



PREDIKSI *OVERBREAK* PADA PELEDAKAN TAMBANG BAWAH TANAH MENGGUNAKAN METODE EMPIRIK, STATISTIK DAN *ARTIFICIAL INTELLIGENCE*

OVERBREAK PREDICTION IN UNDERGROUND MINE BLASTING USING EMPIRICAL, STATISTICAL, AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHOD

S. Akbar¹, G. M. Simangunsong², N. P. Widodo³, T. Fadillah⁴

¹⁻³Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

⁴Mine Operation Bureau, Antam Gold Mining Business Unit

¹⁻³Jl. Ganesa No.10 Lb.Siliwangi Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat

⁴Pongkor, Bogor, Jawa Barat

e-mail: 1akbarparton@gmail.com, 2Ganda@itb.ac.id, 3npw@itb.ac.id, 4taruna.fadillah2@antam.com

ABSTRAK

Teknik peledakan masih menjadi metode yang umum digunakan dalam penggalian tambang bawah tanah karena efisien dari segi waktu dan biaya. Meskipun begitu, metode ini memiliki serangkaian dampak negatif seperti halnya *overbreak*. Apabila tidak ditangani dengan baik, *overbreak* bisa saja mengarah ke masalah keselamatan dan peningkatan biaya yang menghambat kemajuan pekerjaan terowongan. Prediksi *overbreak* dibutuhkan untuk menemukan desain dan implementasi peledakan yang mempertimbangkan kondisi massa batuan di lapangan merupakan salah satu metode mencegah *overbreak* di kemudian hari. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi *overbreak* dengan menerapkan metode empirik, statistik, dan *artificial intelligence* (AI). Secara historis, *overbreak* terjadi akibat pengaruh dari beberapa faktor yaitu faktor teknis peledakan, kondisi massa batuan, dan dimensi terowongan. Variabel yang merepresentasikan ketiga faktor tersebut dan dijadikan masukan dalam membangun model prediksi adalah *specific charge*, *perimeter powder factor*, *maximum charge per delay*, *hole depth*, *advance factor*, *tunnel section area*, dan nilai *Q-system*. Metode empirik yang digunakan adalah persamaan Verma (2016), *Multiple Regression Analysis* (MRA) mewakili metode statistik, dan pendekatan AI menggunakan model *Artificial Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk masing-masing metode adalah 0,064 (Empirik), 0,029 (MRA), dan 0,22 (ANFIS). Hasil tersebut mengindikasikan metode statistik dengan model MRA lebih baik digunakan untuk metode prediksi *overbreak*.

Kata kunci: desain peledakan terowongan, terowongan, *overbreak*, parameter geomekanika, ANFIS

ABSTRACT

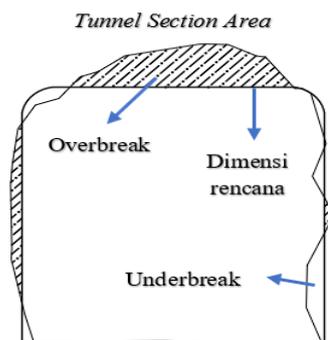
Blasting is still a commonly used method in underground mine excavation because it is efficient in terms of time and cost. However, this method has negative impacts such as *overbreak*. If *overbreak* was not handled properly, it can lead to safety issues and increased costs that may delay the progress of tunnel work. Hence the *overbreak* prediction is needed to find the best blast design considering rock mass conditions to prevent future *overbreak*. This study was conducted to evaluate *overbreak* prediction by applying empirical, statistical, and AI methods. *Overbreak* occurred due to the influence of several factors, namely technical factors of blast design, the rock mass condition, and the tunnel dimensions. The variables that represent these three influence factors are used as input parameters to develop prediction models. The variables are *specific charge*, *perimeter powder factor*, *maximum charge per delay*, *hole depth*, *advance factor*, *tunnel section area*, and *Q-system* value. The empirical method used the relationship proposed by Verma (2016), *multiple regression analysis* (MRA) is used to represent the statistical method, and an *Artificial Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) is used to represent AI method. The results were evaluated in term of *root mean square error* (RMSE) and found that the MRA generates the smallest value of (0,029), followed by the empirical relationship of Verma (0,064) and ANFIS (0,22). These results indicate that the statistical method with MRA model is better to use for *overbreak* prediction.

Keywords : underground blast design, tunnel, *overbreak*, geomechanics parameters, ANFIS

PENDAHULUAN

Pembukaan terowongan dengan menggunakan metode pengeboran dan peledakan masih menjadi pilihan utama karena paling baik ditinjau dari segi efisiensi waktu dan biaya [1]. Namun, aktivitas peledakan untuk penggalian terowongan juga memiliki beberapa dampak negatif baik pada kestabilan terowongan maupun dampak lingkungan [2]. Beberapa dampak negatif yang mengganggu kestabilan terowongan adalah getaran tanah (*ground vibration*), zona kerusakan batuan, zona batuan terganggu, dan terjadinya ketidaksesuaian dimensi desain dan aktual terowongan pasca peledakan yang dikenal sebagai *overbreak* dan *underbreak* [1].

