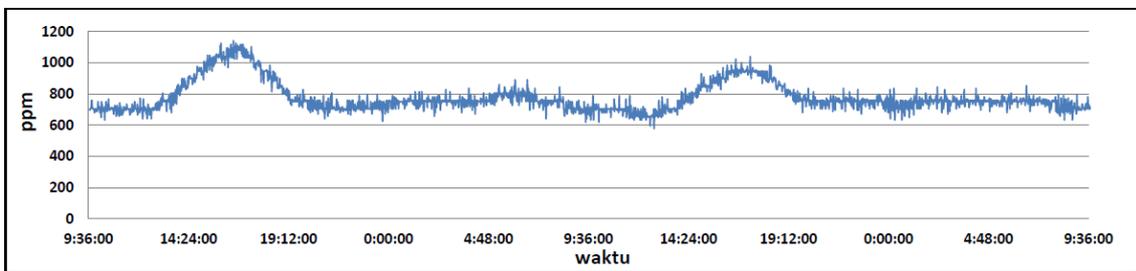
Untuk memenuhi kebutuhan udara bersih di dalam tambang terdapat standar kualitas udara tambang antara lain berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh *Mine Safety Health Administration* (MSHA) dan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No.555K/26/M.PE/1995. Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh MSHA konsentrasi O₂ di dalam tambang minimum adalah 19,5% volume, CO₂ maksimum 5000 ppm (0,5% volume), CO maksimum 50 ppm (0,005% volume), dan

standar maksimum CH₄ adalah 1% volume pada permukaan kerja dan 2% volume pada jalur udara kotor (*return way*). Standar CH₄ berdasarkan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No.555K/26/M.PE/1995 adalah 1% volume pada sistem ventilasi udara, 0,5% volume pada area permukaan kerja dan jalan udara masuk, dan 0,8% volume pada jalan udara keluar.

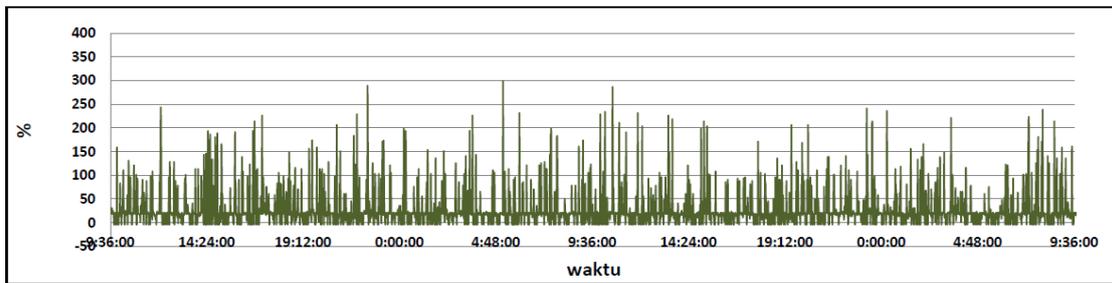
Dari hasil ujicoba diperoleh konsentrasi CH₄ sebesar 0,28%, konsentrasi CO₂ antara 720 sampai dengan 1100 ppm, konsentrasi O₂ sebesar 20,9% dan konsentrasi CO adalah 9,5 ppm (Gambar 9 sampai dengan 12). Kondisi tersebut menunjukkan kualitas udara di dalam tambang berada di bawah nilai ambang batas konsentrasi gas yang diperbolehkan dalam tambang. Pada Gambar 10 terdapat kenaikan konsentrasi gas CO₂ pada jam 12.00 sampai dengan jam 16.00. Kondisi tersebut diakibatkan oleh aktifitas penambangan yang mencapai puncaknya pada jam tersebut, antara lain dari pemakaian peralatan yang beroperasi seperti genset, ban berjalan, dan kegiatan operasi tambang lainnya.



