



**POLA HUBUNGAN TEMPERATUR TERHADAP PEMBENTUKAN
EMISI GAS METANA PADA SWABAKAR BATUBARA
DI *TEMPORARY STOCKPILE* BANKO BARAT**

***PATTERNS OF TEMPERATURE RELATIONSHIP TO FORMATION
METHANE GAS EMISSIONS IN SPONTANEOUS COMBUSTION
OF COAL IN THE TEMPORARY STOCKPILE OF WEST BANKO***

M. Yusuf¹

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Jl. Raya Palembang Prabumulih KM.32 Inderalaya, Sumatera Selatan, Indonesia
e-mail: *maulanayusuf@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK

Fenomena swabakar akan menurunkan kualitas dan kuantitas batubara yang menyebabkan kerugian ekonomi, sosial, dan lingkungan. Swabakar tersebut dicirikan oleh peningkatan temperatur secara perlahan sampai maksimum dan turun kembali melalui tahapan pemanasan dan pengeringan, devolatilisasi dan pirolisis, dan pembakaran arang. Tujuan penelitian mempelajari pola hubungan antara temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana di *temporary stockpile* Banko Barat. Metode yang digunakan adalah survei lapangan pada *hotspot* swabakar di *temporary stockpile* Banko Barat dengan mengambil data temperatur swabakar dan emisi gas metana sebanyak 46 data menggunakan *purposive sampling*. Hasil korelasi dan regresi menggunakan perangkat lunak SPSS Versi 22 menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang kuat antara temperatur swabakar dengan pembentukan emisi gas metana dengan nilai R sebesar 0,916 dengan model persamaan kuadrat $Y = -0,48 + 0,014 X + (-4,019 \times 10^{-6}) X^2$. Kesimpulan dari penelitian menunjukkan bahwa temperatur swabakar memiliki pengaruh sangat yang kuat terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar batubara. Peningkatan temperatur yang sangat tinggi mencapai 1.742° C akan membentuk emisi gas metana sebesar 117.120 ppm. Usaha penanggulangan pembentukan emisi gas metana yang besar tersebut harus dilakukan dengan metode preventif pada swabakar batubara di *temporary stockpile* Banko Barat.

Kata Kunci: temperatur, emisi gas metana, swabakar batubara, *temporary stockpile*

ABSTRACT

The phenomenon of spontaneous combustion will reduce the quality and quantity of coal, causing economic, social and environmental losses. Spontaneous combustion is characterized by a gradual increase in temperature to a maximum and a decrease again through the stages of heating and drying, devolatilization and pyrolysis, and charcoal combustion. The aim of the research is to study the relationship pattern between spontaneous combustion temperature and the formation of methane gas emissions in the West Banko temporary stockpile. The method used was a field survey at spontaneous combustion hotspots in the West Banko temporary stockpile by taking 46 data on spontaneous combustion temperature and methane gas emissions using purposive sampling. Correlation and regression results using SPSS Version 22 software show that there is a strong correlation between spontaneous combustion temperature and the formation of methane gas emissions with an R value of 0.916 with a quadratic equation model $Y = -0.48 + 0.014 X + (-4.019 \times 10^{-6}) X^2$. The conclusion of the research shows that spontaneous combustion temperature has a very strong influence on the formation of methane gas emissions in spontaneous combustion of coal. A very high temperature increase reaching 1,742° C will produce methane gas emissions of 117,120 ppm. Efforts to overcome the formation of large methane gas emissions must be carried out using preventive methods for spontaneous combustion of coal in the West Banko temporary stockpile.

Keywords : Temperature, Methane gas emissions, Spontaneous combustion of coal, Temporary stockpile

PENDAHULUAN

Swabakar merupakan salah satu permasalahan krusial yang terjadi pada kegiatan penambangan batubara terbuka di Indonesia. Pengaruh langsung dari swabakar tersebut adalah menurunnya kualitas dan kuantitas batubara serta terpaparnya emisi gas rumah kaca seperti gas CO₂ dan CH₄ (metana) yang dapat menyebabkan pemanasan global [1,2].

Produksi batubara sangat dipengaruhi oleh faktor iklim dimana pada musim kemarau target dapat dicapai bahkan melebihi, sedangkan pada musim hujan tidak dapat dicapai karena kendala teknis [3]. Produksi batubara yang berlebihan tersebut membutuhkan tempat penimbunan (*stockpile*) atau *temporary stockpile*. *Temporary stockpile* merupakan tempat penimbunan sebelum dikirim ke konsumen atau tempat pencampuran batubara. Penimbunan batubara di *temporary stockpile* dapat berlangsung lama bahkan sampai mencapai lebih dari enam bulan. Penimbunan batubara pada *temporary stockpile* dalam waktu yang lama dapat memicu terjadinya swabakar batubara atau *self combustion* (*spontaneous combustion*) [4].

Swabakar batubara adalah terbakarnya batubara dengan sendirinya di *temporary stockpile*, *front* tambang, dan/atau dalam proses transportasi akibat reaksi antara batubara dengan oksigen di atmosfer secara eksotermal dan terakumulasi secara terus menerus [5]. Swabakar yang terjadi pada *temporary stockpile* dapat menyebabkan penurunan kualitas dan kuantitas batubara bahkan dapat menyebabkan kerugian secara ekonomis, sosial, dan lingkungan [6]. Penurunan kualitas dan kuantitas batubara disebabkan oleh terganggunya sifat fisika dan kimia batubara dan berkurangnya jumlah batubara di *temporary stockpile* yang menyebabkan kerugian secara ekonomi [7,8,9,10].