Overbreak dan *underbreak* diartikan sebagai adanya deviasi perimeter antara batas luar dan batas dalam sebuah terowongan dari desain awal [3]. Menurut Singh (2005) *overbreak* adalah peningkatan volume aktual profil terowongan melebihi profil desain awal [4]. Jika dimensi aktual lebih kecil dari dimensi rencana maka disebut *underbreak*, sebaliknya apabila dimensi aktual lebih besar dari desain awal perencanaan disebut *overbreak* [4]. Gambar 1 menampilkan ilustrasi *overbreak* dan *underbreak* dalam bentuk *Tunnel Section Area*. *Overbreak* terjadi ketika dimensi aktual hasil peledakan lebih dari dimensi rencana yang telah ditentukan atau dimensi terowongan hasil peledakan sebelumnya.



Gambar 1. Ilustrasi Penampakan *Overbreak* Terowongan Hasil Peledakan

Tujuan penelitian ini adalah menghitung *overbreak* dengan mencoba menerapkan metode Empirik, MRA, dan ANFIS sebagai model prediksi berdasarkan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Adanya sebuah pendekatan yang holistik dengan tujuan mencari tahu penyebab *overbreak* serta metode yang sesuai untuk memprediksinya menjadi kebutuhan dalam penambangan bawah tanah dengan metode peledakan. Hal tersebut kemudian menjadi hipotesis penelitian ini. Diharapkan penelitian ini dapat membantu meningkatkan efisiensi pembukaan terowongan maupun produksi pada tambang bawah tanah.

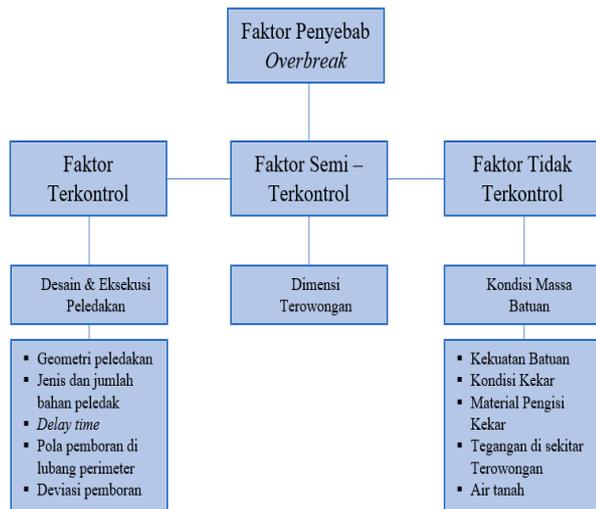
Banyak penelitian telah dilakukan untuk menganalisis faktor penyebab terjadinya *overbreak* dengan berbagai pendekatan. Jang dan Topal (2013) melakukan optimasi prediksi *overbreak* berdasarkan parameter geologi dengan membandingkan antara model prediksi model *Multiple Regression Analysis* (MRA) dan *Artificial Neural Network* (ANN) [5]. Verma (2016) mengembangkan sebuah persamaan empirik untuk menghitung *overbreak* dengan menggunakan faktor teknis peledakan dan nilai *Q-system* [1]. Mottahedi (2018) menggunakan gabungan pendekatan *Artificial Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) dan PSO (*Particle Swarm Optimization*) untuk membuat model prediksi *overbreak* dan optimasinya [6].

Sebagian besar penelitian menghasilkan rekomendasi untuk menerapkan pendekatan lebih banyak pada kondisi geologi yang berbeda agar menemukan kesesuaian dengan metode prediksi yang akan digunakan. Artinya tidak ada metode prediksi yang sesuai pada semua kondisi geologi. Pendekatan yang sama dengan jumlah data yang berbeda akan menghasilkan hasil prediksi yang juga berbeda. Prediksi dengan pendekatan ANN dianggap yang paling baru dengan memanfaatkan perkembangan teknologi di bidang komputer saat ini.

Pendekatan yang sama digunakan dalam penelitian ini yaitu metode empirik Verma (2016), metode statistik dengan *Multiple Regression Analysis* (MRA), dan metode AI dengan *Artificial Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). Ketiga metode tersebut kemudian dibandingkan dengan *overbreak* aktual untuk melihat efektivitas masing-masing metode. Beberapa penelitian telah mengkonfirmasi terjadinya *overbreak* maupun *underbreak* bergantung pada dua faktor utama. Ibarra (1996) membagi penyebab *overbreak* menjadi dua yaitu faktor geologi dan faktor peledakan atau bisa juga kombinasi dari keduanya [7]. Faktor geologi berkaitan dengan kondisi batuan yang dilakukan penggalian, sedangkan faktor peledakan adalah rancangan peledakan maupun implementasinya. Lebih lanjut Mottahedi (2018) menyebutkan tiga faktor yang dapat menyebabkan *overbreak* yaitu faktor terkontrol, semi-terkontrol dan faktor tidak terkontrol [6]. Pada Gambar 2 dapat dilihat penyebab *overbreak* yang dibagi ke dalam tiga faktor. Faktor terkontrol adalah faktor yang bisa dikelola bergantung pada kemampuan manusia seperti faktor desain peledakan dan penerapannya, faktor tidak terkontrol mengarah pada kondisi batuan yang dihadapi, sementara faktor semi-terkontrol adalah dimensi atau ukuran terowongan yang biasanya sudah relatif tidak mengalami perubahan meskipun dapat diubah pada kondisi tertentu.