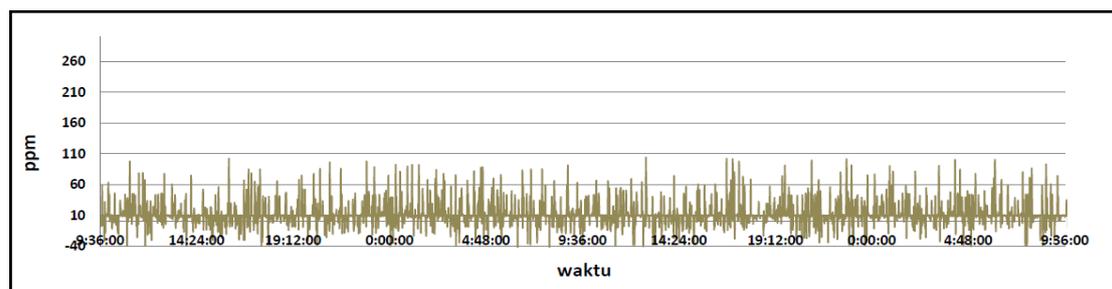
Gambar 9. Contoh tampilan konsentrasi gas metana hasil ujicoba



Gambar 10. Contoh tampilan konsentrasi gas karbondioksida



Gambar 11. Contoh tampilan konsentrasi gas oksigen



Gambar 12. Contoh tampilan konsentrasi gas karbonmonoksida

Hasil pemantauan pergerakan batuan atap juga cenderung stabil yang menandakan bahwa tidak ada pergerakan pada batuan atap selama ujicoba (Gambar 13). Adapun dari hasil pemantauan kelembaban udara (*relative humidity/%RH*) kelembaban udara hasil ujicoba terbaca antara 71,4% sampai dengan 71,6% (Gambar 14).

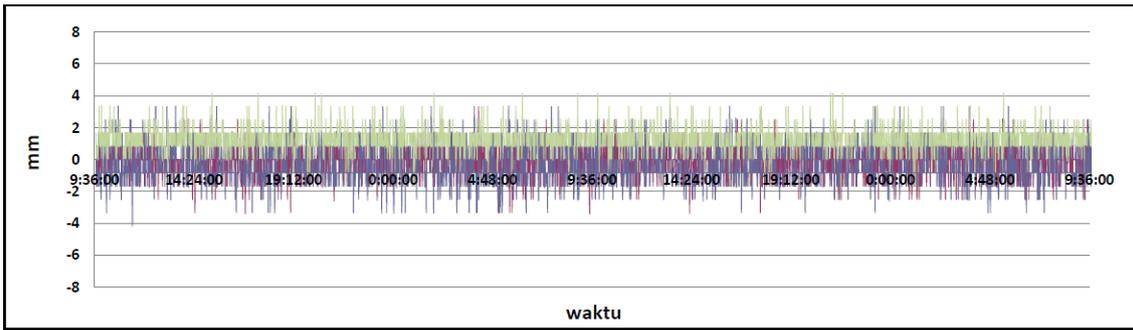
Temperatur batubara pada empat titik pemantauan di dekat permukaan tambang cenderung tetap yaitu berturut-turut sebesar 29,1°C; 29,1°C; 28,4°C dan 28,9°C (Gambar 15). Dari hasil ujicoba tersebut dapat dilihat bahwa sistem dan sensor dapat membaca kondisi di dalam tambang, hanya saja pada grafik hasil pembacaan masih terdapat banyak *noise*, terutama hasil pembacaan sensor gas O₂ dan CO₂. Hal tersebut dapat disebabkan oleh adanya gangguan dalam rangkaian (jaringan) atau dari sensitifitas sensor.

Sensor gas CO dan O₂ menggunakan sensor gas elektrokimia. Sensor jenis ini memiliki beberapa kekurangan, antara lain: sensor sensitif terhadap gas lain selain gas target, juga suhu yang dapat mempengaruhi hasil pembacaan sensor. Perubahan tekanan dan kelembaban dapat menyebabkan sensor menghasilkan lonjakan arus sehingga dapat