Swabakar batubara yang terjadi pada *temporary stockpile* sangat berpengaruh terhadap lingkungan terutama polusi udara akibat emisi gas CO, gas CO₂, dan gas metana yang terlepas ke atmosfer. Gas tersebut akan mengakibatkan pemanasan global (*global warming*) semakin meningkat [11,12]. Swabakar batubara yang terjadi di *front* tambang, *stockpile*, dan *temporary stockpile* Unit Penambangan Banko Barat sebanyak 50 *hotspot*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa swabakar di lokasi tersebut sangat intensif terjadi karena batubara peringkat rendah yang termasuk ke dalam sub-bituminus dengan nilai kalori antara 5.000 - 5.200 kkal/kg.

Emisi gas metana pada swabakar batubara sangat dipengaruhi oleh sifat fisika dan kimianya. Sifat fisika dan kimia batubara diperoleh dari uji proksimat dan ultimat batubara. Sifat fisika batubara yang sangat berpengaruh terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar adalah kandungan air total (*total moisture*) berupa kandungan air bebas (*free moisture*) dan

kandungan air bawaan (*inherent moisture*), kandungan zat terbang (*volatile matter*), kandungan abu (*ash content*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Sifat kimia batubara yang sangat berpengaruh terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar batubara adalah kandungan karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen [13].

Penelitian pengaruh temperatur terhadap emisi gas metana pada swabakar batubara telah dilakukan oleh beberapa peneliti terutama fokus pada pengaruh terhadap sifat fisik dan kimia batubara, dan batubara peringkat tinggi, seperti bituminus dan antrasit. Penelitian keterkaitan temperatur swabakar dengan pembentukan emisi gas metana lebih melihat regresi dengan berbagai nilai kalor [14]. Penelitian lain juga lebih melihat hubungan temperatur yang berkaitan dengan lamanya pembakaran dan masa inkubasi swabakar untuk berbagai nilai kalori batubara [15]. Penelitian lain juga menunjukkan hubungan antara temperatur dengan peringkat batubara peringkat tinggi, seperti bituminus dan antrasit [16]. Penelitian yang telah dilakukan tersebut belum melihat secara rinci pola hubungan antara temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana terutama batubara sub-bituminus.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pola hubungan antara temperatur terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar batubara di *temporary stockpile*. Karakteristik pola hubungan tersebut dapat digunakan untuk mengatasi terjadinya swabakar yang lebih intensif di *temporary stockpile*.

METODE PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan lokasi, tahapan swabakar batubara, metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data yang digunakan untuk penyelesaian permasalahan yang berkaitan dengan penelitian ini.

Lokasi Penelitian

Pemilihan lokasi Banko Barat sebagai lokasi swabakar batubara karena batubara di lokasi tersebut peringkat rendah yang termasuk ke dalam sub-bituminus dengan nilai kalori antara 5.000-5.200 kkal/kg sedangkan batubara di lokasi Tambang Air Laya, Muara Tiga Besar, dan Banko Tengah mempunyai peringkat yang lebih tinggi yang termasuk ke dalam bituminus dan sebagian kecil antrasit antara 5.900-7.600 kkal/kg. Frekuensi swabakar batubara di *temporary stockpile* batubara Banko Barat lebih intensif dibandingkan ketiga lokasi lainnya. Swabakar batubara yang intensif terjadi di semua *front* tambang, *stockpile*, dan *temporary stockpile* sebanyak 50 *hotspot*.

Produksi batubara pada musim hujan sangat menurun dan produksi besar-besaran terjadi pada musim kemarau. Musim kemarau produksi batubara dari *front* tambang akan disimpan pada tempat penyimpanan sementara

(*temporary stockpile*). Musim hujan *temporary stockpile* digunakan untuk mengirim produksi melalui *selective breaking rotary* (SBR) sampai ukuran 20 mm ke *live stockpile* menggunakan *dump hopper* sampai ke pemuatan atau tempat pencampuran batubara (*coal blending*). *Temporary stockpile* yang terdapat di Banko Barat terdiri dari tujuh buah, yaitu *temporary stockpile* I-A, I-B, III-A, III-B, I-C, I-D, dan I-E. Batubara yang disimpan di *temporary stockpile* umumnya batubara peringkat rendah terutama sub-bituminus dengan nilai kalori antara 5.000-5.200 kkal/kg dengan kode BB52LS, BB52HS, dan BB50. Penimbunan batubara di *temporary stockpile* umumnya berumur di bawah satu tahun dan satu *stockpile* lebih dari satu tahun yaitu *temporary stockpile* I-A.

Metode Pengambilan Data

Teknik pengambilan sampel swabakar batubara berdasarkan sampel tertentu (*purposive sampling*) yang terdapat pada *temporary stockpile* batubara di Banko Barat. Jumlah sampel yang diambil menggunakan sampel tertentu sebagai data primer sebanyak 46 sampel meliputi emisi gas metana dan temperatur swabakar dan data pendukung lainnya sebagai data sekunder.