Sumber data diambil dari terowongan tambang bawah tanah PT ANTAM Persero UBPE Pongkor dimana untuk keperluan penggalian bawah tanah, perusahaan menggunakan metode pengeboran dan peledakan (*Drill and Blasting*). PT ANTAM Persero UBPE (Unit Bisnis Pertambangan Emas) Pongkor adalah perusahaan

penambangan emas di bawah Badan Usaha Milik Negara (BUMN) PT ANTAM yang sejak lama menerapkan metode penambangan bawah tanah. Proses peledakan tidak hanya mempertimbangkan aspek kestabilan dan dimensi lubang bukan, tetapi juga menargetkan fragmentasi bongkaran *ore* yang sesuai rencana. Dalam hal ini PT ANTAM sering kali menghadapi persoalan *overbreak* akibat peledakan [8].



Gambar 2. Faktor – faktor yang mempengaruhi terjadinya *overbreak* (Dimodifikasi dari Mottahedi dkk, 2018)

Selanjutnya, faktor penyebab *overbreak* yang disebutkan di Gambar 2 akan diadopsi ke dalam persamaan yang dikembangkan Verma (2016). Persamaan tersebut dipilih karena terdapat parameter yang mewakili semua faktor - faktor penyebab *overbreak* di atas. Lebih lengkap dapat dilihat di Persamaan (1).

$$OB (\%) = 0.854 * \frac{q}{Q^{0.15}} \left(\frac{W * d}{a} + \frac{3.89 qp}{A_f} \right) + 0.69 \quad (1)$$

Dimana parameter yang digunakan adalah *Specific Charge* (q), *Maximum Charge per Delay* (W), *Tunnel section Area* (a), *Hole depth* (d), *Perimeter Powder Factor* (q_p), dan *Advance Factor* (A_f) yang mewakili faktor teknis peledakan. Sedangkan untuk faktor geologi kondisi massa batuan diwakili oleh nilai *Q-system* (Q). Berikut adalah penjelasan lebih detail mengenai masing – masing parameter:

- *Specific Charge*, q , (kg/m^3): Perbandingan antara jumlah bahan peledak yang digunakan dengan volume bongkaran batuan hasil peledakan.
- *Maximum Charge per Delay*, W , (kg): Jumlah maksimum bahan peledak yang meledak bersamaan dalam satu urutan inisiasi (*delay time*).
- *Tunnel section Area*, a , (m^2): Luas area *tunnel* yang merupakan fungsi dari lebar kali tinggi terowongan.
- *Hole depth*, d , (m): Kedalaman lubang ledak.

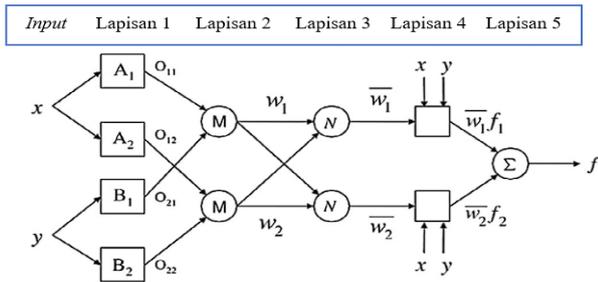
- *Perimeter Powder Factor*, q_p , (kg/m^3): Perbandingan jumlah bahan peledak yang digunakan di area perimeter dengan volume batuan terongkar di area perimeter.
- *Advance Factor*, A_f , (m/m): Perbandingan antara kedalaman lubang ledak hasil *drilling* dengan kemajuan aktual yang dicapai setelah peledakan.

Parameter di atas juga menjadi variabel masukan dalam membangun model prediksi menggunakan *Multiple Regression Analysis* (MRA) dan *Artificial Neuro Inference System* (ANFIS). Kedua metode tersebut membutuhkan data *training* dan *testing* dalam proses membangun model prediksinya. Data *training* digunakan untuk membuat model pembelajaran dalam sistem MRA dan ANFIS lalu dilanjutkan dengan *testing* atau uji model setelah mendapatkan tingkat *error* yang kecil.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \dots \dots + \beta_n X_n \quad (2)$$

Metode *Multiple Regression Analysis* (MRA) atau Analisis regresi berganda adalah salah satu cara dalam statistik untuk mencari seberapa besar pengaruh dua atau lebih variabel bebas (independen) terhadap satu variabel terikat (dependen). Persamaan regresi berganda dapat dilihat pada persamaan (2) dimana Y adalah variabel dependen, β_0 konstanta, β_1 seterusnya adalah koefisien regresi, dan $X_1, X_2 - X_n$ adalah variabel independen. Jumlah β dan X akan mengikuti jumlah parameter yang akan dimasukkan sebagai variabel bebas.

