

RANCANGAN SISTEM WAKTU TUNDA PELEDAKAN NONEL UNTUK MENGURANGI EFEK GETARAN TANAH TERHADAP FASILITAS TAMBANG

DELAY SYSTEM DESIGN FOR NONEL BLASTING TO REDUCE GROUND VIBRATION EFFECT DUE TO MINE FACILITY

M. Romi Noviansyah¹, Taufik Toha², Bochori³

Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Jl. Raya Palembang Prabumulih KM.32, Indralaya, Sumatera Selatan, 30662, Indonesia

Telp/fax: (0711)850137; E-mail: rominoviansyah@gmail.com

ABSTRAK

Sistem waktu tunda peledakan nonel yang sering digunakan PT. Semen Padang adalah echelon dan v-cut. Beda waktu tunda antar lubang ledak pada sistem waktu tunda echelon yang digunakan telah mencapai 8 ms, tetapi sering digunakan pada kondisi peledakan yang hanya memiliki free face di bagian depan dan atas. Sistem waktu tunda v-cut yang digunakan terkadang tidak memiliki beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak sehingga menyebabkan beberapa lubang meledak bersamaan. Burden pada row depan tidak dapat berpindah dengan jarak yang cukup untuk menyediakan free face baru pada row selanjutnya jika sistem waktu tunda yang digunakan kurang sesuai dengan kondisi free face. Kombinasi waktu tunda antar row yang tidak dirancang dengan baik akan mengakibatkan confinement pada ledakan dan meningkatkan getaran tanah. Lubang ledak yang meledak bersamaan dapat meningkatkan getaran tanah karena penggunaan bahan peledak yang semakin banyak akan meningkatkan energi yang dihasilkan. Aktivitas peledakan mengakibatkan getaran tanah yang dapat menyebabkan kerugian di lingkungan sekitar area tambang, baik yang berpengaruh pada fasilitas dan peralatan tambang maupun bangunan jika tidak dikontrol dengan baik. Salah satu cara yang paling efektif untuk mengurangi tingkat getaran tanah yang dihasilkan aktivitas peledakan nonel adalah merancang sistem waktu tunda yang sesuai dengan kondisi free face dan memiliki beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak. Perancangan sistem waktu tunda peledakan nonel yang lebih disesuaikan dengan kondisi free face dengan beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak dapat mengurangi PPV rata-rata yang dihasilkan. PPV rata-rata yang sebelumnya sebesar 1,41 mm/s berkurang menjadi 1,01 mm/s.

Kata Kunci: Peledakan Nonel, Sistem Waktu Tunda, Getaran Tanah

1. PENDAHULUAN

Tujuan dari aktivitas peledakan adalah untuk memberai batuan dari suatu kesatuan material geologi yang bersifat *solid* menjadi beberapa bagian yang lebih kecil (fragmentasi) sehingga dapat membantu aktivitas penggalian menggunakan peralatan mekanis [1]. Pada aktivitas penambangan batu kapur di *Quarry Karang Putih*, PT. Semen Padang melakukan aktivitas peledakan untuk memberai batu kapur agar dapat digali dengan peralatan mekanis. Aktivitas peledakan dapat menghasilkan suatu gangguan yang dapat mempengaruhi lingkungan, salah satunya adalah getaran tanah [2]. Aktivitas peledakan mengakibatkan getaran tanah yang dapat menyebabkan kerugian di lingkungan sekitar area tambang, baik yang berpengaruh pada fasilitas dan peralatan tambang maupun bangunan jika tidak dikontrol dengan baik.

Pola pengeboran merupakan salah satu tahapan yang penting di dalam pelaksanaan operasi peledakan. Pola pengeboran yang umum digunakan dalam mendesain lubang ledak pada operasi peledakan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *square*, *rectangular*, dan *staggered* [3]. PT. Semen Padang menggunakan pola pengeboran *staggered* atau *zig-zag* dan sistem

peledakan yang digunakan untuk meledakkan batu kapur yaitu *non-electric detonator* (nonel) yang dikombinasikan dengan sistem inisiasi menggunakan *electric detonator* yang dihubungkan ke *blasting machine*. Produk nonel yang digunakan adalah *dayadet surface delay* dan *in-hole delay* yang diproduksi oleh PT. Dahana.

Sistem waktu tunda peledakan nonel yang sering digunakan PT. Semen Padang adalah *echelon* dan *v-cut*. Beda waktu tunda antar lubang ledak pada sistem waktu tunda *echelon* yang digunakan telah mencapai 8 ms, tetapi sering digunakan pada kondisi peledakan yang hanya memiliki *free face* di bagian depan dan atas. Sistem waktu tunda *v-cut* yang digunakan terkadang tidak memiliki beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak sehingga menyebabkan beberapa lubang meledak bersamaan.

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah untuk mengetahui hubungan kondisi aktual sistem waktu tunda peledakan nonel yang diterapkan di *Quarry Karang Putih* PT. Semen Padang terhadap getaran tanah yang dihasilkan, kemudian merancang sistem waktu tunda pada peledakan nonel untuk mengurangi tingkat getaran tanah yang dihasilkan guna menjaga fasilitas penunjang di sekitar area tambang.

Jenis energi yang dilepaskan ketika terjadi ledakan terdiri dari *work energy* dan *waste energy*. *Work energy* adalah energi peledakan yang menyebabkan terpecahnya batuan. Energi yang dihasilkan bahan peledak pada kegiatan peledakan hanya sebagian yang dikonsumsi untuk memecahkan batuan, sementara sisanya menjadi *waste energy* atau energi sisa [4][5].

Sistem waktu tunda merupakan urutan waktu peledakan antara lubang-lubang bor dalam satu baris dengan lubang bor pada baris berikutnya ataupun antara lubang bor yang satu dengan lubang bor yang lainnya. Sistem waktu tunda ini dapat ditentukan berdasarkan urutan waktu peledakan serta arah runtuhnya material yang diharapkan [6].

Sistem waktu tunda pada suatu aktivitas peledakan menunjukkan sekuen atau urutan ledakan dari sejumlah lubang ledak. Jeda waktu yaitu waktu tunda (*delay*) diantara lubang ledak pada aktivitas peledakan dapat terjadi jika terdapat urutan peledakan. Parameter ini akan berpengaruh pada hasil peledakan, tidak hanya fragmentasi hasil peledakan, tetapi juga dapat mempengaruhi *displacement* batuan, *overbreak* dan intensitas getaran yang dihasilkan peledakan. Penerapan waktu tunda pada sistem peledakan dapat menghasilkan beberapa keuntungan antara lain dapat mengurangi getaran, mengurangi *overbreak* dan *flyrock*, serta dapat mengatur arah lemparan [7]. Sistem waktu tunda peledakan dengan jenis *echelon* akan lebih optimal jika digunakan pada medan peledakan yang memiliki *free face* di bagian depan, atas, dan samping [8].

Getaran tanah (*ground vibration*) merupakan gelombang yang bergerak di dalam tanah akibat dari adanya sumber energi, sumber energi tersebut dapat berasal dari alam, seperti gempa bumi atau adanya aktivitas peledakan [2].

Faktor yang mempengaruhi pengembangan, penyebaran, dan intensitas getaran tanah dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu faktor yang dapat dikontrol dan yang tidak dapat dikontrol. Faktor-faktor yang dapat dikontrol antara lain geometri peledakan, jenis dan jumlah bahan peledak yang digunakan, sistem inisiasi yang digunakan, sedangkan faktor-faktor yang tidak dapat dikontrol antara lain jarak dan *initiation timing error* [2].

Burden merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi getaran tanah. Peledakan dengan *burden* yang baik akan menghasilkan getaran yang lebih kecil daripada peledakan dengan *burden* yang lebih besar. Kelebihan ukuran *burden* akan meningkatkan getaran tanah karena energi peledakan yang tidak cukup untuk menghancurkan batuan akan terkonversi menjadi getaran. Panjang *subdrilling* harus dipilih dengan benar untuk meminimalisasi getaran tanah karena *subdrilling* tersebut menyebabkan zona tambahan untuk energi peledakan yang dapat berakibat pada getaran tanah, selain itu ukuran *stemming* yang lebih kecil yaitu kurang dari 20 kali ukuran diameter lubang ledak dapat menyebabkan getaran tanah bertambah [2].

Jumlah isian bahan peledak per lubang ledak merupakan faktor yang sangat penting terhadap getaran tanah, penggunaan bahan peledak yang semakin banyak akan meningkatkan energi yang dihasilkan. *Charge weight per delay* (waktu tunda) adalah faktor terpenting untuk mengontrol intensitas dari getaran tanah pada aktivitas peledakan, semakin besar kuantitas bahan peledak yang meledak pada suatu waktu tunda, semakin tinggi getaran tanah yang dihasilkan. Kecepatan partikel dari getaran akan berkurang dikarenakan proses absorpsi, dispersi, dan disipasi dari *elastic wave* jika jarak antara lokasi peledakan dan pengukuran getaran bertambah, oleh karena itu apabila jarak pengukuran lokasi peledakan semakin jauh maka getaran tanah yang dihasilkan akan semakin kecil [2].

Getaran tanah yang dihasilkan dari kegiatan peledakan dapat diprediksi dengan menghubungkan hasil pengukuran getaran tanah dengan parameter-parameter peledakan yang mempengaruhinya, salah satu caranya adalah dengan menggunakan analisis regresi [9]. Parameter-parameter peledakan tersebut adalah yaitu jumlah bahan peledak yang meledak bersamaan pada suatu waktu tunda tertentu dan jarak dari lokasi peledakan [5]. Hubungan tersebut ditunjukkan oleh konsep *Peak Particle Velocity* (PPV) vs. *Scaled Distance* yang dikembangkan ke dalam hukum perambatan (*propagation law*) yang dinyatakan oleh US Bureau of Mines, dimana *scaled distance* merupakan nilai yang diperoleh dari jarak dibagi dengan akar dari jumlah bahan peledak dalam suatu waktu tunda [2][5]. *Peak particle velocity* dapat ditentukan dengan (Persamaan 1) [2][10].

$$V = K \left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^B = K[SD]^B \quad (1)$$

Keterangan:

V = *Peak particle velocity* (mm/s)

W = Jumlah bahan peledak per waktu tunda (kg)

D = Jarak dari lokasi peledakan ke lokasi pengamatan (m)

K = *Site and rock factor constant*, koefisien faktor K yang biasa digunakan untuk *free face* dengan struktur batuan yang keras atau sangat keras = 500, *free face* dengan struktur batuan rata-rata = 1140, dan sangat padat = 5000

B = Konstanta yang berhubungan dengan batuan dan *site* (biasanya -1,6)

SD = *Scaled Distance* = $\frac{D}{\sqrt{W}}$ (m/kg^{1/2})

Pemilihan interval waktu tunda (*delay*) yang tepat sangat penting pada peledakan dengan banyak baris (*multirow*). Tingkat getaran tanah dapat dikurangi dengan penggunaan *delay detonator*. Waktu tunda tersebut menyebabkan terpisahnya gelombang yang memancar dari energi bahan peledak untuk menghindari terakumulasinya gelombang yang besar. Interval dari waktu tunda dapat diterapkan diantara lubang dalam satu *row*. *Burden relief* yang baik sangat diperlukan pada peledakan dengan banyak baris (*multirow*) untuk mendapatkan pergerakan horizontal *burden* yang efektif. *Burden* pada *row* depan tidak dapat berpindah dengan jarak yang cukup untuk menyediakan *free face* baru yang berguna pada *row* selanjutnya jika perbedaan waktu tunda (*delay*) antar *row* lebih kecil dari yang seharusnya. Hal tersebut akan meningkatkan *confinement* pada ledakan di *row* selanjutnya sehingga menyebabkan getaran tanah meningkat. Beda waktu tunda minimum 8 atau 9 ms antar lubang ledak direkomendasikan dan dapat digunakan untuk tujuan meminimalisasi getaran yang dihasilkan [2].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Kegiatan penelitian dilakukan pada tanggal 18 April 2016 dan berakhir pada tanggal 10 Juni 2016. Lokasi penelitian terletak di tambang *Quarry Karang Putih PT. Semen Padang* yang berada di wilayah Kelurahan Indarung. Kecamatan Lubuk Kilangan, Provinsi Sumatera Barat, Indonesia. Tahapan penelitian yang dilakukan yaitu studi literatur, pengambilan data, pengolahan data dan analisis data.

Pengambilan data yang dilakukan berupa data primer dan data sekunder. Data primer yang diambil yaitu kondisi aktual lubang ledak, koordinat lokasi peledakan dan lokasi pengukuran getaran, geometri peledakan (diameter lubang, kedalaman lubang, dan panjang kolom isian *stemming*), jumlah isian bahan peledak, sistem waktu tunda, dan getaran tanah hasil peledakan. Data sekunder yang dikumpulkan yaitu peta lokasi penelitian, standar tingkat getaran tanah terhadap bangunan, dan spesifikasi bahan peledak, peralatan, serta perlengkapan peledakan.

Data koordinat lokasi peledakan dan lokasi pengukuran getaran didapatkan dengan menggunakan GPS Garmin Montana 650 yang kemudian digunakan untuk menghitung jarak antara kedua titik yang telah diketahui koordinatnya dengan menggunakan rumus *Euclidean Distance* [11]. Data jumlah isian bahan peledak didapatkan dari pengamatan langsung di lapangan dengan mengamati jumlah bahan peledak yang dimasukkan ke dalam lubang ledak oleh *mobile manufacturing unit*. Akumulasi waktu tunda yang dipakai pada sistem waktu tunda yang diamati langsung di lapangan didapatkan dengan menggunakan *software Shotplus-i 4.88* agar diketahui lubang yang meledak bersamaan pada suatu waktu tunda tertentu. Data jarak dan jumlah bahan peledak per waktu tunda kemudian digunakan untuk mencari nilai *scaled distance* pada persamaan *peak particle velocity* [2][10]. Data getaran tanah hasil peledakan didapatkan dengan menggunakan alat pengukur getaran *Micromate ISEE InstanTel* yang dilengkapi dengan *geophone*.

Metode penyelesaian masalah yang dilakukan antara lain menganalisis kondisi aktual sistem waktu tunda peledakan nonel yang digunakan sebelumnya, pengaruh jarak dan isian bahan peledak per waktu tunda terhadap getaran tanah

yang dihasilkan, pengaruh kondisi lubang ledak dan *free face* terhadap sistem waktu tunda yang digunakan, jenis sistem waktu tunda dan kombinasi *surface delay* yang dapat digunakan untuk meminimalisir getaran tanah yang dihasilkan aktivitas peledakan, sehingga dapat diketahui apakah sistem waktu tunda peledakan nonel yang akan digunakan sudah sesuai seperti yang diharapkan atau belum.

Software Shotplus-i 4.88 digunakan untuk merancang sistem waktu tunda peledakan nonel usulan yang sesuai dengan kondisi lubang ledak dan *free face*, serta memiliki beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak. Beberapa sistem waktu tunda peledakan nonel yang diterapkan kemudian dibandingkan dengan sistem waktu tunda yang digunakan sebelumnya, perbandingan antara getaran tanah yang dihasilkan dari masing-masing sistem waktu tunda tersebut digunakan untuk mengetahui rancangan sistem waktu tunda yang tepat untuk mengurangi getaran tanah.