Pengambilan sampel tersebut dilakukan pada *temporary stockpile* I-A, III-A, dan III-B karena terdapat swabakar. Pengambilan sampel emisi gas metana pada swabakar batubara dilakukan untuk menganalisis hubungan antara temperatur swabakar dengan pembentukan emisi gas metana. Prosedur pengambilan sampel swabakar batubara dilakukan sebagai berikut:

- Menentukan *hotspot* swabakar batubara pada *temporary stockpile*;
- Menentukan koordinat lokasi *hotspot* swabakar batubara;
- Mengukur temperatur swabakar batubara;
- Meletakkan perangkat gas pada *hotspot* swabakar batubara;
- Mengukur emisi gas metana yang keluar melalui lubang kecil pada perangkat gas;
- Pengukuran diulangi pada *hotspot* yang lain di *temporary stockpile* Banko Barat.

Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan dan analisis data emisi gas metana menggunakan rumus, tabulasi, dan grafik yang diolah berdasarkan uji statistika menggunakan SPSS Versi 22. Metode analisis dalam penelitian ini berdasarkan korelasi dan regresi (statistika inferensial). Analisis korelasi dan regresi digunakan untuk melihat hubungan antara temperatur swabakar dengan emisi gas metana pada masing-masing *hotspot* batubara di *temporary stockpile*.

Uji Normalitas sangat diperlukan untuk mengetahui apakah data emisi gas metana yang diambil di lapangan terdistribusi normal. Penentuan kenormalan data tersebut sangat berkaitan dengan pemilihan uji statistika yang

akan digunakan. Pada penelitian akan digunakan uji normalitas berdasarkan Uji Kolmogorov-Smirnov atau disebut dengan analisis eksplorasi [17]. Pemilihan uji Kolmogorov-Smirnov dilakukan dengan pertimbangan bahwa data emisi gas metana merupakan data tunggal. Data terdistribusi normal jika rasio *skewness* dengan perhitungan *skewness/standart error of skewness* antara -2 sampai 2. Nilai *kurtosis* juga dapat melihat data terdistribusi normal jika rasio antara *kurtosis/standart error of kurtosis* antara -2 dan 2.

Koefisien korelasi (r) menunjukkan seberapa besar hubungan antara variabel tak bebasnya. Keterkaitan ini sangat penting dilakukan karena untuk melihat kekuatan dan arah hubungan. Analisis regresi akan dilakukan jika dalam analisis korelasi terdapat hubungan baik hubungan sebab akibat maupun hubungan fungsional. Analisis regresi digunakan untuk melihat pola hubungan antara variabel bebas dan variabel tak bebas dalam hasil ini variabel bebas temperatur swabakar (T) sedangkan variabel tak bebas adalah emisi gas metana di *temporary stockpile* Banko Barat.

Kekuatan hubungan antara variabel bebas (*independent*) dengan variabel tak bebas (*dependent*) dapat dipelajari menggunakan analisis korelasi. Keterkaitan antara emisi gas metana sebagai variabel tak bebas dan temperatur swabakar (T) sebagai variabel bebas dapat dipelajari menggunakan analisis korelasi. Korelasi yang dihasilkan dari hubungan antara emisi gas metana dengan variabel bebas temperatur swabakar (T) dapat terjadi sebagai korelasi positif, korelasi negatif, tidak terdapat korelasi, atau juga korelasi sempurna. Analisis korelasi untuk analisis keterkaitan antara emisi gas metana dengan temperatur swabakar (T) termasuk data rasio. Menurut untuk analisis variabel dengan data rasio maka sangat baik digunakan analisis *product moment* [18].

Bagan alir penelitian

Bagan alir penelitian merupakan proses atau tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Tahapan Swabakar Batubara

Proses swabakar batubara terjadi dalam tiga tahap, yaitu: (1) Pemanasan dan pengeringan, (2) Devolatilisasi dan pirolisis, dan (3) Pembakaran arang akan membentuk gas, *tar*, dan *char* [19].

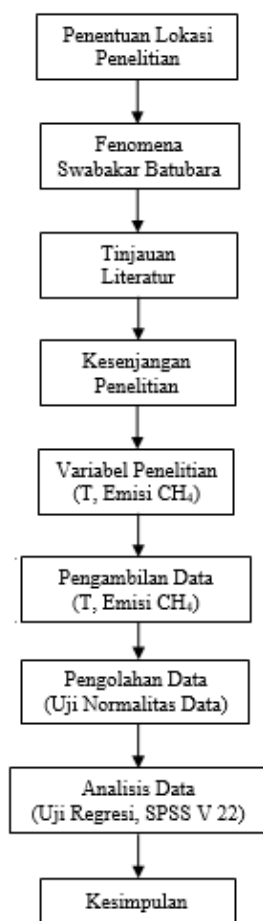
Pemanasan dan Pengeringan batubara

Faktor yang berpengaruh pada tahap ini adalah kandungan air total dari batubara. Kandungan air total yang tinggi menyebabkan waktu pembakaran lebih lama dan temperatur pembakaran lebih rendah. Sedangkan kandungan air total lebih rendah maka proses pembakaran akan lebih cepat dan temperatur pembakaran akan lebih tinggi. Pelepasan uap air terus menerus akan menyebabkan temperatur batubara akan meningkat dan kandungan air pada batubara akan

menurun. Proses pemanasan dan pengeringan pada temperatur rendah akan membentuk gas CO yang disusul pelepasan zat terbang. Temperatur swabakar akan mencapai 0 - 50° C dan terjadi penguapan air dengan reaksi berikut:



Swabakar batubara peringkat rendah dengan kandungan air total sampai 70% akan terjadi secara intensif di lapangan.