Pertama kali dikembangkan oleh Jang (1997), *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) adalah gabungan dari logika *fuzzy* dan *Artificial Neuro Network* (ANN) [9]. Logika *fuzzy* mempunyai kelebihan dalam memodelkan aspek kualitatif dari pengetahuan manusia dan proses pengambilan keputusan dengan menerapkan basis aturan (*rules*). ANN atau Jaringan Syaraf Tiruan memiliki kelebihan dalam mengenali pola, belajar dan berlatih dalam menyelesaikan suatu permasalahan tanpa memerlukan pemodelan matematik. ANN dapat bekerja berdasarkan data historis yang dimasukkan kepadanya dan dapat melakukan prediksi kejadian yang akan datang berdasarkan data-data tersebut. Penelitian yang menjadikan ANN sebagai pendekatan dalam menyelesaikan persoalan geomekanika sudah banyak dilakukan. Wahyudi dkk, (2011) dan Maulana dkk, (2021) menggunakan model ANN untuk mengevaluasi dan prediksi getaran peledakan [10, 11]. Studi lain adalah Arianda dkk, (2018) dan Purba dkk, (2020) mengaplikasikan metode ANFIS untuk membangun model prediksi parameter geomekanika dan memprediksi fragmentasi batuan hasil peledakan tambang bawah tanah [12, 13].



Gambar 3. Struktur ANFIS (Dimodifikasi dari Mottahedi, 2018).

Contoh ilustrasi mekanisme ANFIS dengan dua *input* Jang (1997) dapat dilihat pada Gambar 3 di atas [10]. Dari gambar tersebut, ANFIS minimal memiliki dua *input* yang diwakili oleh *x* dan *y* serta memiliki satu *output*. Terdapat lima lapisan atau *layer* dalam struktur ANFIS yang secara bertahap dimulai dari *layer* pertama sampai *layer* kelima. Lapisan pertama (1) adalah lapisan fuzzifikasi, lapisan kedua (2) adalah produk dari fuzzifikasi berupa derajat keanggotaan, lapisan ketiga (3) merupakan proses normalisasi, lapisan keempat (4) adalah perhitungan hasil *fuzzy rules* dan *layer* terakhir yaitu lapisan kelima (5) yang merupakan final *output* hasil penjumlahan lapisan sebelumnya [7]. Proses pada ANFIS akan berulang dari lapisan pertama - kelima dalam setiap satu kali iterasi (*epoch*). Metode ANFIS yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem inferensi *fuzzy model* Sugeno.

METODE PENELITIAN

Pengambilan data dilakukan di area Ciguha dan Kubang Kicau PT Antam UBPE Pongkor pada periode Mei – Agustus 2023. Secara geografis perusahaan terletak di area Gunung Pongkor tepatnya di Desa Bantarkaret, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat (Lihat Gambar 4).

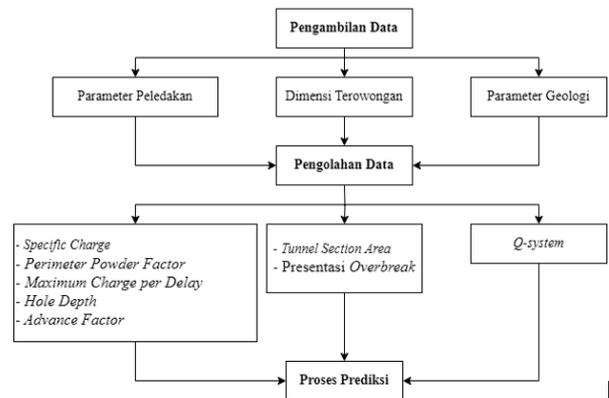


Gambar 4. Lokasi Penelitian (Dimodifikasi dari PT Antam)

Dalam menjalankan operasi produksi, PT Antam menerapkan penambangan bawah tanah dengan metode *cut and fill* dimana kegiatan *drilling and blasting* diterapkan sebagai metode penggalian terowongan. Setelah mengambil material bijih yang ditargetkan, terowongan kemudian diisi (*fill*) kembali dengan material sisa (*Waste*) hasil pengolahan.

$$OB (\%) = \frac{A-A'}{A'} \times 100\% \tag{3}$$

Pengukuran dimensi terowongan menghasilkan data area maupun volume dari profil terowongan. Perhitungan presentasi *overbreak* menggunakan persamaan (3). Dimana *A* merupakan area rencana dan *A'* adalah area aktual setelah peledakan. Nilai *A* dan *A'* diperoleh dari volume terowongan (m^3) yang diukur saat kegiatan survei dibagi dengan kemajuan aktual (*m*). *OB* adalah presentasi *overbreak* hasil perbandingan antara area awal dan area aktual (%). Data lengkap mengenai area terowongan dan presentasi *overbreak* dapat dilihat di Tabel 1. Hasil perhitungan ini akan menjadi pembandingan dengan metode prediksi untuk melihat akurasi dari setiap metode.



Gambar 5. Skema Pengambilan Data

Data hasil akuisisi lapangan kemudian diklasifikasikan berdasarkan persamaan (1) Verma (2016). Hasil klasifikasi data akan dijadikan variabel *input* dalam proses prediksi *overbreak* baik menggunakan MRA maupun ANFIS. Berdasarkan Gambar 5, terdapat enam parameter yang digunakan, dimana Nilai *Q-system* mewakili parameter kondisi massa batuan di sekitar area peledakan sebagai faktor tidak terkontrol dan faktor teknis peledakan direpresentasikan oleh parameter teknis peledakan sebagai faktor terkontrol seperti *specific charge* (kg/m^3), *perimeter powder factor* (kg/m^3), *maximum charge per delay* (kg), *hole depth* (m), dan *advance factor* (m/m). Selanjutnya, *tunnel section area* (m^2) menjadi faktor semi-terkontrol.