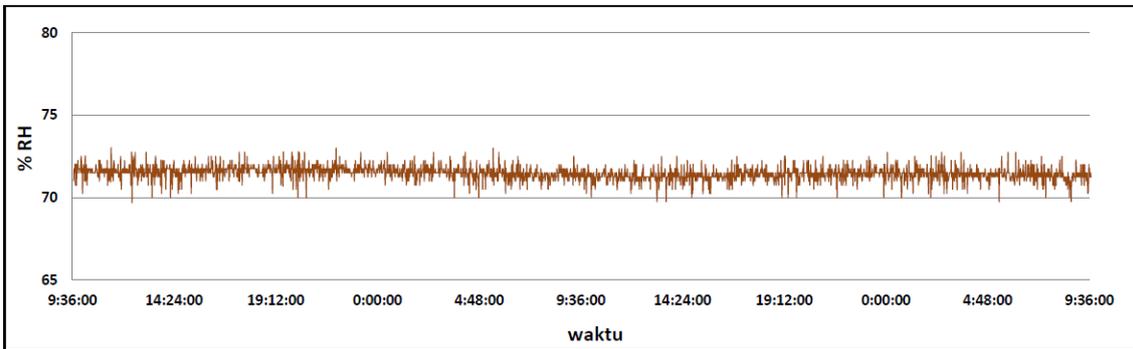
menyebabkan terjadinya lonjakan pada grafik hasil pembacaan (Sennequier, 2013). Namun sensor gas elektrokimia merupakan sensor gas yang dapat mendeteksi gas beracun seperti gas CO dan dapat mengukur gas dalam konsentrasi yang relatif rendah (Kumar *dkk.*, 2013; Yunusa *dkk.*, 2014).

Sensor yang digunakan untuk mendeteksi gas CH₄ dan CO₂ adalah sensor gas inframerah yang memiliki respon deteksi yang cepat karena tidak ada reaksi kimia dan juga lebih stabil (Li dan Yin, 2010; Chaulya dan Prasad, 2016).

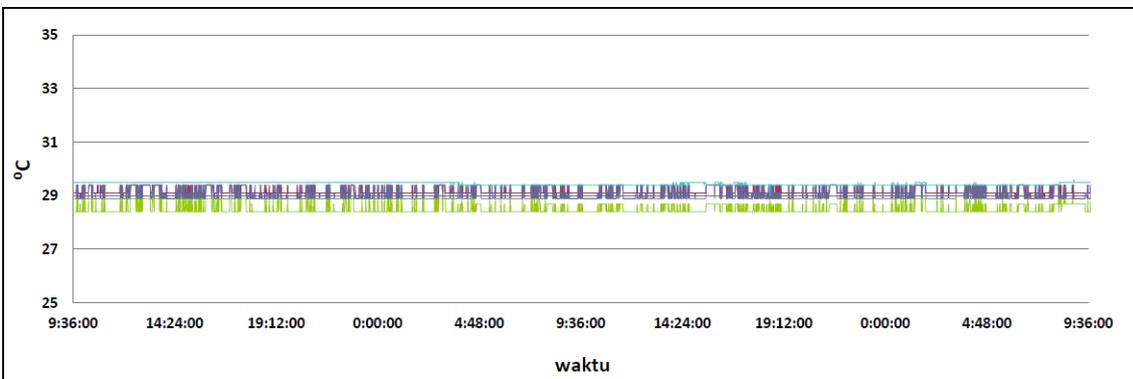
Ujicoba juga dilakukan pada saat kipas utama (*exhaust fan*) berhenti selama 5 jam yang mengakibatkan aliran udara terhenti. Ventilasi udara merupakan kebutuhan vital dalam kegiatan pada tambang bawah tanah. Ventilasi bertujuan untuk menyediakan dan mendistribusikan udara bagi para pekerja tambang yang berada jauh dari permukaan sesuai dengan kebutuhan manusia dan juga sistem yang terdapat didalamnya. Selain itu juga ventilasi bertujuan untuk mengencerkan dan membuang gas beracun dan debu dari tempat kerja, menjaga temperatur dan kelembaban udara agar sesuai dengan tingkat kenyamanan pekerja.