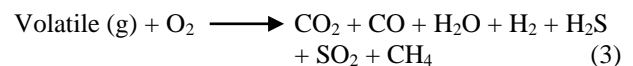
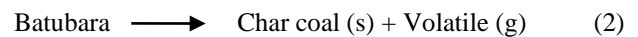


Gambar 1. Bagan alir penelitian

Devolatilisasi dan Pirolisis

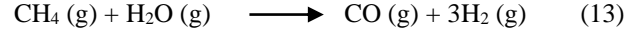
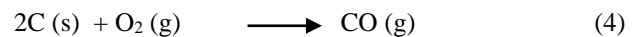
Zat terbang pada batubara akan terlepas pada saat mengalami dekomposisi dan membentuk gas CO, CO₂, SO, SO₂, H₂, H₂S, metana, H₂O, dan tar. Temperatur devolatilisasi dan pirolisis terjadi antara 40-70° C. Proses lanjut yang terjadi adalah *self heating* dimana molekul oksigen akan diserap permukaan batubara berdasarkan reaksi eksotermal dengan temperatur semakin meningkat sampai terjadinya swabakar. Waktu yang dibutuhkan dari awal proses sampai terjadinya swabakar batubara disebut sebagai masa inkubasi.

Devolatilisasi dan pirolisis tersebut akan membentuk CO₂ dan uap air (H₂O). Pembakaran sempurna akan membentuk gas CO₂ sedangkan pembakaran tidak sempurna akan membentuk gas CO. Proses ini akan berlanjut sampai temperatur mencapai antara 50-75° C. Devalotilisasi dan pirolisis akan membentuk gas CO, CO₂, SO, SO₂, H₂, H₂S, H₂O, dan metana. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah sebagai berikut:



Pembakaran Arang Batubara

Tahap pembakaran arang batubara membentuk tar, abu terbang yang berupa *fly ash*, *bottom ash*, dan gas CO, CO₂, SO, SO₂, H₂, H₂O, dan metana pada temperatur di atas 70° C. Reaksi pembakaran arang batubara tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:



Reaksi (4)-(13) merupakan proses pembentukan gas CO, CO₂, H₂S, dan metana dalam swabakar batubara. Reaksi (10) adalah Reaksi Boudouard (*boudouard reaction*), reaksi (11) adalah reaksi metanasi (*methanation reaction*), dan reaksi (12) adalah reaksi *shift reaction*.

Proses swabakar yang telah dijelaskan menunjukkan adanya kenaikan temperatur mulai dari proses pemanasan dan pengeringan, devolatilisasi dan pirolisis, dan pembakaran arang. Peningkatan temperatur tersebut jika tidak dikontrol dengan efisien dan efektif akan menyebabkan terbakarnya batubara di *temporary stockpile*. Swabakar batubara dapat ditangani secara preventif dan kuratif. Penanganan secara preventif lebih diutamakan dari pada penanganan secara kuratif. Pola temperatur yang terjadi pada swabakar batubara dari tahapan yang telah dijelaskan di atas menunjukkan bahwa pola kurva atau non linier dimana temperatur akan meningkat dan mencapai maksimum dan selanjutnya akan menurun kembali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Swabakar batubara terjadi ketika terdapat oksigen yang cukup pada batubara dengan reaksi berdasarkan pada temperatur atmosfer. Reaksi yang terjadi dalam kondisi adiabatik menyebabkan temperatur meningkat pada

temporary stockpile. Swabakar batubara terjadi pada temperatur yang tergantung pada peringkat batubara yang terbakar. Batubara peringkat rendah sering mengalami swabakar batubara karena mempunyai porositas yang lebih besar dari batubara peringkat tinggi [20]. Faktor-faktor penyebab terjadinya swabakar batubara sudah banyak diteliti oleh para ahli, yang meliputi rank, temperatur, laju alir, porositas batubara, kandungan air dan perubahannya, dan ukuran butir batubara. Faktor-faktor tersebut merupakan faktor utama terjadinya swabakar batubara di *stockpile*, *temporary stockpile*, *front* tambang [21].

Swabakar merupakan fenomena alami yang terjadi pada batubara yang disebut *self-combustion* atau *spontaneous combustion*. Swabakar batubara terjadi karena adanya tiga unsur, yaitu: bahan bakar, oksigen, dan panas. Ketiga unsur tersebut saling mempengaruhi satu sama lain menyebabkan terjadinya titik api (*hotspot*) [22]. Swabakar batubara dapat dicegah dengan menghilangkan atau mengurangi salah satu unsur tersebut terutama oksigen pada *stockpile*, *temporary stockpile*, dan *front* tambang dengan memadamkan tumpukan batubara atau menggunakan bahan kimia [23]. Oleh sebab itu, penelitian dan pengamatan mengenai hubungan temperatur swabakar dengan pembentukan emisi gas metana sangat diperlukan dalam rangka mencegah swabakar yang terjadi lebih intensif.