Tabel 1. Detail Informasi Pengambilan Data

No.	Lokasi	Area Rencana (m)	Area Aktual (m)	Volume Rencana (m ³)	Volume Aktual (m ³)	Jumlah Pemakaian Anfo (kg)	Max. Charge Per Delay (kg)	Volume Bongkaran Perimeter (m ³)	Pemakaian Anfo di Perimeter Area (kg)	Nilai Q	Overbreak (%)
1	Cg	33.85	36.27	81.25	69.27	104.55	15.93	13.72	26.21	0.12	7.12%
2*	Cg	32.58	32.81	74.93	49.22	79.33	12.69	13.72	20.58	0.12	0.72%
3	Cg	22.95	23.83	29.84	49.34	79.33	12.69	13.72	28.40	1.85	3.85%
4	Cg	22.26	25.25	43.41	47.97	79.33	12.69	17.64	33.52	0.22	13.41%
5	Cg	25.25	26.01	47.97	39.02	79.33	12.69	13.72	20.58	0.63	3.03%
6	Cg	35.51	35.56	90.56	85.34	173.80	18.54	13.72	32.93	0.63	0.13%
7	Cg	27.31	36.02	51.89	73.12	79.55	12.12	13.72	27.85	0.63	31.89%
8	Cg	36.02	47.53	73.12	84.60	79.55	12.12	13.72	24.42	0.63	31.96%
9	Cg	32.67	35.01	81.68	94.52	106.50	16.23	13.72	37.04	0.63	7.16%
10	Cg	35.01	40.00	94.52	77.61	105.63	13.00	13.86	26.89	0.63	14.27%
11	Cg	21.65	30.21	60.62	45.32	131.50	14.51	7.84	11.76	0.16	39.54%
12*	Cg	27.78	29.91	127.77	54.14	130.20	17.36	10.78	19.51	0.16	7.68%
13*	Cg	21.86	30.03	123.04	67.56	103.90	18.47	13.72	30.87	0.16	37.40%
14	Cg	30.79	38.77	181.66	52.73	79.33	12.69	13.72	18.66	0.29	25.93%
15	KC	34.40	35.92	85.65	64.65	129.76	18.87	17.64	31.75	0.16	4.42%
16	KC	31.48	45.69	63.53	114.22	140.54	21.42	13.72	34.30	0.16	45.12%
17	KC	16.10	21.00	14.49	36.12	61.90	12.38	13.72	23.60	0.34	30.43%
18	KC	25.97	32.34	53.50	87.31	139.88	17.90	13.86	37.42	0.74	24.51%
19	KC	32.34	35.75	87.31	75.08	114.88	17.50	13.72	28.81	0.34	10.56%
20	KC	25.30	29.64	53.13	50.09	139.88	17.90	13.86	23.42	0.09	17.16%
21	KC	26.78	34.36	58.92	78.00	133.66	18.60	10.78	24.47	0.16	28.28%
22	KC	29.26	32.30	50.91	61.04	103.68	19.52	13.72	25.93	0.22	10.39%
23*	KC	25.81	28.77	48.52	43.23	111.90	17.90	13.72	20.62	0.22	11.47%
24*	KC	21.76	21.94	43.52	43.98	112.50	17.14	13.72	27.49	0.34	0.85%
25*	KC	29.64	30.97	50.09	50.48	131.50	20.04	13.72	22.36	0.09	4.48%
26	KC	21.94	30.21	43.98	41.99	103.68	19.52	13.72	19.07	0.34	37.68%
27	KC	24.93	29.68	44.88	49.57	142.85	16.93	10.78	18.00	0.09	19.04%
28	KC	25.36	27.11	40.58	40.67	117.85	17.96	13.72	20.58	0.16	6.90%
29	KC	26.89	32.64	51.90	58.76	54.33	10.23	13.72	24.70	0.07	21.39%
30	KC	24.26	26.68	48.52	42.69	129.55	19.74	13.72	21.95	0.10	9.98%

Catatan: Cg: Ciguha, KC: Kubang Cicau, *Testing data

Pengambilan data hanya dilakukan pada jenis peledakan *full face* dimana merupakan pola peledakan yang meledakkan muka terowongan dalam satu kali peledakan. dengan rata-rata kedalaman dan diameter lubang ledak masing-masing 2,4 (m) dan 0,064 (m). Bahan peledak yang digunakan adalah ANFO (*primer*) dan Dayagel (*booster*) dengan inisiasi (*delay time*) 2 – 4 lubang yang meledak di setiap *delay*. Pemilihan data *testing* diambil dari perwakilan dua lokasi pengambilan data agar lebih representatif.