Gambar 13. Pergerakan batuan



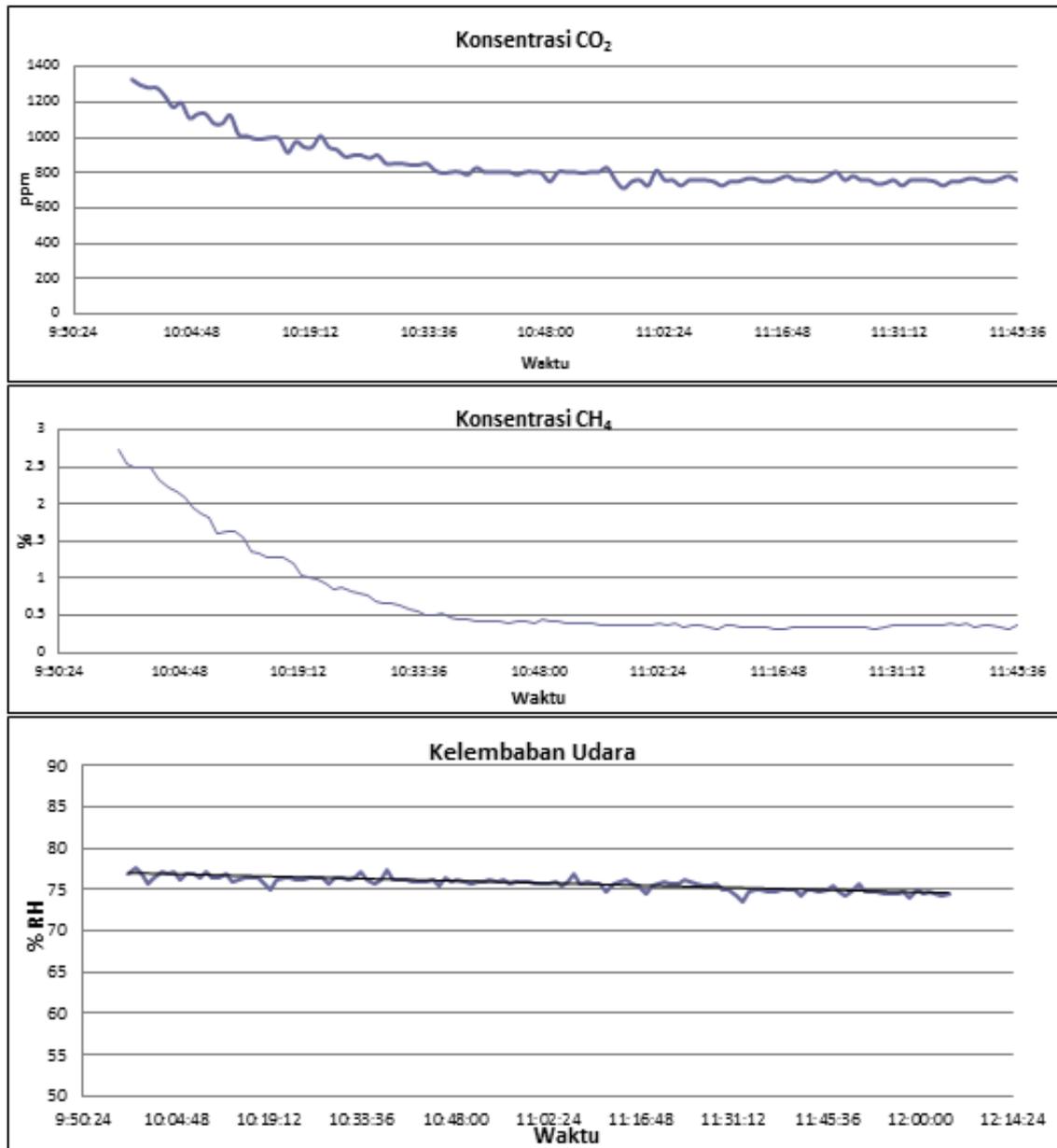
Gambar 14. Konsentrasi kelembaban udara



Gambar 15. Temperatur batubara

Dari hasil ujicoba tersebut sistem membaca bahwa terjadi akumulasi konsentrasi gas CH₄ hingga mencapai 2,7%, konsentrasi gas CO₂ juga meningkat menjadi 1300 ppm dan kenaikan konsentrasi kelembaban udara menjadi 76,7%. Setelah kipas utama

dinyalakan kembali, konsentrasi gas CH₄ dan CO₂ kembali menurun (terjadi pengenceran konsentrasi udara) menjadi 0,3% dan 750 ppm dan konsentrasi kelembaban udara menjadi 74,5% (Gambar 16).



Gambar 16. Perubahan kondisi akibat penghentian kipas utama

Sistem yang dirancang merupakan sistem pemantauan terpadu keselamatan kerja tambang bawah tanah. Hasil ujicoba menunjukkan bahwa sistem hasil rancangan dapat bekerja dengan baik dalam melakukan pemantauan kondisi di dalam tambang. Sistem komunikasi merupakan sistem yang terintegrasi yang dapat menyampaikan data dari dalam tambang ke ruang kontrol di permukaan tambang secara langsung.

KESIMPULAN

Dari hasil ujicoba di lokasi tambang batubara bawah tanah, sistem pemantauan terpadu kondisi tambang bawah tanah telah dapat terpasang dan diaplikasikan dengan baik. Sistem terbukti dapat melakukan pemantauan kondisi di dalam tambang secara langsung dan terintegrasi mulai dari dalam tambang hingga ke ruang kontrol di permukaan tambang dengan menggunakan sistem kabel dan telemetri. Namun demikian masih harus dilakukan penyempurnaan dan kajian lebih

lanjut antara lain penambahan kapasitas *database* dan penelitian tingkat akurasi dari komponen peralatan dan sistem komunikasi peralatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaulya, S. and Prasad, G. M. (2016) *Sensing and monitoring technologies for mines and hazardous areas*. Elsevier. Available at: <https://www.elsevier.com/books/sensing-and-monitoring-technologies-for-mines-and-hazardous-areas/chaulya/978-0-12-803194-0>.
- International Sensor Technology (2010) *Chapter 5: Infrared gas sensor*, <http://www.intlsensor.com>. Available at: <http://www.intlsensor.com/pdf/infrared.pdf> (Accessed: January 19, 2017).
- Kumar, A., Kingson, T. M. G., Verma, R. P., Kumar, A., Mandal, R., Dutta, S., Chaulya, S. K. and Prasad, G. M. (2013) "Application of gas monitoring sensors in underground coal mines and hazardous areas," *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)*, 3(3), pp. 9–22. Available at: https://www.researchgate.net/publication/292148696_Application_of_Gas_Monitoring_Sensors_in_Underground_Coal_Mines_and_Hazardous_Areas.
- Li, C. and Yin, Z. (2010) "Infrared gas sensor," in *Proceedings of the Third International Symposium on Electronic Commerce and Security Workshops (ISECS '10)*. Guangzhou, China, pp. 101–104.
- Menteri Pertambangan dan Energi (1995) *Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No.555.K/26/M.PE/1995 mengenai Keselamatan dan kesehatan kerja pertambangan umum*. Indonesia.
- Newman, D. and Zipf, R. K. (2005) *Analysis of highwall mining stability - The effect of multiple seams and prior auger mining on design*, Centers for Disease Control and Prevention. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1054.html> (Accessed: December 18, 2016).
- Peng, S. S. (2010) *Understanding the Chinese coal industry*, *Coal Age News*. Available at: <http://www.coalage.com/index.php/features/593-understanding-the-chinese-coal-industry.html> (Accessed: December 18, 2016).
- Sennequier, P. (2013) *Signal conditioning for electrochemical sensors: Application note, AN 4348, STMicroelectronics Group of Companies*. Available at: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/b7/3a/2b/63/6c/10/46/27/DM00093722.pdf/files/DM00093722.pdf/jcr:content/translations/en.DM00093722.pdf (Accessed: December 18, 2016).
- United States Department of Labor (2016) *MSHA fatality statistics*, <https://arlweb.msha.gov>. Available at: <https://arlweb.msha.gov/stats/charts/chartshome.htm> (Accessed: December 18, 2016).
- Yunusa, Z., Hamidon, M. N., Kaiser, A. and Awang, Z. (2014) "Gas sensors: A review," *Sensors & Transducers*, 168(4), pp. 61–75. Available at: http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/april_2014/Vol_168/P_1957.pdf.
- Zhang, Y., Yang, W., Han, D. and Kim, Y.-I. (2014) "An integrated environment monitoring system for underground coal mines—Wireless sensor network subsystem with multi-parameter monitoring.," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(7), pp. 13149–70. doi: 10.3390/s140713149.