Uji Normalitas Data Temperatur Swabakar Terhadap Pembentukan Emisi Gas Metana

Proses pengambilan data dilakukan terhadap 46 sampel yang merupakan *hotspot* swabakar di *temporary stockpile* batubara yang sedang terjadi. Setelah sampel diperoleh maka dilakukan uji regresi dan normalitas sampel dengan menggunakan program aplikasi SPSS Versi 22.

Berikut ini adalah hasil dari uji regresi dan normalitas terhadap 46 sampel yang didapatkan (Tabel 1). Dari hasil uji normalitas data yang digunakan dapat dilakukan interpretasi dan pengambilan kesimpulan apakah data yang diuji layak digunakan sebagai data primer atau tidak. Sampel yang diambil dari lapangan menunjukkan terdistribusi normal dan dapat dilakukan untuk analisis lanjut.

Ukuran distribusi data yang ideal dapat diketahui apakah data terdistribusi dengan normal atau tidak, maka dilakukan penghitungan *kurtosis* dengan perhitungan *kurtosis/standar error of kurtosis*. Nilai *kurtosis* terhadap temperatur dan pembentukan emisi gas metana masing-masing sebesar -0,577 dan -0,326. Sedangkan nilai *standard error* untuk temperatur dan pembentukan emisi gas metana sebesar 0,688.

Kriteria yang digunakan untuk menunjukkan bahwa datayang digunakan terdistribusi normal atau tidak adalah dengan melihat bahwa hasil dari

kurtosis/standard error of kurtosis adalah antara -2 sampai 2 [24]. Data statistik temperatur swabakar dan pembentukan emisi gas metana adalah masing-masing sebesar -0,81 dan -0,47 yang membuktikan bahwa kedua uji statistik yang digunakan data terdistribusi normal berdasarkan *kurtosis*.

Tabel 1. Uji normalitas data temperatur swabakar dan emisi gas metana

Descriptives			Statistic	Std. Error
CH4	Mean		2,0883	,23699
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	1,6109	
		Upper Bound	2,5656	
	5% Trimmed Mean		2,0403	
	Median		1,6750	
	Variance		2,584	
	Std. Deviation		1,60737	
	Minimum		,01	
	Maximum		5,00	
	Range		4,99	
	Interquartile Range		2,05	
	Skewness		,811	,350
	Kurtosis		-,577	,688
Temperatur	Mean		204,1304	18,55111
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	166,7666	
		Upper Bound	241,4943	
	5% Trimmed Mean		196,0628	
	Median		184,0000	
	Variance		15830,605	
	Std. Deviation		125,81973	
	Minimum		59,00	
	Maximum		526,00	
	Range		467,00	
	Interquartile Range		192,25	
	Skewness		,770	,350
	Kurtosis		-,326	,688

Analisis Regresi Temperatur Swabakar Terhadap Pembentukan Emisi Gas Metana

Analisis regresi digunakan untuk mengukur besarnya pengaruh antara variabel tidak bebas dengan variabel bebas dan memprediksi variabel bebas dengan menggunakan variabel tidak bebas. Regresi menggunakan asumsi residual terdistribusi normal, tidak adanya hetero skedastisitas, dan tidak adanya autokorelasi pada model regresi [25].

Pengujian normalitas yang menunjukkan data terdistribusi normal, selanjutnya dilakukan analisis regresi yang bertujuan untuk mencari korelasi antara temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana menggunakan program aplikasi statistik SPSS Versi 22, didapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 2).

Hasil penghitungan statistik menunjukkan bahwa nilai R² yang terbesar berupa persamaan kuadrat yang merupakan nilai koefisien determinasi yang diubah kedalam bentuk persen yang menunjukkan persentase sumbangan pengaruh temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana. Nilai R² yang terbesar adalah pada persamaan kuadrat, sehingga persamaan yang digunakan untuk menentukan pengaruh temperatur

swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana adalah persamaan kuadrat (Tabel 2).

Tabel 2. Analisis regresi temperatur swabakar terhadap emisi gas metana

Dependent Variable: CH₄

Equation	Model Summary					Parameter Estimates		
	R Square	F	df ₁	df ₂	Sig.	Constant t	b ₁	b ₂
Linear	0,838	227,465	1	44	0,000	-0,299	0,012	-4.019E-6
Quadratic	0,839	112,447	2	43	0,000	-0,480	0,014	
Exponential	0,552	54,210	1	44	0,000	0,307	0,007	

The independent variable is temperature

Persamaan kuadrat yang terbentuk harus mempertimbangkan beberapa nilai yang perlu diperhatikan untuk menginterpretasi korelasi antara dua variabel tersebut. Tabel 2 menunjukkan nilai R dalam analisis regresi menunjukkan korelasi antara temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana. Nilai R yang didapat dari korelasi antara variabel temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana sebesar 0,916.

Nilai R yang diperoleh dari perhitungan menunjukkan kategori sangat tinggi dan dapat diandalkan ($0,9 < R \leq 1,00$) [26]. Korelasi antara temperatur swabakar dan pembentukan emisi gas metana tersebut berarti sangat kuat. *Adjusted R²* adalah nilai *R²* yang telah disesuaikan menunjukkan sumbangan pengaruh sangat besar antara temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana. Sedangkan *standard error of the estimate* menunjukkan ukuran kesalahan prediksi yang berarti nilai kesalahan dalam memprediksi pembentukan emisi gas metana adalah sebesar 0,659% (Tabel 3).

Tabel 3. Kesimpulan model statistik

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0,916	0,839	0,832	0,659

The independent variable is temperatur

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa pola kuadrat dalam swabakar batubara di *temporary stockpile* Unit Penambangan Banko Barat dimana peningkatan temperatur akan naik dan mencapai maksimum selanjutnya akan menurun yang berarti proses swabakar akan selesai.

Pemodelan dan Korelasi Antara Temperatur Swabakar Terhadap Pembentukan Emisi Gas Metana

Interpretasi terhadap analisis regresi antara temperatur terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar batubara di Unit Penambangan Banko Barat menunjukkan hubungan regresi kuadrat. Persamaan kuadrat antara temperatur terhadap pembentukan emisi

gas metana tersebut berdasarkan Tabel 3 dapat dituliskan sebagai berikut:

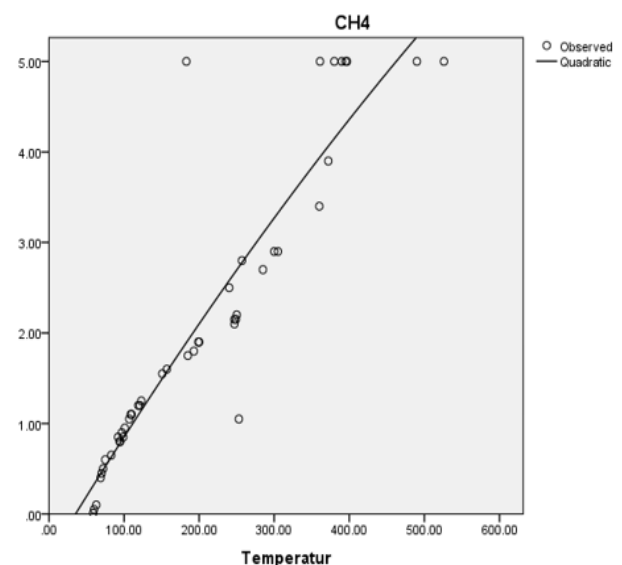
$$Y = -0,48 + 0,014X - (4,019 \times 10^{-6})X^2 \tag{14}$$

Persamaan merupakan persamaan regresi kuadrat. Kurva regresi kuadrat dimana swabakar akan mencapai maksimum pada kondisi turutan pertama persamaan (14) sama dengan nol ($dy/dx = 0$) yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$-(8,038 \times 10^{-6})X + 0,014 = 0 \tag{15}$$

Persamaan (15) terjadi pada kondisi maksimum dimana temperatur dapat mencapai 1.742° C dan pembentukan emisi gas metana mencapai 117.120 ppm. Jika tidak dilakukan antisipasi terdapat swabakar batubara di *temporary stockpile* Unit Penambangan Banko Barat secara cepat maka akan menghasilkan swabakar maksimum dimana akan menyebabkan kerugian ekonomi, sosial, dan lingkungan bagi perusahaan tambang tersebut.

Gambar 2 menunjukkan bahwa pada temperatur di bawah 40° C belum terjadi emisi gas metana karena masih dalam proses pemanasan dan pengeringan yang terjadi uap air (H₂O) dan kondisi di lapangan ditunjukkan oleh adanya asap yang keluar pada *hotspot*. *Self heating* pada kondisi devolatilisasi terjadi membentuk emisi gas CO, CO₂, H₂S, dan metana pada temperatur 40-70° C dan ditandai dengan asap yang keluar lebih intensif. Emisi gas metana terjadi pada saat kondisi temperatur tersebut dimana pada saat *hotspot* terjadi pada temperatur tersebut, emisi gas metana terjadi sebesar 500 ppm.



Gambar 2. Kurva korelasi temperatur swabakar terhadap pembentukan emisi gas metana

Pembakaran batubara terutama pembakaran arang terjadi pada temperatur di atas 70° C mengalami nilai tertinggi yang terlihat adanya api yang membakar batubara, yaitu sebesar 50.000 ppm. Pada temperatur di atas 500° C, emisi gas metana akan selalu berada pada nilai 50.000 ppm sampai menuju titik nol setelah berakhirnya swabakar batubara. Kondisi di lapangan menunjukkan kondisi swabakar maksimum terjadi pada temperatur 1.742° C yang membentuk emisi gas metana sebesar 117.120 ppm. Peralatan *multigas detector* tidak akan mampu mendeteksi emisi gas metana sebesar 117.120 ppm karena batas pembacaan peralatan tersebut hanya 50.000 ppm.

Gambar 2 sesuai dengan yang diprediksi oleh peneliti terdahulu dimana kurva hasil analisis menunjukkan pola yang sama dengan kurva yang dihasilkan dari penelitian ini yaitu kurva kuadratik [27]. Gambar 2 menunjukkan juga proses swabakar batubara yang terjadi di *temporary stockpile* Banko Barat dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Pemanasan dan pengeringan yang terjadi temperatur antara 0 - 40° C terbentuknya uap air (H₂O) terjadi asap pada *hotspot*;
- Self heating* atau proses devolatilisasi dan pirolisis terjadi pada temperatur antara 40 - 70° C sekaligus terbentuknya gas CO, CO₂, SO, SO₂, H₂S, dan metana juga ditandai oleh terjadinya asap yang tebal pada *hotspot*;
- Pembakaran arang batubara pada temperatur di atas 70° C sekaligus terbentuknya gas CO, CO₂, SO, SO₂, H₂S, dan metana juga ditandai oleh terjadinya kebakaran (swabakar batubara) pada *hotspot*.

Kondisi di atas menunjukkan karakteristik swabakar batubara terjadi peningkatan temperatur yang semakin tinggi. Peningkatan temperatur yang semakin tinggi akan mencapai temperatur maksimum jika dibiarkan yang menyebabkan kualitas dan kuantitas batubara menurun dan pembentukan emisi gas metana akan semakin intensif terpapar ke atmosfer bumi. Oleh karena itu, perlu usaha yang intensif untuk menanggulangi swabakar batubara tersebut.

Proses atau tahapan swabakar batubara yang terjadi di Unit Penambangan Banko Barat mulai dari pemanasan dan pengeringan batubara, *self heating*, pembakaran air terjadi lebih dari tiga bulan setelah terjadinya penumpukan batubara sampai pembakaran arang. Usaha penanggulangan swabakar batubara dapat dilakukan dengan cara preventif dan kuratif. Penanggulangan dengan cara preventif dilakukan agar swabakar tidak terjadi dengan cara sebagai berikut [28]:

- Usahakan bahwa batubara jangan sampai terpapar di dalam *stockpile* menggunakan metode FIFO (*first in first out*);
- Semua batubara di *temporary stockpile* dipantau terus menerus setiap 6 jam sekali. Pemantauan

terutama untuk melakukan observasi di *temporary stockpile* apakah ada asap dan *self heating*;

- Melakukan penyiraman setiap hari untuk menghindari pemanasan dan *self heating*;
- Menghambat laju peningkatan temperatur dengan mengamati temperatur pada *stockpile* setiap 6 jam sekali;
- Pengaturan geometri tumpukan batubara agar batubara tidak mudah mengalami swabakar;
- Menentukan lokasi yang tepat agar pengaruh angin dapat dikurangi.

Penanggulangan dengan cara preventif pada dasarnya menurunkan temperatur swabakar dengan cara pemantauan dan tindakan yang tepat agar terjadinya swabakar dapat dihindari sedini mungkin.

Penganggulangan dengan cara kuratif dilakukan jika swabakar batubara telah terjadi di *temporary stockpile*. Langkah-langkah yang dilakukan dengan cara kuratif tersebut adalah sebagai berikut:

- Pembongkaran dan pemadatan batubara menggunakan *backhoe* dan/atau *buldozer*;
- Injeksi zat kimia pada swabakar batubara di *temporary stockpile*.

Penanggulangan menggunakan cara preventif akan lebih efisien dan efektif karena dapat mengurangi biaya penanganan swabakar sedangkan menggunakan cara kuratif tidak efisien dan efektif yang membutuhkan biaya dan sumber daya manusia besar.

KESIMPULAN

Temperatur memiliki pengaruh krusial terhadap pembentukan emisi gas metana pada swabakar batubara. Semakin tinggi temperatur pada swabakar batubara, maka semakin tinggi emisi gas metana yang terjadi sampai mencapai titik maksimum dan selanjutnya akan menurun sesuai dengan tahapan swabakar. Pemodelan regresi antara temperatur terhadap pembentukan emisi gas metana menunjukkan hubungan yang kuat berupa regresi kuadrat dengan persamaan yang terjadi sebagai berikut: $Y = -0,48 + 0,014 X + (-4,019 \times 10^{-6}) X^2$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa temperatur swabakar yang terjadi di *temporary stockpile* Unit Penambangan Banko Barat mencapai titik maksimum dengan persamaan sebagai berikut: $-(8,038 \times 10^{-6}) X + 0,014 = 0$ dimana temperatur mencapai 1.742° C dan pembentukan emisi mencapai 117.120 ppm yang menyebabkan kerugian ekonomi, sosial, dan lingkungan. Penanggulangan swabakar batubara sebaiknya dilakukan secara preventif agar tidak mencapai kondisi yang maksimum tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Wang, H., Chen, C., (2015). Experimental Study on Greenhouse Gas Emissions Caused by



- Spontaneous Coal Combustion, *Energy Fuels*, 29, 5213-5221.
- [2] Yusuf, M., Ibrahim, E., Saleh, E., Ridho, MR., Iskandar, I., (2016). The Relationship between the Decline of Oxygen and the Increase of Methane Gas (CH₄) Emissions on the Environment Health of the Plant, *International Journal of Collaborative Research on Internal Medicine & Public Health*, 8(7), 457-464.
- [3] Hidayat, S., Iskandar, T., Ludiantoro, FF., Wijayaningtyas, M., (2019). Heavy Equipment Efficiency, Productivity And Compatibility Of Coal Mine Overburden Work In East Kalimantan, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 10(06), 194-202.
- [4] Haeyang, P., Toshiya, T., Naoki, K., Takuo, S., Toru, H., Seiichi, Y., (2015). Evaluation of Spontaneous Combustion in Stockpile of Sub-bituminous Coal, *Kobelco Technology Review*, 33, 21-27.
- [5] Wan-xing, R., Zeng-hui, K., De-ming, W., (2011). Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in The Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam, *Procedia Engineering*, 26, 717-724.
- [6] Thabari, JA., Auzani, AS., Nirbito, W., Muharam, Y., Nugroho, YS., (2022). Modeling of Coal Spontaneous Fire in A Large-Scale Stockpile, *International Journal of Technology*, 14(2), 257-266.
- [7] Yenni, FR., Heri Prabowo, H., (2021). Management Pengendalian Kualitas Batubara Berdasarkan Parameter Kualitas Batubara Mulai Dari Front Sampai Ke Stockpile Di PT. Budi Gema Gempita, Merapi Timur, Lahat, Sumatera Selatan, *Jurnal Bina Tambang*, 6(1), 110-120.
- [8] Zakwan, H., Prabowo, H., (2021). Pengendalian Kualitas Batubara Seam 300 Berdasarkan Parameter Kualitas Batubara dari Front Sampai ke Buyer Di PT Kuansing Inti Makmur, Job Site Tanjung Belit, Bungo, Jambi, *Jurnal Bina Tambang*, 6(5), 68-76.
- [9] Wang, F., Ji, Z., Wang, H., Chen, Y., Wang, T., Tao, R., Su, C., Niu, G., 2023. Analysis of the Current Status and Hot Technologies of Coal Spontaneous Combustion Warning, *Processes*, 11(2480), 1-17.
- [10] Szurgacz, D., Tutak, M., Brodny, J., Sobik, L., Zhironkina, O., 2020. The Method of Combating Coal Spontaneous Combustion Hazard in Goafs - A Case Study, *Energies*, 13(4538), 1-22.
- [11] Yusuf, M., (2023). The Role of Organic Sulfur in the Formation of Methane Emissions on the Spontaneous Combustion of Coal, *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 192-201.
- [12] Muthukumar, K., Amirtham, K., Sundaramahalingam, A., (2023). Study on spontaneous combustion and environmental pollution in a coal storage yard, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1125, 012001.
- [13] Bhatta, A., Priyadarshinia, S., Aiswarya Acharath Mohanakrishnana, AA., Abria, A., Sattlera, M., Techapaphawit, S., (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263.
- [14] Arisanti, R., Yusuf, M., Faisal, M., (2017). Study of The Effect of Coal Quality Parameters on Gas Methane (CH₄) Emission in Coal Fire for Sustainable Environment, *Indones. J. Env. Man. Sus.*, 1(1), 19-22.
- [15] Arisanti, R., Yusuf, M., Faisal, M., (2018). Study of the Effect of Proximate, Ultimate, and Calorific Value Analysis on Methane Gas Emission (CH₄) on Combustion of Coal for Sustainable Environment, *Science and Technology Indonesia*, 3, 100-106.
- [16] Xincheng Hu, X., Yu, Z., Cai, J., Jiang, X., Peng Li, P., Yang, S., (2022). The influence of methane on the development of free radical during low-temperature oxidation of coal in gob, *Fuel*, 330, 125369.
- [17] Quraisy, A., (2020). Normalitas Data Menggunakan Uji Kolmogorov-Smirnov dan Saphiro-Wilk (Studi kasus penghasilan orang tua mahasiswa Prodi Pendidikan Matematika Unismuh Makassar), *J-HEST: Journal of Health, Education, Economics, Science, and Technology*, 3(1), 7-11.
- [18] Khamis, H., (2008). Measures of Association How to Choose?, *Journal Of Diagnostic Medical Sonography*, 24(3), 155-162.
- [19] He, X., Huo, Y., Wang, W., (2021). Study on the Formation Mechanism of the Pyrolysis Products of Lignite at Different Temperatures Based on ReaxFF-MD, *ACS Omega*, 6, 35572-35583.
- [20] Onifade, M., Genc, B., A review of research on spontaneous combustion of coal, *International Journal of Mining Science and Technology*, 30, 303-311.
- [21] Nalbandian, H., (2010). Propensity of coal to self-heat, IEA Clean Coal Centre.
- [22] Liang, Y., Yang, Y., Guo, S., Tian, F., Wang, S., (2023). Combustion mechanism and control approaches of underground coal fires: a review, *International Journal of Coal Science & Technology*, 10(24), 1-25.
- [23] Bunga., Nugroho, W., Trides, T., Sakdillah., Magdalena, H., (2022). Studi Pencegahan Swabakar (Self Combustion) pada Stockpile di PT Baramulti Sukses Sarana, *Jurnal*



Teknologi Mineral FT UNMUL, 1091), 38-42.

- [24] Wright, DB., Herrington, JA., (2011). Problematic standard errors and confidence intervals for skewness and kurtosis, *Behav Res*, 43, 8-17.
- [25] Wasiaturrahma., Rohmawati, H., (2021). Analysis of International Tourism Demand in Indonesia: An Ordinary Least Square (OLS) Approach, *Journal of Economic Education*, 10(2), 158-172.
- [26] Chicco, D., Warrens, MJ., Jurman, G., (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, *PeerJ Comput Sci.* 7(e623), 1-24.
- [27] Shan, W., Xu, Z., Guo, Y., Zhang, C., Hu, Z., Wang, Y., (2020). Geological methane emissions and wildfire risk in the degraded permafrost area of the Xiao Xing'an Mountains, China, *Nature Research*, 10(21297), 1-20.
- [28] Wicaksono, RPS., Fathia, SH, Kolang, IF., Riadi, A., Nirbito, W., Muharam, Y., Nugroho, YS., (2019). Effect of The Heat Transfer Surface on Prevention of Spontaneous Combustion of Coal, *International Journal of Technology*, 10(6), 1220-1227.