Pembuatan model prediksi ANFIS menggunakan *user interface* pada *software* Matlab2022b. Namun, terlebih dahulu setiap parameter akan dinormalisasi agar menyederhanakan prosedur desain model prediksi. Untuk pembuatan model MRA menggunakan *software* statistik. Sebelum itu, pengujian data perlu dilakukan agar memastikan tidak terjadi multikolinearitas dan heteroskedastisitas. Normalisasi data dilakukan dengan persamaan (4) yang sudah umum digunakan oleh banyak peneliti. Dimana X_i adalah nilai parameter, X_{min} adalah nilai minimum parameter data, dan X_{max} adalah nilai

maksimum data, serta X_n adalah normalisasi parameter [7].

$$X_n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

Tabel 2. Statistik Parameter *Input* dan *Output*

Tipe	Parameter	Unit	Simbol	Min	Max
Input	Specific Charge	kg/m ³	<i>q</i>	0.92	3.03
	Maximum Charge per Delay	kg	<i>W</i>	10.23	21.42
	Hole Depth	m	<i>d</i>	2.4	2.4
	Tunnel Section Area	m ²	<i>a</i>	16.10	36.02
	Perimeter Powder Factor	kg/m ³	<i>q_p</i>	0.57	4.32
	Advance Factor	m/m	<i>A_f</i>	0.57	1.13
	Q-system	-	<i>Q</i>	0.07	1.85
Output	Overbreak	%	<i>OB</i>	0.13%	45.12%

Perhitungan metode empirik memakai persamaan Verma (2016) yang dapat dilihat di persamaan (1). Setelah mendapatkan hasilnya, nilai konstanta pada persamaan tersebut disesuaikan dengan *site specific* data yang dimiliki. Persamaan modifikasi empirik Verma (2016) seperti yang tertera pada persamaan (5) yang hasilnya akan menjadi *overbreak* prediksi empirik yang nantinya dibandingkan dengan metode MRA dan ANFIS.

$$OB (\%) = 0.0004 * \frac{q}{Q^{0.15}} \left(\frac{W*d}{a} + \frac{3.89 q_p}{A_f} \right) + 0.16 \quad (5)$$

Untuk model prediksi MRA dan ANFIS, data parameter *input* pada Tabel (2) akan dibagi menjadi data *training* dan data *testing* masing – masing sebanyak 80% dan 20%. Langkah-langkah dalam proses penentuan model MRA dimulai dengan pengujian data, lalu dilanjutkan dengan proses prediksi. Proses ini ditujukan untuk mencari nilai konstanta dan koefisien regresi (β) seperti pada persamaan (2). Berikut adalah persamaan (6) hasil regresi hasil proses prediksi dengan metode MRA.

$$OB (\%) = 0.975 - 1.420 (q) + 0.002 (Q^{0.15}) - 0.640 (a) + 0.446 (W*d) - 0.312 (A_f) + 1.269 (3.89*q_p) \quad (6)$$

Selanjutnya pembuatan model ANFIS dilakukan dengan proses *training* dan *testing*. *Training* bertujuan melatih kemampuan model dalam memprediksi. Keakuratan model *training* dapat dilihat pada nilai *error* yang dihasilkan selama proses iterasi (*epoch*) berlangsung. Apabila telah didapatkan nilai *error* yang kecil, proses dilanjutkan ke proses *testing* guna menguji hasil *training*. Tabel 3 adalah perbandingan beberapa model hasil percobaan:

Tabel 3. Perbandingan Model ANFIS

No.	Parameter			
	Tipe MFs	Jumlah MFs	Error	Iterasi
1	Gaussian	3	0.061871	600
2	Trapezodial	3	0.0348419	600
3	Triangular	3	0.0348419	600

Dari 30 data set parameter seperti pada Tabel 1 dan 2. Sejumlah 24 data dijadikan sebagai *training* dan 6 data *testing*. Akurasi hasil *training* dipengaruhi oleh pemilihan jumlah dan tipe Derajat Keanggotaan (*Membership Function*) dan banyaknya iterasi. Beberapa percobaan (*trial & error*) diperlukan dalam menentukan model ANFIS yang paling baik seperti pada Tabel 3. Metode Optimasi yang digunakan adalah *Backpropagation* yang merupakan algoritma pembelajaran dalam *Artificial Neuro Network* (ANN) yang digunakan untuk memperkecil nilai *error* dengan cara menyesuaikan bobotnya berdasarkan perbedaan *output* dan target yang diinginkan. Terlihat dengan iterasi sebanyak 600 kali, model nomor 3 dan 2 dengan tipe MFs *Triangular* dan *Trapezodial* menghasilkan *error* yang lebih kecil yaitu 0,0348.

Setelah proses prediksi dijalankan, nilai *testing overbreak* prediksi baik melalui metode Empirik, MRA, dan ANFIS akan dibandingkan dengan *overbreak* aktual hasil pengukuran lapangan. Indikator yang umum digunakan untuk menilai kelayakan suatu model prediksi dengan aktual adalah *Root Mean Square Error* (RMSE).

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}}{n} \quad (7)$$

RMSE merupakan suatu kuadrat rata-rata dari selisih antara *output* model dengan data yang sebenarnya. Cara kerja RMSE adalah dengan melihat nilai *error* atau diferensiasi setiap nilai prediksi dengan aktual. RMSE dikatakan semakin baik jika memiliki nilai yang mendekati atau sama dengan 0. Metode penentuan nilai RMSE dapat ditemukan dalam persamaan (7). Dimana y_i merupakan nilai aktual, y_i' adalah nilai prediksi, dan n adalah jumlah data.