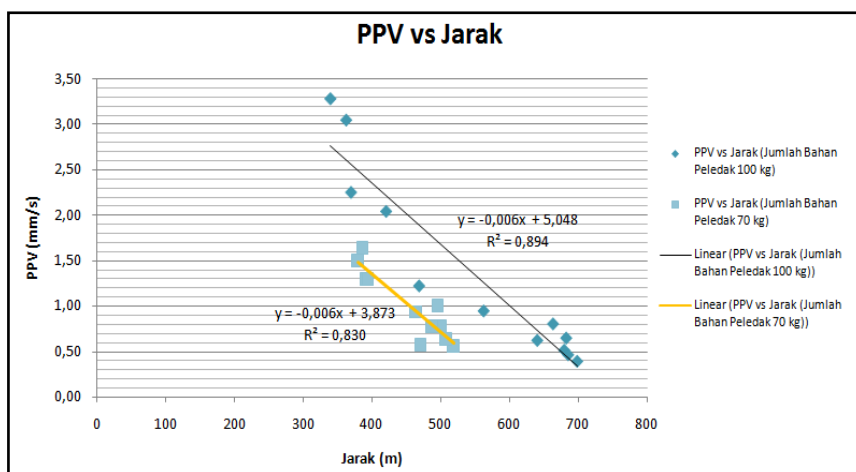
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran getaran tanah yang dihasilkan aktivitas peledakan batu kapur dilakukan di beberapa lokasi bangunan pada area Departemen Tambang PT. Semen Padang, sedangkan lokasi peledakan pada saat dilakukan pengukuran getaran tanah terletak di beberapa area *Quarry Karang Putih*. yaitu *Front I, Front II, Front V, dan Front VII*. Aktivitas peledakan di PT. Semen Padang memiliki kondisi lubang ledak dengan diameter 5 inch dan dengan kedalaman yang cukup bervariasi yaitu berkisar antara 8-12 m. Ukuran *burden* dan *spacing* yang digunakan yaitu 5 x 5,5 m, sedangkan panjang kolom isian *stemming* berkisar antara 3,4-5,6 m. Densitas bahan peledak (DABEX) yang digunakan yaitu 1,18 gr/cc dengan jumlah isian bahan peledak per lubang yang berkisar antara 50-100 kg.

Hasil pengukuran getaran tanah meliputi pengukuran *peak particle velocity* (PPV) pada tiga gelombang, yaitu gelombang transversal, longitudinal, dan vertikal yang dibaca oleh alat *Micromate*. Tiga gelombang yang terbaca pada *Micromate* akan disatukan menjadi *peak vector sum* (PVS) yang merupakan penjumlahan vektor dari ketiga gelombang tersebut. Nilai *peak vector sum* ini merupakan *peak particle velocity* aktual yang digunakan untuk perbandingan tingkat getaran tanah yang dihasilkan pada masing-masing peledakan karena nilai *peak vector sum* tersebut mewakili *peak particle velocity* maksimum dari setiap gelombang. Grafik antara jarak dan getaran tanah (*peak particle velocity*) yang diukur memperlihatkan hubungan antar kedua variabel tersebut (Gambar 1).

Kecepatan partikel dari getaran akan berkurang jika jarak antara lokasi peledakan dan pengukuran getaran bertambah, oleh karena itu apabila jarak pengukuran lokasi peledakan semakin jauh maka getaran tanah yang dihasilkan akan semakin kecil [2].

Hubungan antara jarak dan getaran tanah (*peak particle velocity*) yang dihasilkan dengan jumlah bahan peledak 100 kg dan 70 kg (Gambar 1) dapat memperlihatkan bahwa semakin jauh jarak antara lokasi peledakan dan lokasi pengukuran, maka getaran tanah yang dihasilkan akan semakin kecil. Getaran tanah (*peak particle velocity*) yang dihasilkan dengan jumlah bahan peledak 70 kg juga lebih kecil daripada jumlah bahan peledak 100 kg pada beberapa jarak yang relatif sama. Hubungan ini menguatkan teori tentang hubungan antara jarak serta jumlah bahan peledak dengan getaran tanah yang dihasilkan aktivitas peledakan.

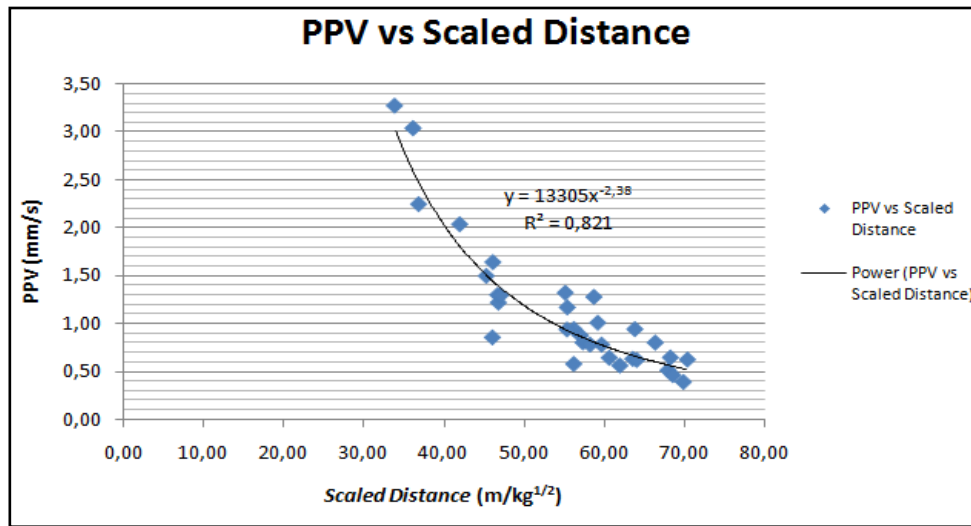


Gambar 1. Hubungan jarak dan *peak particle velocity*

Scaled distance (SD) merupakan faktor yang mempengaruhi getaran tanah yang diperoleh dari jarak pengukuran dibagi akar dari muatan bahan peledak per waktu tunda, *scaled distance* akan mempengaruhi *peak particle velocity*. Grafik antara *scaled distance* dan getaran tanah (*peak particle velocity*) yang diukur memperlihatkan hubungan antar kedua variabel tersebut (Gambar 2).

Hasil analisis hubungan antara *scaled distance* dan getaran tanah (*peak particle velocity*) yang didapat dari hasil pengukuran (Gambar 2) menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara kedua variabel tersebut, yaitu setiap penurunan nilai *scaled distance* diikuti dengan peningkatan nilai PPV dan sebaliknya setiap peningkatan nilai *scaled distance* diikuti dengan penurunan nilai PPV. Koefisien determinasi (R^2) dari analisis data tersebut menunjukkan nilai 0.821, hal tersebut menunjukkan bahwa *peak particle velocity* dipengaruhi oleh *scaled distance* sebesar 82.1%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain seperti karakteristik dan sifat massa batuan, serta faktor geologi lainnya. Konstanta yang didapatkan pada persamaan untuk mencari nilai PPV prediksi yaitu $K = 13305$ dan $B = -2,38$.

Perbandingan getaran tanah berdasarkan jenis sistem waktu tunda yang digunakan dan keadaan *free face* yang ada memperlihatkan perbedaan getaran tanah yang dihasilkan masing-masing peledakan tersebut (Tabel 1-Tabel 7).



Gambar 2. Hubungan *scaled distance* dan *peak particle velocity*

Tabel 1. Getaran tanah berdasarkan keadaan *free face*

Kondisi	Lokasi	<i>Scaled Distance</i> (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	<i>Surface Delay</i>	Keadaan <i>Free Face</i>	PPV (mm/s)
Aktual	Front V	56,20	<i>Echelon</i>	<i>Control row</i> (25 ms), <i>echelon row</i> (42 ms)	2 <i>Face</i>	0,94
Modifikasi	Front II	56,18	<i>Echelon</i>	<i>Control row</i> (25 ms), <i>echelon row</i> (42 ms)	3 <i>Face</i>	0,58

Tabel 2. Getaran tanah berdasarkan kombinasi *surface delay echelon*

Kondisi	Lokasi	<i>Scaled Distance</i> (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	<i>Surface Delay</i>	Keadaan <i>Free Face</i>	PPV (mm/s)
Aktual	Front I	36,20	<i>Echelon</i>	<i>Control row</i> (25 ms), <i>echelon row</i> (17 ms), waktu tunda pada <i>row</i> depan lebih besar	2 <i>Face</i>	3,05

Modifikasi	Front I	36,90	Echelon	Control row (42 ms), echelon row (67 ms), waktu tunda pada row depan lebih kecil	2 Face	2,25
------------	---------	-------	---------	---	--------	------

Tabel 3. Getaran tanah berdasarkan kombinasi *surface delay echelon*

Kondisi	Lokasi	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	Surface Delay	Keadaan Free Face	PPV (mm/s)
Aktual	Front II	46,73	Echelon	Control row (42 ms), echelon row (17 ms), waktu tunda pada row depan lebih besar	2 Face	1,30
Modifikasi	Front II	46,07	Echelon	Control row (25 ms), echelon row (67 ms), waktu tunda pada row depan lebih kecil	2 Face	0,86

Tabel 4. Getaran tanah berdasarkan sistem waktu tunda *echelon* dan *v-cut*

Kondisi	Lokasi	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	Surface Delay	Keadaan Free Face	PPV (mm/s)
Aktual	Front VII	59,16	Echelon	Control row (25 ms), echelon row (42 ms)	2 Face	1,01
Modifikasi	Front II	59,64	V-cut	Control row (67 ms), control row arah kiri dipisahkan dengan satu <i>surface delay</i> 25 ms, row belakang bagian kiri (25 ms), row belakang bagian kanan (42 ms)	2 Face	0,78

Tabel 5. Getaran tanah berdasarkan sistem waktu tunda *echelon* dan *v-cut*

Kondisi	Lokasi	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	Surface Delay	Keadaan Free Face	PPV (mm/s)
Aktual	Front II	55,13	Echelon	Control row (25 ms), echelon row (67 ms)	2 Face	1,32
Modifikasi	Front II	55,38	V-cut	Control row arah kanan (25 ms), control row arah kiri (42 ms), row belakang (67 ms)	2 Face	1,17

Tabel 6. Getaran tanah berdasarkan sistem waktu tunda *echelon* dan *row by row*

Kondisi	Lokasi	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	Surface Delay	Keadaan Free Face	PPV (mm/s)
Modifikasi	Front II	63,78	Echelon	Control row (25 ms), echelon row (67 ms)	2 Face	0,94
Modifikasi	Front II	63,52	Row by	Initiating point (IP) di	2 Face	0,63

			Row	bagian tengah, waktu tunda utama (42 ms), waktu tunda samping (17 ms)		
--	--	--	-----	---	--	--

Tabel 7. Getaran tanah berdasarkan sistem waktu tunda *echelon* dan *row by row*

Kondisi	Lokasi	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Sistem Waktu Tunda	Surface Delay	Keadaan Free Face	PPV (mm/s)
Aktual	Front II	58,69	Row by Row	Initiating point (IP) di bagian samping, waktu tunda utama (25 ms), waktu tunda samping (42 ms)	2 Face, tetapi arah peledakan relatif ke samping	1,28
Modifikasi	Front I	58,21	Echelon	Control row (25 ms), echelon row (67 ms)	2 Face	0.78

Perbandingan antara sistem waktu tunda aktual dan modifikasi (Tabel 1) memperlihatkan bahwa sistem waktu tunda *echelon* dengan kondisi *free face* di bagian depan, atas, dan samping menghasilkan getaran yang lebih kecil. *Free face* di bagian samping mengurangi *confinement* pada ledakan lubang di *row* kedua sehingga distribusi energi peledakan tidak mengalami banyak hambatan untuk memecahkan batuan dan energi yang terkonversi menjadi gelombang seismik atau getaran tanah berkurang.

Perbandingan antara sistem waktu tunda aktual dan modifikasi (Tabel 2 dan 3) memperlihatkan bahwa dalam kondisi *free face* hanya di bagian depan, peledakan dengan sistem waktu tunda *echelon* dengan waktu tunda pada *row* depan lebih kecil menghasilkan getaran tanah yang lebih kecil daripada peledakan dengan sistem waktu tunda *echelon* dengan waktu tunda pada *row* depan lebih besar, karena peledakan dengan waktu tunda pada *row* depan lebih kecil akan membuat keadaan *free face* baru untuk *row* selanjutnya tersedia dengan baik dan menyebabkan getaran tanah yang dihasilkan berkurang.

Sistem waktu tunda *v-cut* memperlihatkan lubang ledak pada *row* pertama dominan meledak terlebih dahulu daripada lubang ledak pada *row* kedua, hal ini membuat pergerakan *burden* pada *row* pertama cukup efektif untuk menyediakan *free face* baru pada *row* kedua dan *row* selanjutnya. Perbandingan antara sistem waktu tunda aktual dan modifikasi (Tabel 4 dan 5) memperlihatkan bahwa dalam kondisi *free face* hanya di bagian depan dan atas, peledakan dengan sistem waktu tunda *v-cut* menghasilkan getaran tanah yang lebih kecil daripada peledakan dengan sistem waktu tunda *echelon*. Perbandingan tersebut memperlihatkan bahwa sistem waktu tunda *V-cut* akan lebih efektif digunakan pada peledakan dengan kondisi *free face* hanya di bagian depan dan atas untuk meminimalisasi getaran tanah yang dihasilkan dibandingkan dengan sistem waktu tunda *echelon*.

Perbandingan antara sistem waktu tunda pada *echelon* dan *row by row* modifikasi (Tabel 6) memperlihatkan bahwa dalam kondisi *free face* hanya di bagian depan dan atas, peledakan dengan sistem waktu tunda *row by row* dengan titik inisiasi di bagian tengah menghasilkan getaran tanah yang lebih kecil daripada peledakan dengan sistem waktu tunda *echelon*, hal tersebut disebabkan karena lubang ledak dominan meledak berurutan per baris sehingga *free face* baru yang berguna untuk *row* selanjutnya tersedia cukup baik. Perbandingan antara sistem waktu tunda aktual dan modifikasi (Tabel 7) memperlihatkan bahwa dalam kondisi *free face* hanya di bagian depan dan atas, peledakan dengan sistem waktu tunda *row by row* tetapi dengan titik inisiasi di bagian samping menghasilkan getaran tanah yang lebih besar daripada peledakan dengan sistem waktu tunda *echelon*. Sistem waktu tunda *row by row* dengan titik inisiasi di bagian samping dalam keadaan tidak ada *free face* samping mengakibatkan arah peledakan relatif ke samping. Ledakan di sekitar titik inisiasi akan menimbulkan *confinement* dan *free face* baru untuk *row* selanjutnya tidak tersedia dengan baik sehingga menyebabkan getaran tanah yang dihasilkan meningkat.

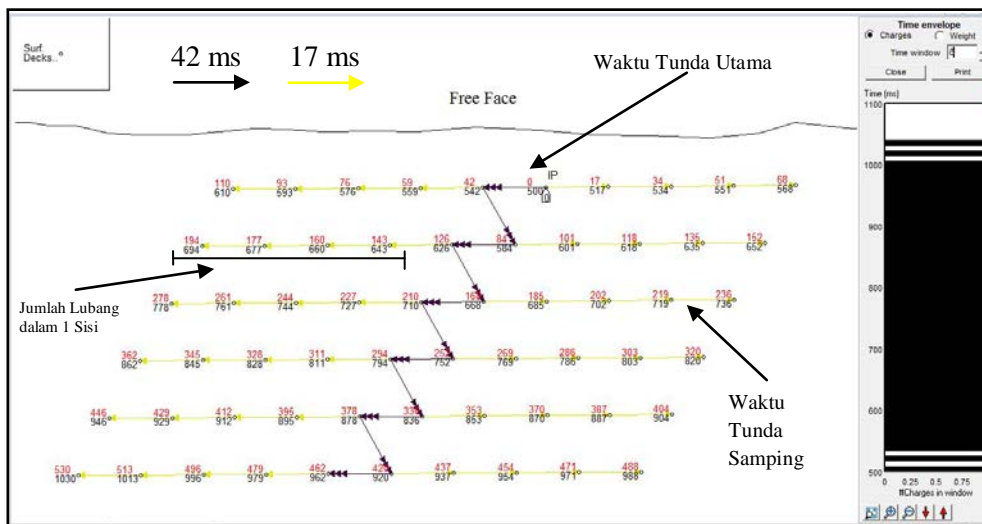
Sistem waktu *row by row* (Gambar 3) dengan titik inisiasi di tengah yang memiliki beda waktu tunda minimum 8 ms antar lubang ledak dapat dirancang dengan menggunakan beberapa kombinasi *surface delay* (Tabel 8).

Sistem waktu tunda *row by row* dapat digunakan pada kondisi *free face* peledakan hanya di bagian depan dan atas. Jumlah lubang pada setiap *row* sistem waktu tunda peledakan *row by row* sangat mempengaruhi beda waktu tunda antar

lubang ledak yang didapatkan (Tabel 8). Waktu tunda utama pada sistem waktu tunda *row by row* menghubungkan lubang antar *row*, sedangkan waktu tunda samping menghubungkan lubang dalam satu *row* (Gambar 3).

Sistem waktu tunda *echelon* (Gambar 4 dan 5) dengan beda waktu tunda minimum antar lubang ledak sebesar 8 ms dapat dirancang dengan menggunakan beberapa kombinasi *surface delay* yang tepat dan memperhatikan jumlah *row* dan lubang dalam satu *row* (Tabel 9).

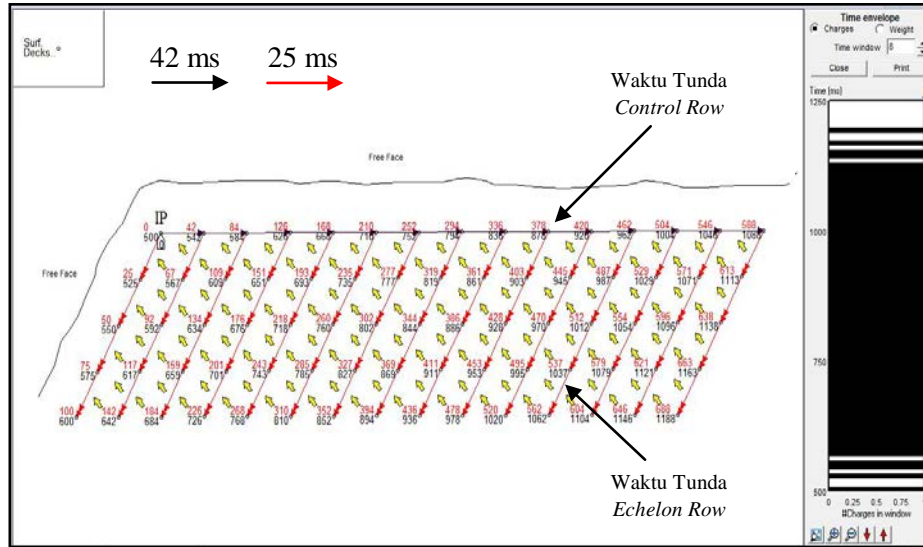
Sistem waktu tunda *echelon* lebih optimal digunakan pada kondisi jika terdapat *free face* di bagian samping karena arah peledakan pada sistem waktu tunda ini menuju sudut (*corner*) dimana titik inisiasi berada (Gambar 4), jika hanya terdapat *free face* bagian depan dan atas, maka lubang ledak yang berada di samping dekat dengan titik inisiasi tidak memiliki cukup *free face* untuk mendistribusikan energi dari ledakan dan mengakibatkan *confinement* dan meningkatkan getaran tanah yang dihasilkan. Salah satu cara untuk meminimalisasi terjadinya *confinement* pada sistem waktu tunda *echelon* dalam kondisi yang tidak terdapat *free face* di bagian samping adalah memakai waktu tunda (*delay*) pada *row* pertama yang lebih kecil daripada waktu tunda (*delay*) pada *row* belakang (Gambar 5). Hal tersebut membuat lubang ledak di *row* pertama dominan meledak terlebih dahulu sehingga menyediakan *free face* yang lebih baik untuk *row* di belakangnya. Kombinasi *surface delay* yang digunakan pada sistem waktu tunda *echelon* harus dirancang dengan tepat agar memiliki beda waktu tunda minimum antar lubang ledak sebesar 8 ms (Tabel 9).



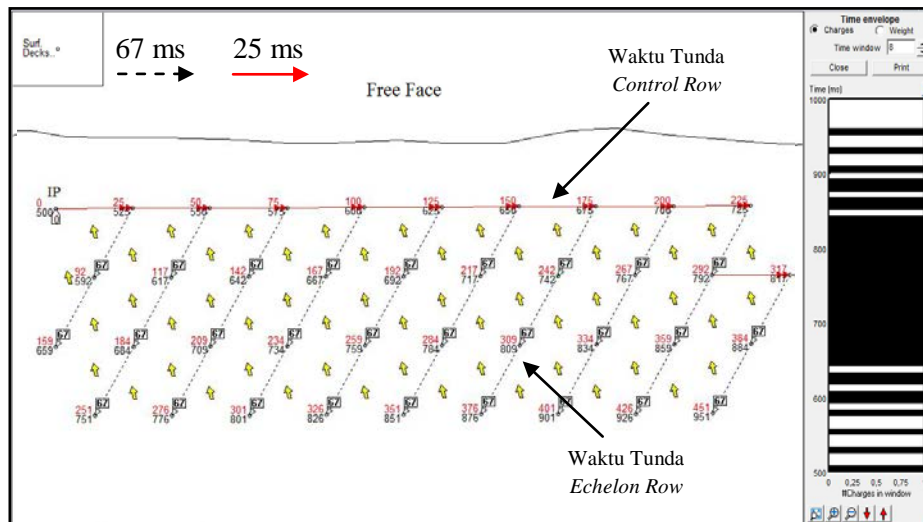
Gambar 3. Rancangan sistem waktu tunda *row by row* usulan

Tabel 8. Kombinasi *surface delay* usulan pada sistem waktu tunda *row by row* dengan beda waktu tunda minimum 8 ms

Waktu Tunda Utama	Waktu Tunda Samping	Maksimal Lubang per Sisi dalam 1 Row	Kondisi Row
25 ms	67 ms	7 Lubang	4 Row
42 ms	17 ms	4 Lubang	6 Row
42 ms	25 ms	4 Lubang	6 Row
42 ms	67 ms	5 Lubang	5 Row
67 ms	17 ms	3 Lubang	6 Row
67 ms	25 ms	7 Lubang	6 Row
67 ms	42 ms	7 Lubang	6 Row



Gambar 4. Rancangan sistem waktu tunda echelon usulan dengan tiga free face



Gambar 5. Rancangan sistem waktu tunda echelon usulan dengan dua free face

Tabel 9. Kombinasi surface delay usulan pada sistem waktu tunda echelon dengan beda waktu tunda minimum 8 ms

Waktu Tunda Control Row	Waktu Tunda Echelon Row	Maksimal Row (10 Lubang per Row)
17 ms	25 ms	2 Row
17 ms	42 ms	2 Row
17 ms	67 ms	2 Row
25 ms	17 ms	3 Row
25 ms	42 ms	3 Row
25 ms	67 ms	4 Row
42 ms	17 ms	5 Row
42 ms	25 ms	5 Row
42 ms	67 ms	5 Row
67 ms	17 ms	4 Row
67 ms	25 ms	5 Row
67 ms	42 ms	5 Row

Salah satu cara yang paling efektif untuk mengurangi getaran tanah yang dihasilkan aktivitas peledakan nonel tanpa mengubah geometri peledakan yaitu dengan cara merencanakan sistem waktu tunda peledakan yang sesuai dengan kondisi *free face* yang ada dan memiliki beda waktu tunda minimum antar lubang ledak sebesar 8 ms. Jumlah maksimal *row* pada suatu peledakan dan pemilihan *surface delay* harus direncanakan dengan baik untuk mendapatkan beda waktu tunda 8 ms antar lubang ledak. Pemeriksaan *delay time* antara lubang ledak perlu dilakukan terlebih dahulu dengan bantuan *software* ataupun perhitungan secara manual sebelum menerapkan suatu sistem waktu tunda peledakan nonel yang akan digunakan di lapangan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari pembahasan sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut.

1. Sistem waktu tunda peledakan nonel mempengaruhi jumlah bahan peledak yang meledak bersamaan pada waktu tunda tertentu. Semakin banyak bahan peledak yang meledak bersamaan maka getaran tanah akan semakin besar. Sistem waktu tunda *echelon* dengan *free face* samping menghasilkan PPV 0,58 mm/s, lebih kecil daripada sistem waktu tunda *echelon* tanpa *free face* samping yang menghasilkan PPV 0,94 mm/s. Sistem waktu tunda *echelon* dengan waktu tunda *row* depan lebih kecil menghasilkan PPV 2,25 mm/s, lebih kecil daripada sistem waktu tunda *echelon* dengan waktu tunda *row* depan lebih besar yang menghasilkan PPV 3,05 mm/s. Sistem waktu tunda *v-cut* dan *row by row* menghasilkan PPV lebih kecil daripada sistem waktu tunda *echelon* pada kondisi peledakan yang hanya memiliki dua *free face*.
2. Rancangan sistem waktu tunda peledakan nonel yang dapat digunakan untuk mengurangi getaran tanah yaitu menggunakan sistem waktu tunda *echelon* pada kondisi peledakan yang memiliki tiga *free face*, sedangkan pada kondisi *free face* hanya di bagian depan dan atas, sistem waktu tunda *echelon* dengan waktu tunda *row* depan lebih kecil dapat digunakan untuk mengurangi getaran tanah. Sistem waktu tunda *v-cut* dan *row by row* akan lebih efektif daripada sistem waktu tunda *echelon* untuk mengurangi getaran tanah pada kondisi peledakan yang hanya memiliki *free face* di bagian depan dan atas. Sistem waktu tunda yang lebih disesuaikan dengan kondisi *free face* dan memiliki beda waktu tunda 8 ms dapat mengurangi PPV rata-rata yang dihasilkan, berkurang dari 1,41 mm/s menjadi 1,01 mm/s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hemphill, G. B. (1981). *Blasting Operations* New York: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam: AA Balkema.
- [3] Dick, R. A., Fletcher, I. R., dan D'Andrea, D. V. (1983). *Explosive and Blasting Procedures Manual*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office
- [4] Kuzu, C., dan Hudaverdi, T. (2005). Evaluation of Blast-induced Vibrations. *International Journal of Brighton Conference Proceedings*, 34, 119.
- [5] Fahlevi, R., Sulistianto, B., dan Husni, B. (2012). Perangkat Lunak Analisis Getaran Tanah Akibat Peledakan. *Jurnal JTM*, 192, 61-62.
- [6] Konya, C. J., dan Walter, E. J. (1990). *Surface Blast Design*. New Jersey, USA: Prentice Hall Englewood Cliffs.
- [7] Jimeno, C. L. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam: AA Balkema.
- [8] Bickford, E. (1987). *Delay Pattern Guide*. North America: The Ensign-Bickford Company.
- [9] Sembiring, R. K. (1995). *Analisis Regresi Edisi Kedua*. Bandung: Penerbit ITB
- [10] Akande, J. L., Aladejare, A. E., dan Lawal, A. I. (2014). Evaluation of the Environmental Impacts of Blasting in Okorusu Fluorspar Mine, Namibia. *International Journal of Engineering and Technology*, 42, 102-103.
- [11] Li, J. 2009. An Adaptive Image Euclidean Distance. *Journal of Pattern Recognition*, 42, 350.