

PENINGKATAN KUALITAS FRAGMENTASI DAN *DIGGING TIME* DENGAN MENGGUNAKAN DETONATOR ELEKTRONIK DI PIT CMD PT KALTIM PRIMA COAL

Aris Hermawanto¹⁾ dan Radja Nove Putra²⁾

¹⁾ Continuous Improvement MOD, PT Kaltim Prima Coal

²⁾ Departemen Technical Services, PT AEL Indonesia

ABSTRAK

Salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas hasil peledakan adalah tingkat keakurasian waktu tunda dari sistem inisiasi peledakan yang digunakan. Saat ini, peledakan di Pit PAMA CMD PT Kaltim Prima Coal (PT KPC) menggunakan detonator non electric (nonel) yang memiliki tingkat keakurasian waktu tunda sebesar $\pm 97-98\%$ dari waktu tunda rencana. Hasil analisis fragmentasi menggunakan *software* WipFrag™ dan pengukuran *digging time* pada peledakan nonel menunjukkan % *passing* 300 mm (P30) sebesar 80,64% dengan *digging time* 11,10 detik di Pit Pelikan dan P30 sebesar 82,66% dengan *digging time* 10,41 detik di Pit Kanguru. Ukuran fragmentasi pada peledakan nonel di Pit PAMA CMD aktualnya telah memenuhi standar ukuran fragmentasi yang diterapkan di PT KPC yaitu $P30 \geq 80\%$, namun masih terdapat potensi untuk meningkatkan hasil ini dengan menggunakan detonator elektronik DigiShot™ Plus (DS+). Penggunaan DS+ yang memiliki tingkat keakurasian waktu tunda mencapai $\pm 99.8\%$ dari waktu tunda rencana, selain dapat meningkatkan kualitas ukuran fragmentasi juga dapat memperbaiki *digging time* dan mengurangi penggunaan *Lead in Line* (LiL) dengan aplikasi *remote firing*. Hasil peledakan DS+ di Pit Pelikan menunjukkan P30 sebesar 86,24% atau 5,6% lebih tinggi dibanding peledakan nonel dengan *digging time* 10,22 detik atau 7,9% lebih cepat dibanding peledakan nonel. Sementara data yang didapat di Pit Kanguru menunjukkan P30 sebesar 87,55% atau 4,9% lebih tinggi dengan *digging time* 9,66 detik atau 7,2% lebih cepat dibanding peledakan nonel. Data ini didapatkan dari penggunaan DS+ sebanyak 8.541 unit di 89 lokasi peledakan di Pit Pelikan dan Pit Kanguru PAMA CMD PT KPC. Selaras dengan peningkatan pada kualitas fragmentasi dan *digging time*, peledakan DS+ di Pit PAMA CMD juga berkontribusi terhadap perbaikan produktivitas alat gali yang meningkat $\pm 2,5\%$ dan penghematan penggunaan LiL sepanjang 49,8 km. Dapat disimpulkan, penggunaan detonator elektronik pada peledakan sangat berpotensi untuk meningkatkan kualitas hasil peledakan dan penghematan biaya peledakan jika diaplikasikan dengan optimal.

Kata kunci: elektronik, fragmentasi, *digging time*

ABSTRACT

One important factor that influences the quality of blasting results is the accuracy of the delay of the blasting initiation system used. At present, the blast activity at PAMA CMD Pit PT Kaltim Prima Coal uses a non-electric (nonel) detonator which has a delay time accuracy of $\pm 97-98\%$ of the planned delay. The results of fragmentation analysis using WipFrag™ software and measurement of digging time on nonel blasting showed % passing 300 mm (P30) was 80.64% with digging time of 11.10 seconds in the Pelikan Pit and P30 of 82.66% with digging time of 10.41 seconds in the Kanguru Pit. The size of the fragmentation in nonel blast at PAMA CMD Pit actually has met the standard fragmentation size applied at PT KPC which is $P30 \geq 80\%$, but there is still potential to increase this

result by using the DigiShot™ Plus (DS +) electronic detonator. The use of DS + which has an accuracy of delay time reaching $\pm 99.8\%$ of the plan delay time, not only to increase the quality of the fragmentation size, but also improve digging time and reduce the use of Lead in Line (LiL) with remote firing applications. The results of DS + blasting in Pelikan Pit showed P30 was 86.24% or 5.6% higher than nonel blasting with digging time 10.22 seconds or 7.9% faster than nonel blasting. The data obtained in the Kanguru Pit showed P30 was 87.55% or 4.9% higher with a digging time of 9.66 seconds or 7.2% faster than nonel blasting. This data was obtained from the use of DS + as many as 8,541 units in 89 blasting locations in the Pelikan Pit and the Kanguru PAMA CMD Pit PT KPC. In line with the improvement in the quality of fragmentation and digging time, DS + blasting in the PAMA CMD Pit also contributed to improved digging equipment productivity which increased by $\pm 2.5\%$ and savings in the use of LiL along 49.8 km. It can be concluded, the use of electronic detonators in blasting has the potential to improve the quality of blasting results and blast cost savings if applied optimally.

Keywords: electronics, fragmentation, digging time

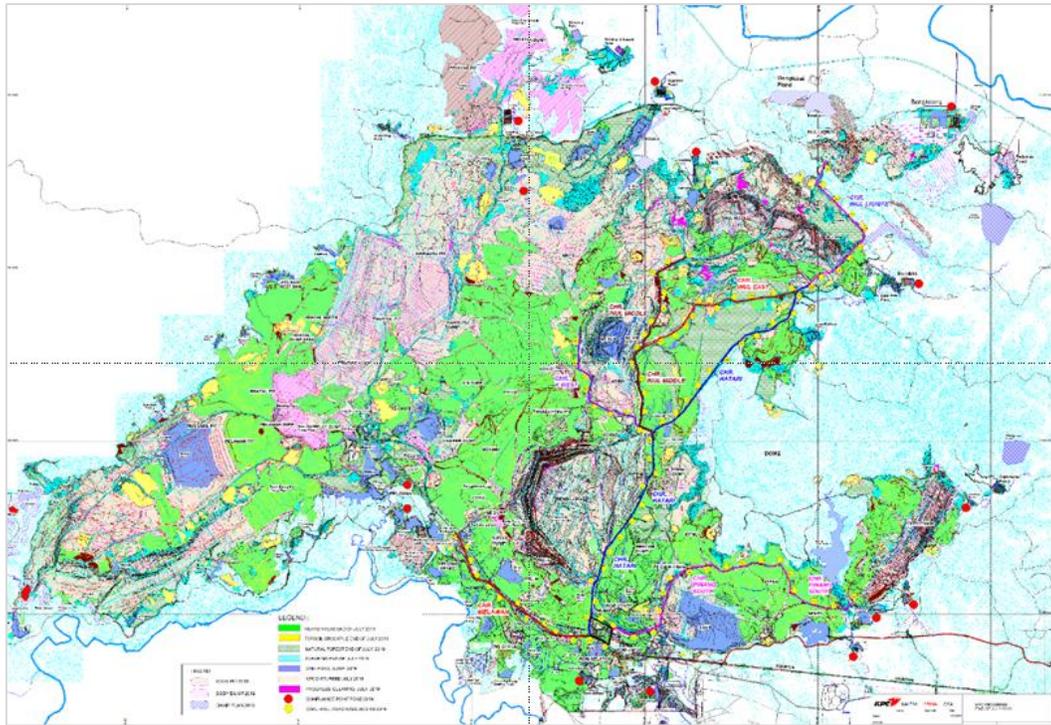
A. PENDAHULUAN

PT Kaltim Prima Coal (KPC) adalah perusahaan tambang batubara terbesar yang ada di Indonesia, berlokasi di Kota Sangatta, Kalimantan Timur. PT KPC menerapkan metode penambangan terbuka (*surface mining*) dan menargetkan produksi batubara di 2018 sebanyak 62 juta ton. Dengan nisbah kupas (*stripping ratio*) 9:1, maka jumlah tanah penutup yang harus dipindahkan adalah sebanyak 558 juta bcm. Operasional tambang PT KPC dibagi menjadi 2 bagian, yaitu MOD (*Mining Operation Division*) dan CMD (*Contract Mining Division*). MOD adalah area dimana PT KPC sendiri yang menjalankan operasional tambangnya sedangkan CMD adalah area dimana PT KPC menugaskan kontraktor tambang (Thiess, PAMA, dan Darma Henwa) untuk menjalankan operasional penambangan. *Site* PT KPC terdiri dari 2 *site* besar yang berlokasi di Sangatta dan Bengalon. Di Sangatta (Gambar 1), terdapat beberapa pit aktif PT KPC yang ditambang oleh PAMA antara lain Pit Pelikan, Pit Kanguru, Pit Pelangi (PSE), dan Pit Pedayak.

Banyaknya jumlah tanah penutup yang harus dipindahkan membuat proses pengupasan tanah penutup menjadi salah satu hal yang krusial untuk mencapai target produksi yang telah ditetapkan. Dalam proses pemindahan tanah penutup, kegiatan peledakan memegang peranan penting karena sebagian besar proses pemindahannya memerlukan peledakan. Berdasarkan target awal PT KPC di tahun 2018, 85% dari tanah penutup yang ada memerlukan peledakan untuk bisa diberai lalu dipindahkan. Dengan menggunakan angka target *powder factor* tahun 2018 sebesar 0,26 kg/bcm, maka akan dibutuhkan bahan peledak curah sebanyak 123.000 ton.

PT KPC mengeluarkan biaya yang cukup besar untuk menyediakan bahan peledak curah ini sehingga hasil akhir dari peledakan perlu dioptimalkan, salah satunya dengan memanfaatkan teknologi terbaru dalam proses peledakan. Sistem inisiasi peledakan yang mayoritas saat ini digunakan di area CMD adalah sistem inisiasi non elektrik (nonel) dengan tingkat akurasi waktu tunda sebesar 97-98% dari waktu tunda yang direncanakan. Secara teoritis, akurasi dari waktu tunda detonator elektronik yang lebih tinggi hingga mencapai 99,8%, akan memberikan efek positif terhadap fragmentasi material peledakan yang dihasilkan. Tidak hanya itu, di beberapa aktivitas peledakan tambang dimana isu getaran tanah menjadi isu, detonator elektronik juga dapat digunakan untuk meningkatkan produksi dengan menggunakan waktu tunda yang tepat. Oleh karena itu, dilakukan suatu proyek perbandingan

antara penggunaan detonator nonel dengan detonator elektronik di peledakan untuk menjustifikasi keunggulan dan manfaat lebih dari detonator elektronik ini.



Gambar 1. Kemajuan tambang KPC Site Sangatta.

- **Detonator Elektronik (DigiShot™ Plus)**

Perkembangan teknologi terbaru dalam hal peledakan seyogyanya membawa manfaat terhadap pengguna teknologi tersebut. Hal ini juga berlaku pada sistem inisiasi peledakan yang digunakan dimana tingkat akurasi waktu tunda yang hampir sempurna pada detonator elektronik seharusnya memberi hasil peledakan yang lebih baik dibanding jika menggunakan sistem inisiasi detonator nonel.

PT AEL Indonesia selaku penyedia jasa peledakan untuk PT KPC memiliki produk detonator elektronik dengan nama dagang DigiShot™ Plus (Gambar 2). Sesuai dengan fungsi dan fiturnya, detonator elektronik tidak hanya lebih baik dalam hal keakurasian waktu tunda namun juga menawarkan nilai lebih dalam hal tingkat keselamatan dan keamanan pengoperasian.

Beberapa keunggulan fitur yang dimiliki oleh detonator elektronik antara lain:

1. Waktu tunda yang akurat

Detonator elektronik mempunyai *electronic circuit board* yang dapat diprogram sehingga waktu tunda akan menjadi presisi karena diatur lewat mekanisme komputerisasi. Akurasi waktu tunda ini akan membantu mendapatkan hasil peledakan yang lebih terkontrol.

2. Fleksibilitas

Berbeda dengan detonator nonel yang waktu tundanya telah ditentukan pada saat pembuatan, setiap unit detonator elektronik dapat diprogram waktu tundanya sesuai dengan yang diinginkan pengguna. Waktu tunda juga dapat diberikan lebih dahulu ke detonator, bahkan beberapa hari sebelum peledakan, sehingga menyediakan fleksibilitas kepada pengguna.



Gambar 2. Detonator elektronik DigiShot™ Plus.

3. Terkontrol
Dengan fleksibilitas yang ada serta keakurasian yang tinggi dari waktu tunda, efek peledakan terhadap lingkungan lebih terkontrol seperti getaran peledakan, bentuk dan pergerakan dari hasil peledakan, stabilitas lereng dampak dari peledakan, dan juga ukuran fragmentasi yang diinginkan.
4. Keamanan penggunaan
Detonator elektronik pada umumnya diproteksi oleh nomor sandi tertentu dimana tidak semua orang dapat menginisiasinya. Pengecekan detonator elektronik juga dapat dilakukan secara menyeluruh sebelum peledakan sehingga menghilangkan potensi rangkaian peledakan tidak terangkai yang merupakan kesalahan yang sering dijumpai di peledakan detonator nonel.
5. Kemudahan penggunaan
Menggunakan perangkat lunak tertentu untuk melakukan pemrograman pada unit dan juga mudah dalam pengoperasiannya. Proses pelatihan untuk menggunakan sistem ini pun pada umumnya tidak membutuhkan waktu yang lama.
6. Inisiasi tanpa kabel (*remote firing*)
Detonator elektronik dapat diinisiasi dari jarak jauh menggunakan frekuensi tertentu. Hal ini akan meningkatkan faktor keselamatan terhadap pengguna akan bahaya langsung pada saat inisiasi peledakan sedang dilakukan. Selain itu, metode ini juga akan menghemat biaya jika dibandingkan metode konvensional detonator nonel.

B. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk memverifikasi keunggulan dari sistem inisiasi detonator elektronik terhadap detonator nonel, proyek dilakukan dengan cara membandingkan langsung hasil dari kedua sistem inisiasi ini terbatas di area pit PAMA PT KPC. Bertujuan untuk meningkatkan produktivitas alat gali di beberapa area tertentu, Pit Pelikan dan Pit Kanguru PAMA dipilih menjadi tempat dilakukannya proyek perbandingan ini.

Sebanyak 89 peledakan detonator elektronik (Tabel 1) dilakukan selama proyek ini berlangsung dimana tim melakukan observasi penuh terhadap proses dan hasil dari 22 peledakan diantaranya. Observasi ini dilakukan dalam bentuk pengamatan langsung terhadap hasil fragmentasi pada saat penggalian material peledakan dan juga pengamatan langsung terhadap waktu penggalian alat gali tertentu. Peningkatan data produksi dan pengurangan biaya akan menjadi dampak positif dari waktu penggalian yang lebih cepat dan persentase peningkatan produksi ini akan dihitung dengan menggunakan beberapa pendekatan. Hal ini dilakukan karena hasil peledakan tidak hanya menjadi satu-satunya faktor yang mempengaruhi namun masih banyak faktor lain antara lain performa dari alat gali, keterampilan dari operator, kondisi jalan dan lokasi penggalian, dan juga waktu tunggu baik bagi alat gali maupun alat muat.

Tabel 1. Penyebaran peledakan yang menggunakan detonator elektronik

Pit	Lokasi	Jumlah Peledakan	Jumlah Lubang Ledak	<i>Powder Factor</i>
Kanguru	Blok D	8	676	0,207
Kanguru	JCB	2	241	0,250
Kanguru	Konsel	7	710	0,207
Kanguru	Komut	3	188	0,208
Kanguru	Marsela	12	1.254	0,207
Kanguru	Raline	6	453	0,203
Pelikan	Panel 3	5	563	0,211
Pelikan	PCB	28	2.841	0,209
Pelikan	PW	8	692	0,205
Pelikan	Buktim	10	901	0,210
Total		89	8.519	0,209

Sebagai pembandingan, tim juga melakukan observasi terhadap peledakan yang menggunakan detonator nonel. Agar perbandingannya proporsional, total 23 peledakan detonator nonel yang diobservasi juga sebagian besar adalah peledakan yang dilakukan di Pit Pelikan dan Pit Kanguru. Khusus untuk data waktu penggalian, dari 23 peledakan detonator nonel ini hanya 18 peledakan yang dapat diobservasi waktu penggaliannya.

Tabel 2. Penyebaran peledakan pembandingan yang menggunakan detonator nonel.

Pit	Lokasi	Jumlah Peledakan	Jumlah Lubang Ledak	<i>Powder Factor</i>
Kanguru	Marsela	7	784	0,201
Kanguru	Konsel	2	198	0,201
Pelikan	PCB	11	1.911	0,215
Pelikan	Buktim	3	303	0,209
Total		23	3.196	0,206

Hal lain yang dibandingkan selain hasil peledakan dari kedua sistem inisiasi tersebut adalah potensi pengurangan biaya dengan menerapkan metode inisiasi peledakan jarak jauh tanpa kabel (*remote firing*). Keseluruhan 89 peledakan detonator elektronik diinisiasi dengan metode *remote firing*. Metode ini membutuhkan kabel (*harness wire*) dari posisi lokasi peledakan ke posisi alat yang menginisiasi peledakan (*bench box*). Selanjutnya, dari posisi maksimum jarak 1 km, *bench box* akan berkomunikasi dengan alat pengontrol lain (*base station*) menggunakan frekuensi radio yang sepenuhnya diprogram

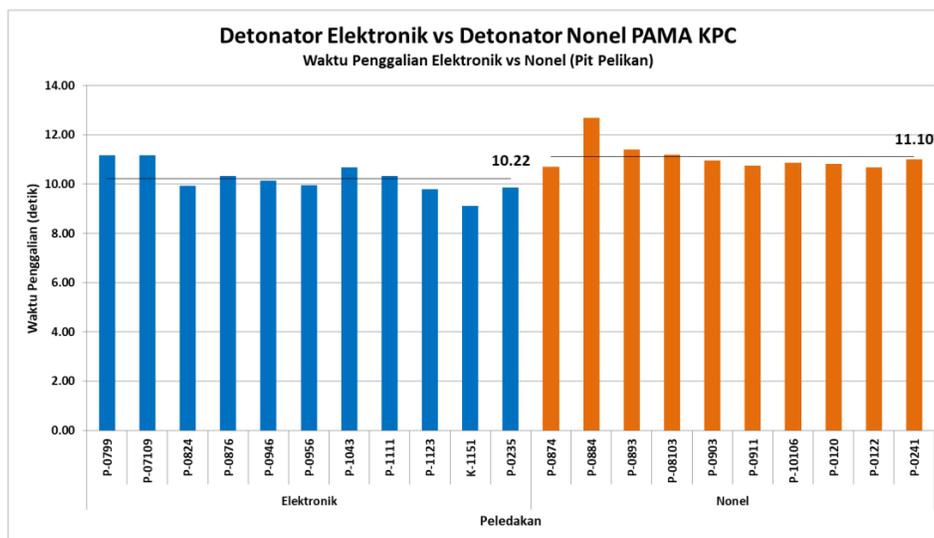
oleh juru ledak. Dari 89 peledakan yang dilakukan, total panjang *harness wire* yang digunakan dari posisi lokasi peledakan ke posisi *bench box* adalah 8.485 meter sehingga rata-rata penggunaan per lokasi peledakan akan menjadi 95 meter per lokasi (Tabel 3).

Tabel 3. Penggunaan *harness wire* untuk metode *remote firing*.

Pit	Lokasi	Jumlah Peledakan	Total Panjang <i>Harness Wire</i> (m)
Kanguru	Blok D	8	710
Kanguru	JCB	2	180
Kanguru	Konsel	7	610
Kanguru	Komut	3	255
Kanguru	Marsela	12	1.070
Kanguru	Raline	6	640
Pelikan	Panel 3	5	550
Pelikan	PCB	28	2.845
Pelikan	PW	8	800
Pelikan	Buktim	10	825
Total		89	8.485
Rata-rata		-	95

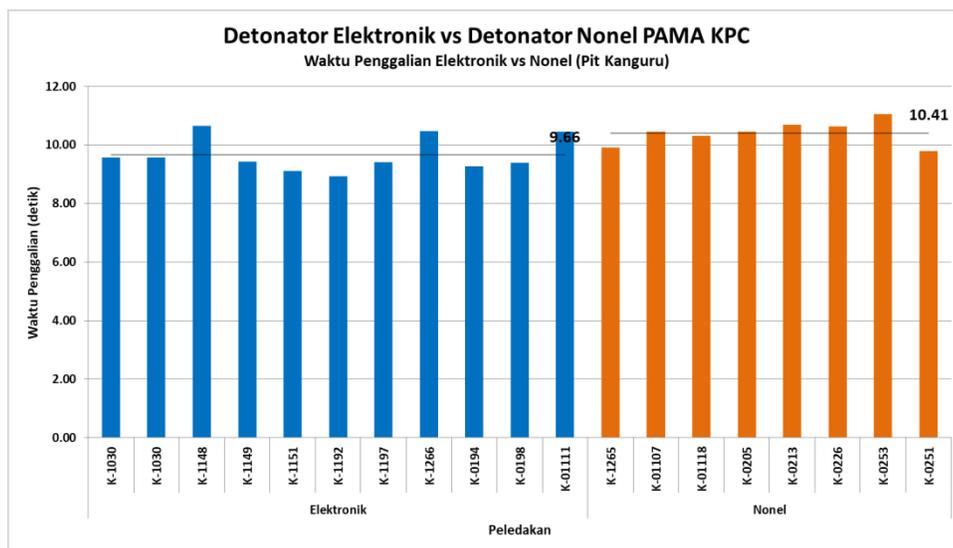
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan terhadap 22 peledakan detonator elektronik dan 18 peledakan detonator nonel, waktu penggalian hasil peledakan detonator elektronik di Pit Pelikan secara rata-rata lebih cepat 7,9% dibanding waktu penggalian hasil peledakan nonel. Rata-rata waktu penggalian hasil peledakan detonator elektronik adalah 10,22 detik sedangkan untuk peledakan detonator nonel adalah 11,10 detik (Gambar 3).



Gambar 3. Grafik perbandingan waktu penggalian di Pit Pelikan.

Waktu penggalian untuk detonator elektronik yang lebih cepat di Pit Pelikan sejalan dengan hasil yang didapat di Pit Kanguru. Waktu penggalian hasil peledakan detonator elektronik secara rata-rata lebih cepat 7,2% dibanding waktu penggalian hasil peledakan nonel. Rata-rata waktu penggalian hasil peledakan detonator elektronik adalah 9,66 detik sedangkan untuk peledakan detonator nonel adalah 10,41 detik (gambar 4).



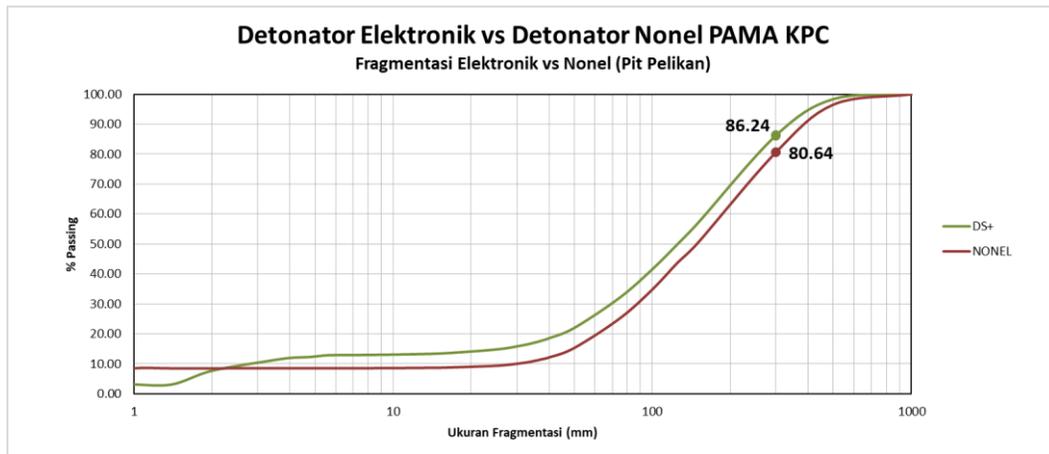
Gambar 4. Grafik perbandingan waktu penggalian di Pit Kanguru

Perbaikan di waktu penggalian ini berpengaruh terhadap peningkatan produktivitas alat gali. Secara rata-rata, persentase peningkatan produktivitas alat gali adalah sebesar 2,5% dimana untuk alat gali terbesar di Pit PAMA PC4000 produktivitasnya meningkat sebesar 2,6%, untuk PC3000 sebesar 2,3%, dan untuk Hitachi 2600 sebesar 2,7% (Tabel 4).

Tabel 4. Peningkatan produktivitas alat gali.

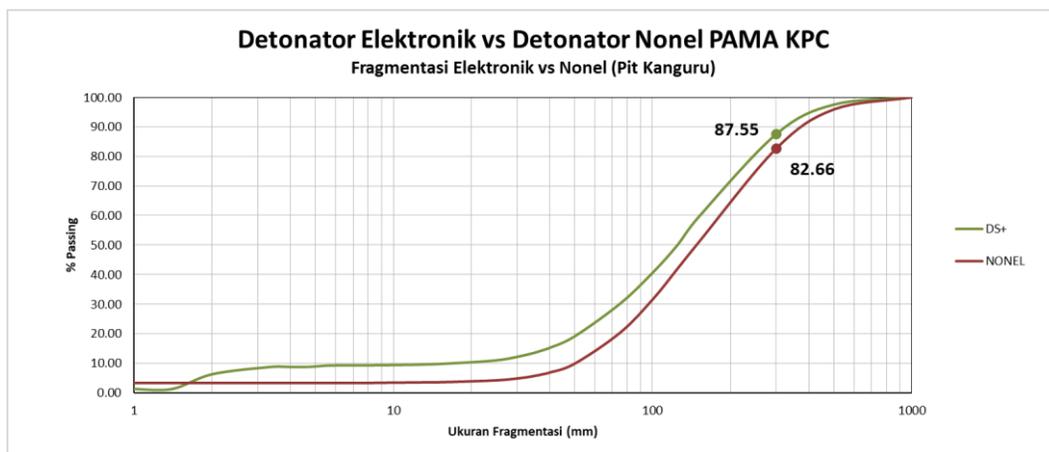
Tipe Alat Gali	Nomor Alat Gali	Peledakan	Produktivitas (bcm/jam)	Kenaikan Produktivitas (bcm/jam)	Kenaikan Produktivitas (%)
PC4000	SH304 & SH314	Elektronik	2.325	58.6	2.6
		Nonel	2.267		
PC3000	EX3004	Elektronik	1.255	28.3	2.3
		Nonel	1.227		
Hitachi 2600	EX750	Elektronik	1.405	36.9	2.7
		Nonel	1.368		

Hasil penggalian dan produktivitas yang lebih baik didapat dari peledakan elektronik ini juga didukung oleh data perbaikan terhadap fragmentasi hasil peledakan. Hasil fragmentasi di Pit Pelikan menunjukkan tingkat kelolosan 300 mm (P30) untuk material hasil peledakan detonator elektronik sebesar 86,24%, lebih besar dibandingkan peledakan detonator nonel sebesar 80.64% (gambar 5). Perbandingan persentase P30 ini adalah standar yang digunakan oleh PT KPC dalam hal penilaian terhadap fragmentasi hasil peledakan.



Gambar 5. Perbandingan fragmentasi di Pit Pelikan

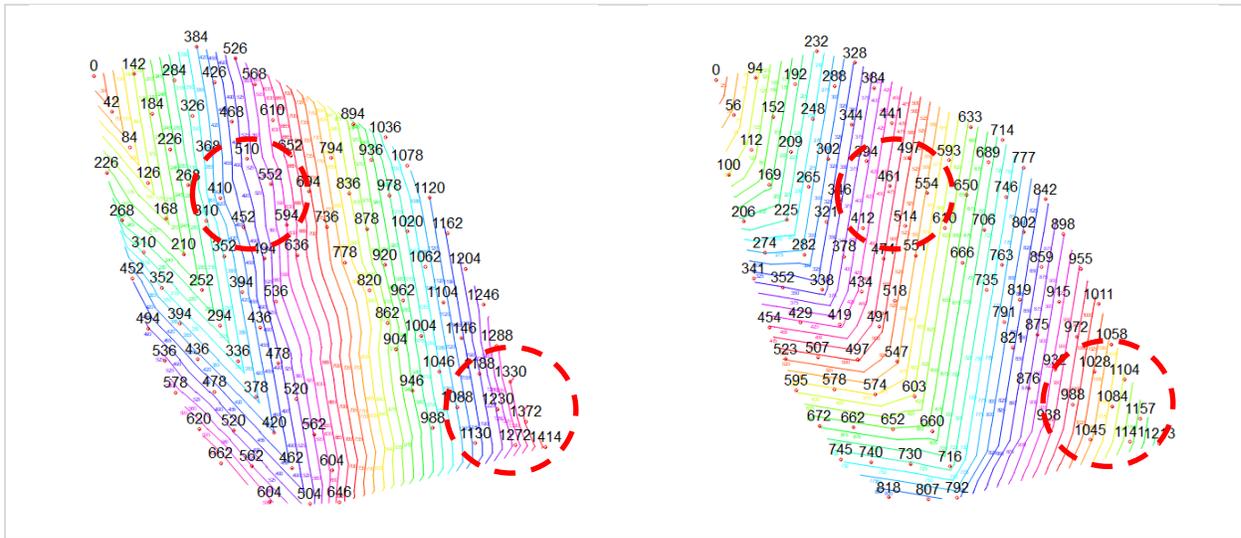
Sementara hasil di Pit Kanguru menunjukkan tingkat kelolosan 300 mm (P30) untuk material hasil peledakan detonator elektronik sebesar 87,55%, lebih besar dibandingkan peledakan detonator nonel sebesar 82.66% (Gambar 6).



Gambar 6. Perbandingan fragmentasi di Pit Kanguru.

Hasil peledakan detonator elektronik yang lebih baik dalam hal waktu penggalian dan fragmentasi sangat dipengaruhi oleh fleksibilitas waktu tunda dari detonator elektronik itu sendiri. Di operasional pertambangan yang sangat dinamis, sering kali peledakan dihadapkan pada ketidakteraturan bentuk lokasi peledakan, geometri peledakan, dan elevasi. Dalam beberapa kondisi ketidakteraturan ini, peranan fleksibilitas dari detonator elektronik menjadi sangat penting yang tidak dimiliki detonator nonel.

Sebagai contoh, di peledakan P1111 di Pit Pelikan, dengan kondisi aktual bentuk lokasi peledakan yang tidak teratur, jika menggunakan detonator nonel sebagai sistem inisiasi peledakan, kontur waktu tunda di beberapa titik juga akan menjadi tidak teratur. Kontur waktu tunda adalah keteraturan interaksi antar lubang ledak yang disesuaikan dengan waktu tunda yang telah ditentukan terhadap tipe batuan tertentu. Penggunaan detonator elektronik akan membuat pengaturan kontur waktu tunda menjadi seragam dan teratur (gambar 7). Perbedaan signifikan dari kedua sistem inisiasi ini yang pada akhirnya akan memberikan hasil akhir peledakan yang berbeda.



Gambar 7. Perbedaan keteraturan kontur waktu tunda antara detonator nonel (kiri) dengan detonator elektronik (kanan)

- **Keunggulan Aplikasi *Remote Firing***

Selain keunggulan dari sisi hasil peledakan yang sudah terbukti, keunggulan lain dari detonator elektronik adalah dapat diinisiasi dengan menggunakan metode *remote firing*. Metode ini menggunakan frekuensi tertentu untuk berkomunikasi antara alat yang berada di dekat lokasi peledakan (*bench box*) dengan alat yang dikontrol oleh juru ledak (*base station*).

Dari aspek keselamatan, keunggulan metode *remote firing* adalah tidak adanya potensi ledakan prematur *snap, slap, shot* yang memungkinkan terjadi di sistem inisiasi nonel, gangguan pada sistem dapat diketahui lebih awal karena adanya pengetesan terhadap sistem, dan juga dapat diinisiasi lebih jauh dibanding metode konvensional nonel sehingga potensi juru ledak terkena bahaya *fly rock* menjadi sangat kecil. Selain itu, dari aspek operasional dan lingkungan, keunggulan metode ini antara lain mengurangi waktu pengecekan setelah peledakan dan juga mengurangi sampah hasil peledakan. Keunggulan-keunggulan ini adalah hal yang selama ini tidak didapatkan jika menggunakan sistem inisiasi nonel.

Dari 89 peledakan detonator elektronik selama proyek dilakukan, seluruh peledakan ini diinisiasi dengan metode *remote firing*. Total penggunaan *Lead in Line* (LiL) jika seluruh peledakan ini diinisiasi dengan nonel adalah sekitar 57,1 km dengan menggunakan rata-rata pemakaian LiL di PAMA yaitu sebesar 642 meter per lokasi peledakan. Total penggunaan *harness wire* dari 89 peledakan ini adalah sebesar 8,4 km atau sebesar 95 meter per lokasi peledakan. Jika pemakaian *harness wire* ini dikonversikan ke pemakaian LiL, maka KPC dan PAMA telah mengurangi pemakaian LiL sebanyak 49,8 km dalam 89 peledakan ini atau sebanyak 560 meter LiL per peledakan. Hal ini belum termasuk keuntungan lain yaitu berkurangnya sampah peledakan LiL dan lebih cepatnya durasi pengecekan setelah peledakan karena dikurangi waktu yang dibutuhkan untuk mengumpulkan sisa LiL ini.

D. KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan hasil peledakan antara detonator elektronik dengan detonator nonel di area PAMA KPC Sangatta, dapat disimpulkan bahwa detonator elektronik memberikan hasil yang lebih

baik dalam hal fragmentasi dan waktu penggalian material peledakan. Selain itu, metode *remote firing* yang diaplikasikan selama proyek berlangsung pun dengan secara signifikan mengurangi jumlah pemakaian LiL.

Secara keseluruhan, hasil yang didapat selama proyek dilakukan antara lain:

1. Perbaikan pada waktu penggalian alat gali dimana waktu penggalian material hasil peledakan detonator elektronik lebih cepat sebesar 7,9% di Pit Pelikan dan 7,2% di Pit Kanguru jika dibandingkan dengan material hasil peledakan detonator nonel.
2. Perbaikan dalam hal waktu penggalian selaras dengan peningkatan produktivitas rata-rata alat gali sebesar 2,5%.
3. Fragmentasi hasil peledakan detonator elektronik juga menunjukkan perbaikan dimana persentase kelolosan 300 mm (standar yang digunakan PT KPC) lebih tinggi sebesar 5,6% di Pit Pelikan dan 4,9% di Pit Kanguru dibandingkan dengan peledakan detonator nonel.
4. Total penghematan pemakaian LiL yang didapat dengan menggunakan metode *remote firing* pada 89 peledakan selama proyek adalah sebesar 49,8 km atau sebesar 560 meter LiL per lokasi peledakan.

Atas pencapaian ini, terbukti bahwa detonator elektronik memberikan perbaikan terhadap hasil peledakan yang merupakan dampak positif kemajuan teknologi terhadap dunia pertambangan khususnya di bidang peledakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Botes, J.D. (2001): *The Introduction of Electronic Detonators at Optimum Colliery*, SA Colliery Manager Association, 1-3.
- Grobler, H.P. (2002): *Using Electronic Detonators to Improve All-round Blasting Performances*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2-3.