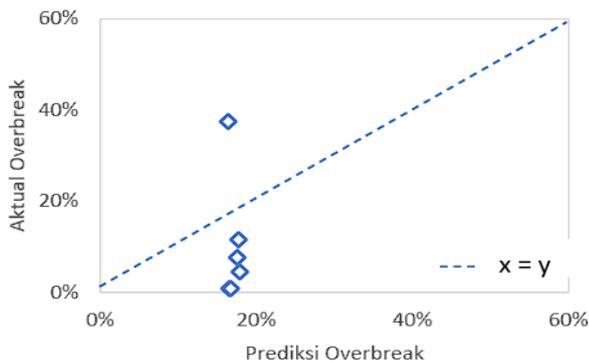
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil prediksi *overbreak* dengan metode empirik, MRA, dan ANFIS menunjukkan keakuratan yang berbeda. Hasil *plot* data *testing* masing-masing model dapat dilihat di Gambar 6, 7, dan 8. Pada Gambar 6 terlihat metode empirik memberikan hasil *testing* yang tidak mendekati nilai aktual terlihat dari sebaran *scatter* yang jauh dari garis ideal $x = y$. Pada Gambar 7 dan 8 sebaran *scatterplot* menunjukkan kecenderungan yang relatif mengikuti garis ideal dimana nilai prediksi sama dengan aktual. Namun, dari sisi keakuratan, Metode MRA pada Gambar 7 lebih baik.

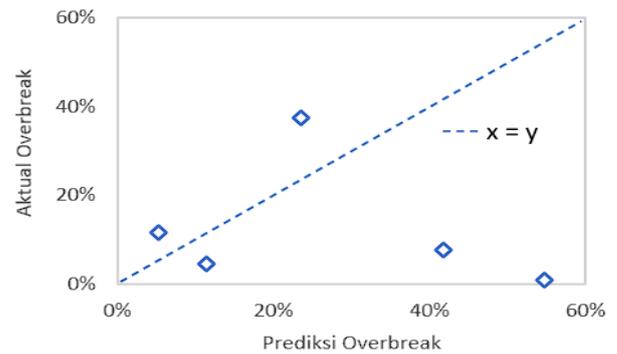
dengan masing-masing (0,13) dan (0,15). Dari ketiga metode di atas, dapat disimpulkan bahwa prediksi *overbreak* dengan metode MRA masih lebih baik karena mampu mengakomodir jumlah data *training* sebanyak 24 data dan *testing* 6 data.

Tabel 7. Nilai RMSE Metode Prediksi

RMSE	Metode		
	Empirik	MRA	ANFIS
<i>Training</i>	0.13	0.09	0.04
<i>Testing</i>	0.15	0.08	0.27

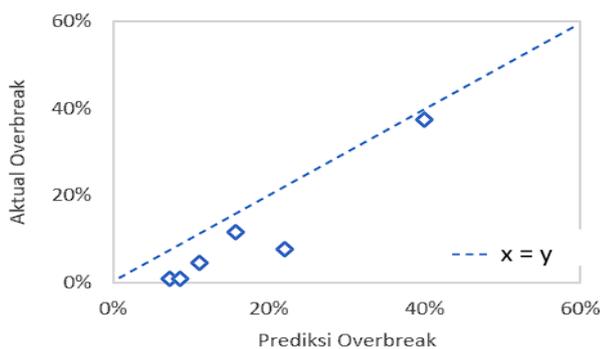


Gambar 6. *Testing* Model Empirik Verma (2016)



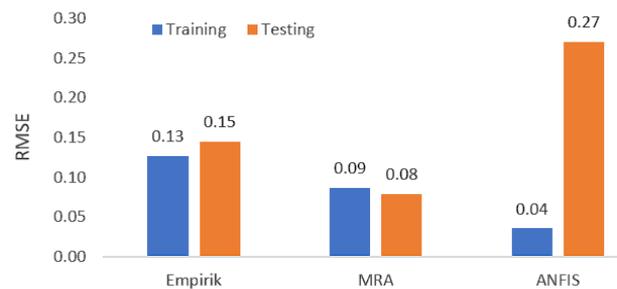
Gambar 8. *Testing* Model ANFIS

Dari nilai RMSE tersebut, dapat disimpulkan jika metode MRA lebih akurat untuk memodelkan *overbreak* dengan jumlah data yang sedikit. Hal ini juga membuktikan bahwa variabel *input* seperti *specific charge*, *q-system*, *maximum charge per delay*, *tunnel area*, *hole depth*, *perimeter powder factor*, dan *advance factor* memiliki pengaruh terhadap *overbreak* terutama menggunakan pendekatan statistik MRA. Gambar 9 dan 10 menjelaskan lebih detail mengenai keakuratan dari masing-masing model.



Gambar 7. *Testing* Model MRA

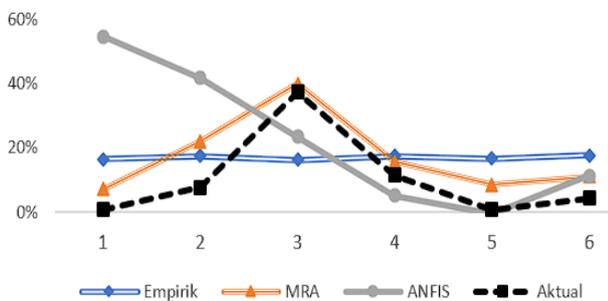
Melalui hasil *testing* menggunakan 6 data set terhadap setiap metode, nilai RMSE yang terbaik menggunakan metode MRA dengan nilai 0,086. Model ANFIS mampu menghasilkan RMSE *training* yang cukup baik (0,04), namun saat diaplikasikan ke *testing*, model ANFIS tidak mampu memberikan akurasi baik (0,27). Hal ini dipengaruhi oleh jumlah data yang dijadikan *training* maupun *testing* yang tidak terlalu banyak. Berbeda halnya dengan metode MRA yang nilai RMSE *training* (0,09) dan saat proses *testing* menghasilkan RMSE yang mencapai (0,08). Untuk metode empirik Verma (2016), nilai RMSE *training* dan *testing* tidak jauh berbeda



Gambar 9. Grafik Nilai RMSE

Hal yang sama dapat dikonfirmasi melalui garis akurasi pada Gambar 10. Dari enam data *testing* yang disiapkan, hanya garis MRA (warna *orange*) yang konsisten mengikuti garis (warna hitam) yang mewakili data

overbreak aktual hasil pengukuran lapangan. Nilai RMSE di atas memberikan kesimpulan bahwa prediksi *overbreak* metode ANFIS tidak terlalu sesuai pada jumlah data set yang relatif kecil. Sedangkan model prediksi dengan metode Empirik Verma dan MRA dapat memberikan toleransi pada jumlah data yang sedikit.



Gambar 10. Garis Akurasi Hasil Testing

KESIMPULAN

Fenomena *overbreak* sering menjadi masalah dalam peledakan tambang bawah tanah dan harus diselesaikan dengan berbagai pendekatan. Penelitian ini telah membuktikan jika *overbreak* di PT Antam UBPE Pongkor dipengaruhi oleh faktor teknis peledakan, dimensi terowongan, dan kondisi massa batuan. Untuk meminimalisir *overbreak* pada progres peledakan selanjutnya, metode MRA bisa digunakan saat jumlah dataset untuk membangun model prediksi melalui proses *training* tidak cukup banyak. Nilai RMSE *testing* data yang menunjukkan akurasi dari model prediksi saat menggunakan metode MRA adalah 0.08. Hal ini lebih baik dibandingkan dengan metode Empirik dan ANFIS yang nilai RMSE masing – masing metode adalah 0.15 dan 0.27.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung (ITB), Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), dan PT Antam, Tbk., Persero yang telah memberi dukungan dalam bentuk finansial dan fasilitas terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Verma, H.K., Samadhiya, N.K., Singh, M., Goel, R.K., dan Singh, P.K. (2018): Blast Induced Rock Mass Damage Around Tunnel, *Tunneling and Underground Space Technology*, 71, 149-158.

[2] Fodera, G.M. (2020). Factors influencing overbreak volumes in drill-and-blast tunnel excavation: A statistical analysis applied to the case study of the Brenner Base Tunnel – BBT.

Tunneling and Underground Space Technology, (105).

[3] Simangunsong, G.M. (2022), Underground Blast Design, Materi Kuliah, Bahan Peledak dan Teknologi Peledakan. Institut Teknologi Bandung.

[4] Singh, S.P., Xavier, P., (2005). Causes, impact and control of over break in underground excavation. *Tunneling and Underground Space Technology*, 20, 63-71.

[5] Jang, H., dan Topal, E. (2013): Optimizing overbreak prediction based on geological parameters comparing multiple regression analysis and artificial neuro network, *Tunneling and Underground Space Technology*, 38, 161-169.

[6] Mottahedi, A., Sereshski, F., & Aatei, M. (2018). Overbreak prediction in underground excavations using hybrid ANFIS-PSO Model. *Tunneling and Underground Space Technology*, 80, 1-9.

[7] Ibarra, J.A., Maerz, N.H., Franklin, J.A. (1996a): Overbreak and underbreak in underground openings part 1: measurement using the light sectioning method and digital image processing. *Geotech. Geol. Eng*, 14, 307–323.

[8] Suwandhi, A., Rosana, M.F., & Wattimena, R.K. (2017): *Kriteria Kerusakan Akibat Peledakan pada pembuatan terowongan Ciurug, Tambang Emas Pongkor, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat*. Makalah Ilmiah. Bandung: ResearchGate.

[9] Jang, R.J.S. (1993). Anfis: Adaptive-Network-Based fuzzy inference system. *IEEE Trans. System Man Cybernet*, 23, 665-685.

[10] Maulana, Y., Simangunsong, G.M., & Karian, T. (2021). Review Penggunaan Algoritma Artificial Neural Network dalam memprediksi getaran peledakan, *Jurnal Geosapta*, 7(1).

[11] Wahyudi, S., Shimada, H., Simangunsong, G. M., Sasaoka, T., Matsui, K., Kramadibrata, S., Sulistianto, Budi. (2011). A review study of predictive model blast vibration attenuation equation by using neural network as an evaluator, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 25(1), 69-85.

[12] Arianda, D. (2018). *Prediksi Parameter Geomekanika Menggunakan Metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) dan Multiple Regression Analysis (MRA)*. Tesis, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung.

[13] Albert, P. (2020). *Prediksi Fragmentasi Peledakan Menggunakan Metode ANFIS*. Tesis, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung.