

**ESTIMASI NILAI *UNIT-COST* PENAMBANGAN ASBUTON
MENGUNAKAN PENDEKATAN STATISTIKA*****ASBUTON MINING COST ESTIMATION
USING STATISTICAL APPROACH***F. R. Arrahman^{1*}, A. Ardian²^{1,2}Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta^{1,2}Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesiae-mail: *112220165@student.upnyk.ac.id**ABSTRAK**

Pembangunan infrastruktur di Indonesia membutuhkan ketersediaan aspal yang tinggi, tapi pasokan nasional masih sangat bergantung pada impor meskipun terdapat potensi besar asbuton di Provinsi Sulawesi Tenggara. Salah satu tantangan utama pemanfaatan asbuton adalah biaya penambangan yang relatif lebih tinggi dibanding aspal minyak impor. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi *unit-cost* penambangan asbuton sekaligus mengevaluasi pengaruh dari kapasitas produksi (X_1) dan *stripping ratio* (X_2) menggunakan pendekatan statistika. Data dikumpulkan dari tujuh perusahaan tambang asbuton pada tahun 2024 yang mencakup volume *overburden*, jumlah produksi, Harga Pokok Penjualan (HPP), royalti, dan jumlah beban operasi. Selanjutnya, dilakukan analisis data dengan menerapkan metode regresi linier berganda yang telah divalidasi melalui uji asumsi klasik. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa secara parsial maupun simultan, variabel kapasitas produksi dan *stripping ratio* berpengaruh signifikan terhadap *unit-cost*. Hal tersebut dibuktikan dengan tingkat signifikansi pada Uji-t dan Uji-F tidak melebihi angka 0,05. Selain itu, dengan nilai *Adjusted R2* sebesar 0,735 dan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) sebesar 50,728, menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang memadai. Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh estimasi *unit-Cost* penambangan Asbuton dengan persamaan $Y = -64.182,587 + 1,074(X_1) + 123.008,571(X_2)$.

Kata kunci: asbuton, *unit-cost*, kapasitas produksi, *stripping ratio*, regresi linear berganda

ABSTRACT

*Infrastructure development in Indonesia demands high asphalt availability, yet the national supply remains heavily reliant on imports despite the vast potential of Asbuton in Southeast Sulawesi. One of the main challenges in asbuton utilization is the relatively higher mining cost compared to imported petroleum asphalt. This research aims to estimate the asbuton mining unit-cost and evaluate the influence of production capacity (X_1) and stripping ratio (X_2) using a statistical approach. Data were collected from seven Asbuton mining companies in 2024, comprising overburden volume, production volume, Cost of Goods Sold (COGS), royalties, and total operating expenses. The data were analyzed using multiple linear regression validated through classical assumption tests. The modeling results indicate that both partially and simultaneously, Production capacity and stripping ratio variables significantly affect the unit-cost. This is evidenced by the significance levels in the t-test and F-test, which do not exceed 0.05. Furthermore, the Adjusted R^2 value of 0.735 and RMSE (*Root Mean Square Error*) value of 50.728 demonstrate that the model possesses adequate accuracy. Based on this research, the Asbuton mining unit-cost estimation is represented by the equation $Y = -64.182,587 + 1,074(X_1) + 123.008,571(X_2)$.*

Keywords: asbuton, *unit-cost*, production capacity, *stripping ratio*, multiple linear regression

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu pilar fundamental dalam pembangunan ekonomi Indonesia. Data yang didapatkan dari Kementerian Pekerjaan Umum (KemenPU) pada Semester II Tahun 2024 menunjukkan bahwa Indonesia memiliki dan mengelola jalan yang sangat masif. Indonesia memiliki total panjang jalan kabupaten/kota mencapai 431.117 km (80,7%), jalan provinsi sepanjang 52.382 km (9,8%), jalan nasional non-tol sepanjang 47.604 km (8,9%), dan jalan nasional tol sepanjang 3.111 km (0,6%) dari total jaringan jalan nasional [1].

Pada konstruksi jalan, aspal atau bitumen sangat krusial sebagai bahan pengikat atau *binder* utama. Estimasi kebutuhan aspal untuk pembuatan dan pemeliharaan jaringan jalan tersebut memiliki rata-rata 1.060.000 ton pada tahun 2016–2021 dan 1.132.700 ton pada tahun 2024 [1]. Angka tersebut menunjukkan tingginya permintaan terhadap aspal. Berdasarkan KemenPU, produksi aspal minyak dari kilang Pertamina Cilacap menyuplai sebesar 200.000 ton per tahun atau 17,7% dari total kebutuhan. Sisanya berasal dari impor aspal yang mencapai 917.000 ton per tahun atau 81%.

Sementara itu, kontribusi asbuton dalam menyuplai kebutuhan aspal nasional hanya sebesar 15.700 ton per tahun atau hanya 1,4% [1]. Padahal Pulau Buton, Sulawesi Tenggara memiliki sumber daya sebesar 663 juta ton hingga 792,5 juta ton, dengan cadangan terbukti yang siap dieksploitasi mencapai 182,65 juta ton [1,2]. Secara teori, cadangan ini dapat memenuhi kebutuhan aspal nasional selama lebih dari 100 tahun tanpa memerlukan impor. Oleh karena itu, pemanfaatan asbuton memiliki potensi ekonomi, seperti menjaga devisa, mengurangi neraca impor, mengurangi pengangguran, dan menggerakkan ekonomi lokal.

Di lain sisi, penambangan asbuton di Indonesia maupun di luar negeri masih belum populer dibandingkan aspal minyak. Hal tersebut dikarenakan tantangan dalam proses ekstraksi bitumen dari asbuton yang lebih rumit dan memerlukan biaya produksi yang lebih tinggi. Selain itu, ketidakmerataan fasilitas untuk proses pencampuran aspal (*hot mixing plant*) yang cocok untuk asbuton menjadi salah satu faktornya [3].

Rendahnya tingkat popularitas tersebut menambah risiko penambangan asbuton, khususnya risiko finansial. Adanya risiko finansial dikarenakan kekurangan operasi penambangan yang sejenis seperti jenis deposit, teknologi dan peralatan yang digunakan, dan kondisi geologi sebagai pembanding (*benchmark*). Ketiadaan pembanding yang valid menyebabkan ketidakpastian dalam mengestimasi biaya penambangan, sehingga menyebabkan risiko finansial [4,5]. Salah satu komponen dalam risiko finansial adalah risiko modal yang bengkok, risiko harga komoditas, dan risiko biaya

penambangan. Karena belum banyak literatur maupun referensi tentang biaya penambangan asbuton, maka penelitian ini akan fokus pada estimasi biaya penambangan asbuton.

Estimasi biaya penambangan dapat dilakukan dengan empat pendekatan, yaitu *statistical approach*, *itemized approach*, *comparative approach*, dan *online approach* [6]. O'Hara (1980) dan Shafiee dan Topal (2012) telah melakukan estimasi biaya penambangan secara statistika untuk mineral dan batubara, secara berurutan. O'Hara (1980) dan Shafiee (2012) memiliki persamaan dalam memodelkan biaya penambangan, yaitu menggunakan variabel nilai *unit-cost* (biaya penambangan per ton) sebagai variabel terikatnya (*dependent variable*). Sedangkan, variabel bebasnya (*independent variable*) bervariasi dari nilai produksi, tipe topografi, sistem penambangan (terbuka dan bawah tanah), jumlah pegawai, ketebalan rata-rata deposit, *stripping ratio* (SR), dan lain-lain.

O'Hara (1980) melakukan estimasi biaya modal (CAPEX) dan biaya operasional (OPEX) penambangan mineral pada dua sistem penambangan, yaitu terbuka dan bawah tanah. Penelitian menggunakan analisis statistika berdasarkan basis data historis dari proyek pertambangan di beberapa negara. Variabel bebas utama yang digunakan yaitu laju tonase harian dengan faktor penentu lainnya. Faktor penentu pada tambang terbuka berupa SR, topografi dan kondisi lahan, dan jarak angkut. Sedangkan faktor penentu pada tambang bawah tanah berupa bentuk dan kemiringan badan bijih, *stope width*, kondisi batuan, dan kedalaman untuk pengangkutan. Penelitian tersebut menghasilkan sekumpulan rumus empiris dan grafik untuk mengestimasi biaya pertambangan dari awal kegiatan penambangan (*land clearing*) hingga pengolahan. Selain itu, O'Hara mengestimasi pendapatan yang didapat dari kegiatan penambangan dan kebutuhan pekerja [7]. Pada penelitian tersebut, tidak dilakukan uji asumsi klasik maupun uji hipotesis untuk menunjukkan validitas hubungan antar variabel. Analisis dilakukan dengan kategorisasi perbedaan keadaan terhadap faktor penentu yang ada dengan bobot tertentu sehingga dapat disimpulkan penelitian tersebut menggunakan pendekatan empiris.

Lalu, Shafiee dan Topal (2012) mengestimasi nilai *unit-cost* penambangan batubara. Pada penelitian tersebut, estimasi dilakukan dengan menggunakan model regresi linear berganda berdasarkan basis data dari InfoMine dan R2Mining. Nilai *unit-cost* penambangan batubara diestimasi menggunakan variabel rata-rata ketebalan deposit, SR, biaya modal, dan kapasitas produksi harian. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa rata-rata ketebalan deposit dan SR memiliki hubungan positif terhadap *unit-cost*. Sedangkan kapasitas produksi harian memiliki hubungan negatif [8]. Namun, dalam penelitian tersebut belum diterapkan

pengujian asumsi klasik, contohnya uji homoskedastisitas, uji normalitas, uji multikolinearitas, dan uji linearitas.

Selain itu, terdapat penelitian lain yang juga menggunakan pendekatan statistik untuk mengestimasi biaya penambangan, yaitu Camm (1994) dan Mohutsiwa dan Musingwini (2015). Camm mengestimasi CAPEX dan OPEX untuk penambangan mineral (terbuka dan bawah tanah) serta pengolahannya menggunakan regresi pangkat. Variabel bebas utama yang digunakan merupakan kapasitas produksi harian. Selanjutnya, dilakukan penyesuaian dengan beberapa faktor fisik seperti jarak angkut dan kedalaman. Dari penelitian tersebut, Camm menghasilkan beberapa persamaan regresi dengan dua skala penambangan yang berbeda pada tambang terbuka (skala kecil dan besar) dan berbagai metode pada tambang bawah tanah (*block caving*, *cut and fill*, *shrinkage stoping* dan lainnya). Selain itu, dihasilkan persamaan regresi untuk pabrik pengolahan dan infrastuktur tambang [9]. Sementara itu, Mohutsiwa dan Musingwini mengestimasi CAPEX pada penambangan batubara (terbuka dan bawah tanah) menggunakan regresi linear berganda dengan kapasitas produksi, umur tambang, dan SR sebagai variabel bebas. Hasil dari penelitian tersebut berupa persamaan regresi pada tambang terbuka dengan menggunakan metode *dragline* dan *truck and shovel* serta tambang bawah tanah menggunakan metode *bord and pillar* dengan rentang akurasi -30% sampai +50% [10]. Kedua penelitian tersebut juga tidak menerapkan uji asumsi klasik.

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan nilai *unit-cost* penambangan asbuton menggunakan pendekatan statistika, di mana SR dan kapasitas produksi harian menjadi variabel bebasnya. Selain itu, penelitian ini juga melakukan pengujian asumsi klasik serta uji hipotesis. Batasan yang diberikan pada penelitian ini yaitu hanya terdapat delapan perusahaan penambangan asbuton di Sulawesi Tenggara pada tahun 2024.

METODOLOGI PENELITIAN

Rangkaian kegiatan penelitian diawali melalui kajian pustaka, identifikasi variabel, pengumpulan dan pengolahan data. Tahap berikutnya dilaksanakan kegiatan yang mencakup uji asumsi klasik, analisis data, dan perhitungan akurasi model.

Kajian Pustaka

Kajian pustaka dilakukan dengan identifikasi kata kunci yang sesuai, seperti pendekatan *unit-cost*, metode statistika pada tambang terbuka, variabel yang mempengaruhi *unit-cost*, uji asumsi klasik, uji hipotesis, dan analisis dengan metode regresi linier. Referensi akademik yang meliputi artikel jurnal, laporan riset, maupun literatur relevan lainnya yang diakses melalui

basis data akademik. Setelah itu, dilakukan analisis literatur dengan cara melakukan perbandingan antar sumber pustaka untuk menemukan kesamaan, perbedaan, kekurangan, dan celah penelitian (*research gap*). Seluruh informasi yang terkumpul digunakan untuk menyusun dasar teori penelitian. Dengan begitu, studi literatur tidak hanya membantu dalam memahami konsep, tetapi juga membuat penelitian lebih valid karena setiap hasilnya didukung oleh referensi ilmiah yang terpercaya.

Identifikasi Variabel Penelitian

Berdasarkan tinjauan literatur, variabel-variabel penelitian yang digunakan untuk mengestimasi nilai *unit-cost* terdiri atas:

1. Variabel Terikat (Y)

Unit-cost (Rp/ton) yaitu biaya penambangan yang digunakan untuk mendapatkan satu ton komoditas (asbuton). Biaya penambangan merupakan akumulasi dari HPP, jumlah beban operasi, dan royalti.

2. Variabel Bebas (X)

- Kapasitas produksi (X1), yaitu jumlah produksi asbuton yang dihasilkan dalam jangka waktu satu tahun (Ton/Tahun).
- Stripping Ratio (X2), yaitu jumlah *overburden* yang dikupas dalam satuan BCM untuk mendapatkan satu ton asbuton.

Digunakannya kapasitas produksi dan *Stripping Ratio* (SR) sebagai variabel bebas didasarkan pada studi terdahulu yang mengidentifikasi kedua variabel tersebut sebagai penentu utama biaya penambangan. Kapasitas produksi dan SR terbukti mempengaruhi biaya sesuai penelitian O'hara (1980), Camm (1994), Shafiee dan Topal (2012) dan Mohutsiwa dan Musingwini (2015). Kapasitas produksi merepresentasikan *economies of scale*, sedangkan SR merepresentasikan karakteristik deposit yang berkorelasi langsung dengan biaya operasional.

Pengumpulan dan Pengolahan Data Penelitian

Data penelitian menggunakan data sekunder dari delapan perusahaan tambang asbuton di Sulawesi Tenggara yang berasal dari Kementerian ESDM. Data untuk penelitian tersebut yaitu *overburden* (BCM), produksi asbuton (ton), HPP (harga pokok produksi) (Rp), jumlah beban operasi (Rp), dan royalti (Rp) pada delapan perusahaan di tahun 2024. Selanjutnya, data tersebut diolah dengan mengubah *overburden* dan produksi menjadi SR. Selain itu, menjumlahkan HPP, jumlah beban operasi dan royalti yang selanjutnya dibagi dengan produksi menjadi *unit-cost* tiap perusahaan.

Data-data perusahaan tersebut dilakukan filterasi dan *screening* untuk menentukan data yang layak digunakan. Dari delapan perusahaan, hanya digunakan tujuh perusahaan saja karena satu perusahaan tidak

memiliki data produksi. Lebih lanjut, uji asumsi klasik dilakukan pada data-data dari tujuh perusahaan tersebut untuk menilai kelayakan dan kecukupan data untuk analisis lanjutan (regresi linear berganda).

Uji Asumsi Klasik

Pada studi ini, diterapkan empat pengujian asumsi klasik. Detail masing-masing pengujian asumsi klasik dijabarkan sebagai berikut:

1. Uji Normalitas

Pengujian ini berfungsi memvalidasi normalitas data. Normalitas data dapat diketahui dengan dua cara, yaitu dengan analisis visual (grafik) serta perhitungan statistik. Metode yang digunakan dalam uji Normalitas dengan statistika adalah Shapiro-Wilk (SW). Hal tersebut dikarenakan uji Shapiro-Wilk dirancang untuk mengatasi sampel kecil (<50). Selain itu, metode SW memiliki keunggulan dibandingkan metode lain seperti Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, dan Anderson-Darling. Keunggulan yang dimiliki metode SW yaitu lebih kuatnya metode tersebut dalam mendeteksi ketidaknormalan data. Suatu data residual dinyatakan berdistribusi normal jika angka signifikansi $>0,05$ [11, 12].

2. Uji Homoskedastisitas

Pengujian ini merupakan suatu prosedur untuk memastikan variasi dari *error term* (residual) bersifat konstan terlepas dari nilai variabel bebas dalam model. Uji homoskedastisitas dimaksudkan untuk mengevaluasi distribusi probabilitas dari residual. Pengujian dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu metode formal dengan uji Glejser dan metode informal dengan grafik *scatterplot*. Model dikatakan homoskedastik jika data residualnya menunjukkan distribusi normal, atau jika nilai signifikansinya berada di atas 0,05. Pada metode grafik, model dikatakan homoskedastik apabila pola penyebaran titik yang acak dan tidak sistematis [13, 14].

3. Uji Multikolinearitas

Merupakan suatu pengujian yang bertujuan untuk mendeteksi potensi korelasi di antara variabel-variabel bebas yang ada. Kualitas model regresi dianggap optimal apabila model tersebut tidak terdapat masalah multikolinearitas, yaitu dengan tidak adanya korelasi pada variabel-variabel bebas yang digunakan [15]. Multikolinieritas dideteksi dengan mengobservasi nilai VIF (*Variance Inflation Factor*) pada tiap variabel bebas. Ketika angka VIF yang didapat di bawah 10, maka data tersebut bebas dari indikasi multikolinearitas [11].

4. Uji Linearitas

Uji Linearitas dimanfaatkan untuk mengukur derajat linearitas model yang signifikan antar variabel terikat dan bebas. Uji tersebut merupakan syarat untuk dilakukannya analisis regresi linear. Hal tersebut dikarenakan model regresi memprediksi nilai variabel terikat berdasarkan garis lurus yang dibentuk oleh variabel bebas. Apabila dilanggar, maka persamaan yang terbentuk bias dan tidak akuratnya model [Hair,

2019]. Analisis hasil pengujian dilakukan dengan membandingkan komponen linearitas dan penyimpangan dari Linearitas (*deviation from linearity*). Sebuah variabel dianggap memenuhi asumsi linearitas jika nilai signifikansi pada *deviation from linearity* lebih dari 0,05 [11,15].

Analisis Data

Metode analisis yang akan diterapkan dalam penelitian ini yaitu regresi linier berganda. Metode ini bertujuan mendapatkan pemetaan dari interaksi atau korelasi antara variabel bebas dan variabel terikat dengan menyeluruh. Hubungan tersebut baik simultan maupun parsial. Sebelum dilakukannya uji regresi linier berganda, diharuskan untuk melakukan uji asumsi klasik sebelumnya. Pemenuhan syarat uji asumsi klasik tersebut bertujuan agar variabel bebas sebagai estimator atas variabel terikat tidak bias [11].

Uji Hipotesis

Hipotesis didefinisikan sebagai suatu jawaban sementara atas pertanyaan penelitian yang diajukan. Oleh sebab itu, pengujian hipotesis adalah suatu kegiatan dengan tujuan melakukan pemeriksaan, pembersihan, pengubahan, dan juga pembuatan permodalan data. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan informasi yang digunakan sebagai petunjuk bagi peneliti dalam melakukan pengambilan keputusan pada pertanyaan-pertanyaan penelitian [16].

Penelitian ini melakukan penerapan analisis regresi linier berganda sebagai metode utama pengujian hipotesis. Pendekatan dilakukan untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh variabel bebas (X), yaitu kapasitas produksi dan SR terhadap variabel terikat (Y), yaitu *unit-cost* penambangan. Adapun model matematis yang dibangun dalam model ini direpresentasikan sebagai berikut:

$$y = a + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

dimana y adalah variabel terikat, a adalah variabel konstanta, β adalah koefisien regresi, x adalah variabel bebas, ε melambangkan *error term*, dan n merupakan total variabel dependen.

Setelah itu dilanjutkan dengan validasi model statistik dengan susunan pengujian yang mencakup uji koefisien determinasi (R^2), uji parsial (uji-t), serta uji simultan (uji-F). Uji koefisien determinasi (R^2) dilakukan dengan menilai kompetensi model yang terbentuk dalam menjelaskan variansi variabel terikat. Koefisien determinasi memiliki rentang nilai antara nol dan satu. Apabila angka R^2 yang didapat rendah, mengindikasikan bahwa variabel bebas memiliki keterbatasan signifikan dalam menjelaskan variasi yang terjadi pada variabel terikat. Lalu, apabila skor mendekati angka satu, menandakan variabel bebas

mampu menjelaskan sebagian besar variabilitas pada variabel terikat [11].

Uji-t atau uji parsial memiliki tujuan untuk melakukan evaluasi seberapa signifikan dampak variabel bebas (X) terhadap variabel terikat (Y) secara individual atau parsial. Pengujian parsial yang dilakukan memakai batas tingkat keyakinan sebesar 0,95 atau taraf signifikansi 0,05 ($\alpha = 5\%$) [11]. Selain itu, apabila t hitung melampaui atau setara dengan t tabel, maka dapat disimpulkan bahwa variabel bebas memberikan pengaruh nyata.

Uji-F atau uji simultan merupakan suatu kegiatan untuk mengetahui pengaruh secara simultan yang diberikan variabel bebas terhadap variabel terikat [11]. Pengujian ini juga memakai batas keyakinan sebesar 0,95. Selain itu, jika f hitung melampaui atau sama dengan f tabel, maka variabel bebas berpengaruh.

Perhitungan Akurasi Model

Untuk menghitung akurasi dari model regresi yang dihasilkan menggunakan RMSE. RMSE merupakan suatu penilaian kuadrat yang sekaligus menghitung *mean* dari kesalahan. RMSE merupakan nilai akar kuadrat dari perbedaan kuadrat rata-rata dari data aktual dengan data prediksi yang dihasilkan. Rumus dari RMSE yang digunakan ditunjukkan pada Pers. (2):

$$RMSE = \left(\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

dimana RMSE merupakan nilai dari *root mean square error*, y_i merupakan data aktual dari fakta lapangan, $\hat{y}_i$ merupakan angka dari estimasi yang dihasilkan, i merupakan rangkaian dari suatu data pada basis data, dan n merupakan total banyaknya sampel data [17].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data berasal dari delapan perusahaan tambang asbuton yang terdiri atas *overburden* (BCM), produksi asbuton (ton), HPP (harga pokok produksi) (Rp), jumlah beban operasi (Rp), dan royalti (Rp). Selanjutnya, data diolah menjadi variabel yang digunakan yaitu *unit-cost* (Rp/ton) sebagai variabel terikat (Y), produksi (ton) serta SR sebagai variabel bebas (secara berurutan X1 dan X2). Satu perusahaan tidak memiliki data produksi yang tidak lengkap sehingga data hanya mencakup tujuh perusahaan. Data perusahaan yang akan digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 memperlihatkan data variabel penelitian pada tujuh perusahaan tambang asbuton. Rata-rata *unit-cost* aktual yang didapat sebesar Rp197.150 dan rentang *unit-cost* sebesar Rp380.369. Selanjutnya, data yang diperoleh akan dilanjutkan dengan uji asumsi klasik.

Tabel 1. Variabel Penelitian

No	Nama Perusahaan	Unit-Cost (Rp/ton) Y	Produksi (Ton) X1	SR X2
1	ABC	140.252	150.000	0,2
2	DEF	126.017	25.000	0,7
3	GHI	128.284	228.000	0,2
4	JKL	438.340	400.000	0,2
5	MNO	184.223	200.000	0,3
6	PQR	57.970	100.000	0,6
7	STU	304.964	5.000	3,0

Uji Asumsi Klasik

Uji asumsi klasik yang dilakukan terdiri atas uji normalitas, uji homoskedastisitas, uji multikolinearitas, uji linearitas.

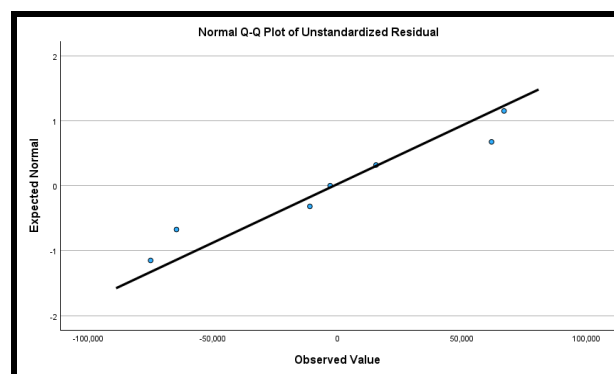
1. Uji Normalitas

Uji normalitas digunakan untuk mengetahui distribusi dari suatu model regresi, variabel pengganggu, atau residual. Hasil pengujian normalitas terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Normalitas

	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
Residual	0,922	7	0,488

Tabel 2 menunjukkan nilai sig. sebesar 0,488 pada Metode Shapiro-Wilk. Hal tersebut menandakan bahwa *null hypothesis* diterima (data atau residual yang digunakan memiliki distribusi normal). Selain menggunakan Shapiro-Wilk, uji normalitas juga dilakukan dengan pendekatan visual grafik *Q-Q Plot*. Grafik *Q-Q Plot* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Visualisasi Data dengan Grafik Normal Q-Q Plot

Gambar 1 menunjukkan pendekatan visual grafik *Q-Q Plot* yang digunakan menguji normalitas data. Berdasarkan grafik tersebut, plot data menyebar di sekitar garis diagonal dan mengikuti arah garis diagonal tersebut. Terlihat bahwa titik-titik data terdistribusi secara konsisten di sepanjang garis diagonal tanpa adanya penyimpangan yang ekstrem. Pola sebaran ini mengindikasikan bahwa data residual telah memenuhi asumsi distribusi normal.

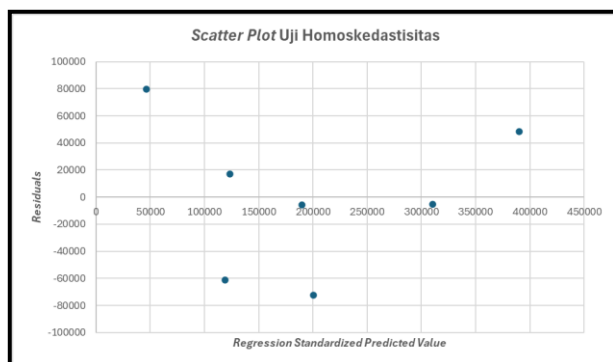
2. Uji Homoskedastisitas

Pengujian homoskedastisitas bertujuan untuk mengetahui adanya ketidakseragaman variasi dari residual (*error*) antar titik data. Hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Homoskedastisitas

Variabel	Sig.
Tingkat produksi (X1)	0,991
SR sebagai bebas (X2)	0,557

Berdasarkan Tabel 3, diperoleh nilai signifikansi pada kedua variabel bebas secara berurutan yaitu 0,991 dan 0,557. Selain itu, didapatkan nilai sig.F sebesar 0,738. Dikarenakan nilai signifikansi yang diperoleh melampaui 0,05, ini menunjukkan bahwa model homoskedastik baik simultan dan parsial. Dilanjutkan pengujian menggunakan metode visual grafik *scatterplot*. Visualisasi grafik hasil uji Homoskedastisitas ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan *scatter plot* yang terbentuk, titik menunjukkan pola yang acak dan tidak sistematis. Hal tersebut menunjukkan model yang terbentuk bersifat homoskedastik [14].



Gambar 2. Scatter Plot Residual dengan Prediksi Nilai Y

3. Uji Multikolinearitas

Pengujian multikolinearitas berfungsi dalam menilai korelasi pada variabel-variabel bebas yang tinggi. Hasil dari pengujian disajikan pada Tabel 4.

Pengujian yang dilakukan pada kedua variabel bebas adalah toleransi dan VIF. Kedua variabel memiliki nilai yang sama baik pada toleransi sebesar 0,473 dan VIF sebesar 2,114. Dikarenakan nilai toleransi lebih dari 0,1 dan nilai VIF kurang dari 10, menandakan variabel bebas tidak terjadi multikolinearitas.

Tabel 4. Hasil Uji Multikolinearitas

Hasil Uji Multikolinearitas		
Model	Collinearity Statistics	
	Tolerance	VIF
Tingkat Produksi (X1)	0,473	2,114
SR (X2)	0,473	2,114

4. Uji Linearitas

Pengujian linearitas bertujuan untuk mengidentifikasi korelasi linear dari variabel bebas terhadap variabel terikat. Hasil dari pengujian tersebut disajikan pada Tabel 5. Variabel X1 memiliki signifikansi sebesar 0,072 dan variabel X2 sebesar 0,928 pada *deviation from linearity*. Kondisi ini mengindikasikan adanya korelasi linear di antara kedua variabel.

Tabel 5. Hasil Uji Linearitas

Variabel Bebas	Jenis Data	Sig.
Kapasitas	Linearity	0,137
Produksi (X1)	Deviation from linearity	0,072
SR (X2)	Linearity	0,545
	Deviation from linearity	0,928

Berdasarkan serangkaian pengujian yang dijalankan, dapat disimpulkan bahwa data tersebut valid dan bebas dari pelanggaran asumsi klasik. Selanjutnya dilakukan analisis regresi berganda.

Analisis Regresi Berganda

Dilakukan regresi linear berganda terhadap data yang lolos uji asumsi klasik, yaitu data pada Tabel 1. Hasil analisis regresi disajikan dalam Tabel 6 dan Gambar 3.

Tabel 6. Hasil Analisis Regresi Linear Berganda

Variabel	Unstandardized B	Sig
Konstanta	-64.182,587	0,384
Kapasitas produksi	1,074	0,015
SR	123.008,571	0,024
Adjusted R ²		0,735
Sig. F (Simultan)		0,031

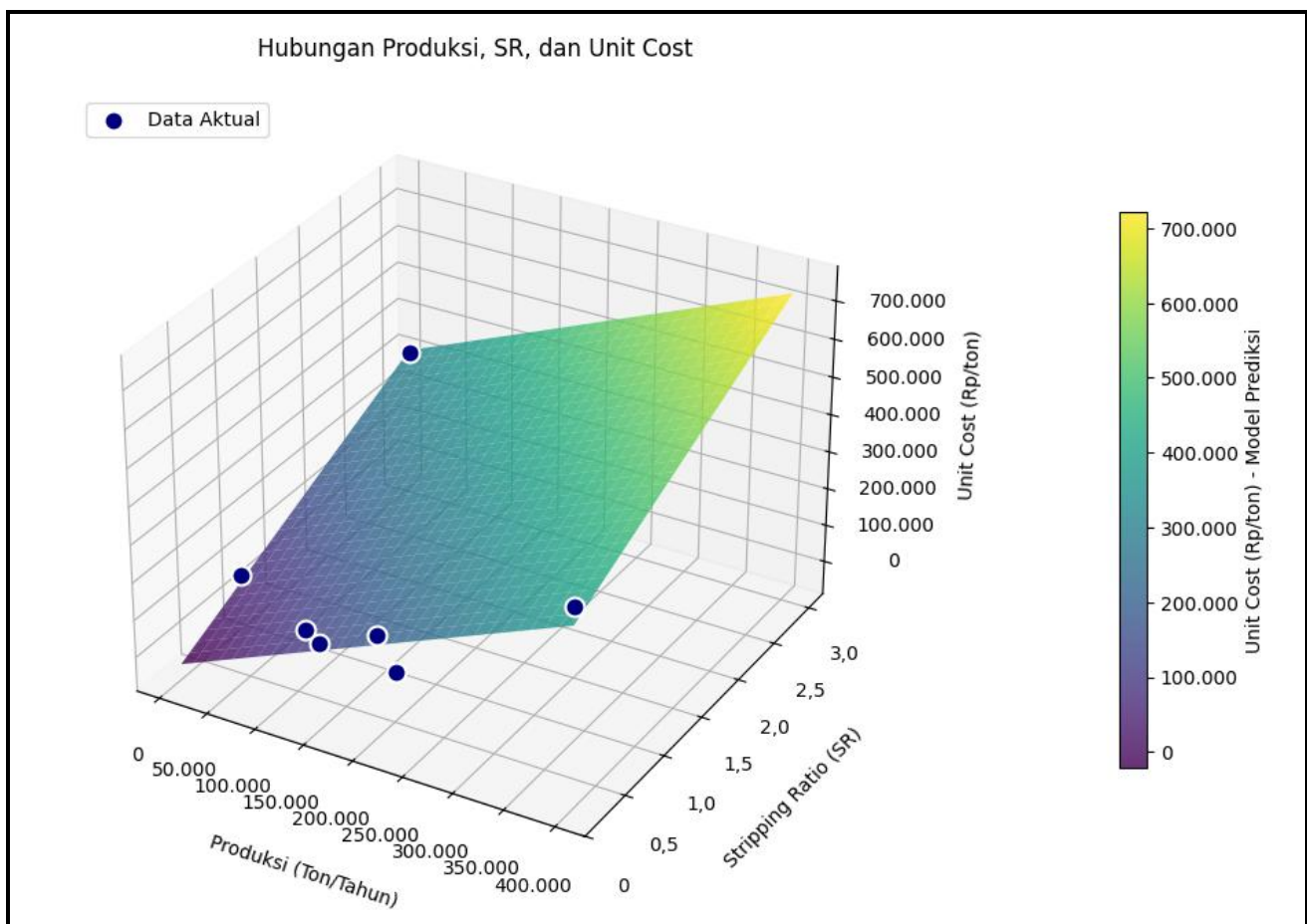
Tabel 6 menunjukkan hasil estimasi regresi linear berganda. Angka yang tertera di bawah kolom *Unstandardized Coefficients B* akan dimasukkan ke dalam Pers. (1) sebagai koefisien regresi. Setelah dimasukkan, akan muncul persamaan baru yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$Y = -64.182,587 + 1,074(X_1) + 123.008,571(X_2) \quad (3)$$

Pada model yang diperoleh (persamaan (3)) X_1 memiliki nilai positif. Hal tersebut mengindikasikan bahwa setiap kenaikan produksi sebanyak satu ton menyebabkan bertambahnya *unit cost* sebesar Rp1.074. Lalu, X_2 juga memiliki hubungan positif terhadap *unit-cost*. Hal tersebut menunjukkan apabila SR naik satu satuan, maka *unit-cost* bertambah sebesar Rp123.006,571.

Korelasi positif pada SR menunjukkan konsekuensi dari operasional pertambangan terbuka. Kenaikan SR akan meningkatkan biaya yang dikeluarkan karena volume *overburden* yang harus dikupas juga meningkat. Biaya pengupasan *overburden* memiliki hubungan linear positif dan menjadi komponen dominan dalam biaya operasi [18].

Perlu diperhatikan bahwa *economies of scale* memiliki batas optimal. X_1 memiliki koefisien positif yang menunjukkan bahwa kegiatan penambangan telah melewati titik efisiensi terendah (*minimum efficient scale*) sehingga Pers. (3) masuk dalam fase *diseconomies of scale*. *Diseconomies of scale* terjadi ketika biaya marjinal (*marginal cost*) dari unit terakhir yang diproduksi lebih tinggi dari biaya rata-rata. Hal tersebut menunjukkan bahwa *unit-cost* akan semakin tinggi ketika unit yang diproduksi meningkat [19].



Gambar 3. Visualisasi Penyebaran Data

Gambar 3 menyajikan visualisasi plot tiga dimensi (3D) yang menggambarkan hubungan secara simultan antara kapasitas produksi dan SR terhadap *unit cost* pada model regresi. Pada visualisasi tersebut, titik-titik warna biru merepresentasikan data aktual berdasarkan Tabel 1.

Sementara itu, bidang yang dihasilkan merepresentasikan model regresi dengan Pers. (3). Bidang regresi yang terbentuk tersebut memiliki gradien yang positif seiring dengan bertambahnya nilai SR dan produksi. Selain itu, persebaran titik-titik data aktual

terlihat berada di sekitar dan tidak terlalu jauh dari bidang regresi. Hal tersebut menunjukkan *residual* atau *error* yang kecil dikarenakan jarak yang tidak terlalu jauh. Dapat disimpulkan bahwa model regresi ini memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam memprediksi *unit cost*.

Uji Hipotesis

Selanjutnya dilanjutkan dengan uji hipotesis untuk validasi model regresi. Terdapat tiga uji hipotesis yang dilakukan, yaitu:

1. Uji Koefisien Determinasi

Mengacu pada Tabel 6, diperoleh nilai R^2 mencapai 0,735. Hal tersebut mengindikasikan bahwa produksi dan SR sebagai variabel-variabel bebas yang digunakan mampu menjelaskan sebagian besar variabilitas pada variabel terikat (*unit cost*).

2. Uji-t (Parsial)

Tabel 6 memperlihatkan tingkat signifikansi untuk kapasitas produksi sebesar 0,015, sedangkan nilai pada variabel SR adalah 0,024. Nilai pada kedua

variabel tidak melebihi taraf 0,05. Hal tersebut membuktikan bahwa kedua variabel memberikan pengaruh secara signifikan terhadap *unit-cost* secara parsial.

3. Uji-F (Simultan)

Tingkat signifikansi yang diperoleh pada Tabel 6 menunjukkan angka 0,031 untuk variabel *unit cost*. Nilai tersebut tidak melebihi taraf 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa *unit-cost* dipengaruhi secara simultan oleh kedua variabel bebas secara signifikan.

Perhitungan Akurasi Model

Langkah terakhir adalah menggunakan RMSE untuk memperhitungkan keakuratan dari model yang telah dibuat. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi yang dihasilkan oleh model regresi terhadap data aktual. Untuk mendapatkan nilai dari RMSE digunakan dengan rumus Pers. (2). Adapun hasil kalkulasi uji RMSE tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Uji RMSE

Nama Perusahaan	Unit-Cost (Rp/ton)	Produksi (Ton)	SR	Y'	Y-Y'	(Y-Y') ²
ABC	140.252	150.000	0,20	121.519	18.733	350.920.523
DEF	126.017	25.000	0,65	43.182	82.835	6.861.630.163
GHI	128.284	228.000	0,16	200.112	(71.828)	5.159.236.320
JKL	438.341	400.000	0,22	392.479	45.862	2.103.285.642
MNO	184.223	200.000	0,31	189.055	(4.832)	23.347.149
PQR	57.971	100.000	0,60	117.023	(59.052)	3.487.092.933
STU	304.965	5.000	3,00	310.213	(5.248)	27.544.926
Total						18.013.057.656
RMSE						50.728

Tabel 7 menunjukkan hasil validasi model dengan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE didapat sebesar 50.728, nilai ini menunjukkan nilai rata-rata deviasi dari prediksi model terhadap data aktual. Hal tersebut menunjukkan dengan *error* sebesar Rp50.727, model regresi memiliki tingkat kesalahan prediksi yang relatif kecil daripada rata-rata dan rentang variasi *unit-cost*. Artinya, model yang telah disusun memiliki tingkat akurasi yang memadai.

KESIMPULAN

Mengacu pada rangkaian analisis serta pembahasan yang sudah dilaksanakan mengenai estimasi *unit-cost* pada penambangan asbuton dengan pendekatan statistika, didapatkan persamaan regresi linier berganda. Dapat dilihat di Pers. (3), konstanta bernilai negatif dengan variabel X1 (kapasitas produksi) dan X2 (SR) berkoefisien positif. X1 berkoefisien positif, menunjukkan bahwa model yang terbentuk masuk dalam fase *diseconomies of scale*.

Secara statistik, model tersebut valid dalam mengonfirmasi pengaruh variabel bebas terhadap biaya penambangan. Hal tersebut dibuktikan berdasarkan uji-t dan uji-F. Berdasarkan uji-t yang telah dilakukan, variabel kapasitas produksi dan variabel SR memiliki tingkat signifikansi secara berurutan 0,015 dan 0,024 ($< 0,05$). Sementara itu, hasil uji-F menunjukkan nilai signifikansi model sebesar 0,031 ($< 0,05$). Kedua pengujian tersebut mengonfirmasi bahwa *unit-cost* dipengaruhi secara signifikan oleh kedua variabel, baik melalui pengujian parsial maupun simultan.

Model regresi yang telah dibuat juga memiliki tingkat akurasi yang baik dalam memprediksi dan layak digunakan. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai Adjusted R^2 yang menyentuh angka 0,735. Hal tersebut memperlihatkan bahwa model mampu menjelaskan 73,5% variabilitas data. Selain itu, dengan nilai RMSE sebesar 50.727, menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang relatif kecil dibandingkan dengan rata-rata dan rentang variasi *unit cost* aktual perusahaan tambang asbuton.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum. (2025). *Brief Notes: Penggunaan Aspal dan Asbuton untuk Jalan di Indonesia*. Materi Presentasi/Laporan Data. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- [2] Miswanto, A., Suherman, I., Suseno, T., dan Pravianto, W. (2023). Study of Supply-Demand of Indonesia Buton Asphalt, *Indonesian Mining Journal*, 26(1), 49-59.
- [3] Azizudin, AA., Nasrullah, HJ., Muhlis, TA., Hidayat, WT., Khair, MI., & Karyawan, IDMA. (2025). Comparative Analysis Between Asbuton and Conventional Asphalt in the Context of Road Rehabilitation, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 7(6).
- [4] Kozyrieva, O., Khudolei, V., Vyhovska, V., Zabashtanskyi, M., & Rogovyi, A. (2020). Mining Business Risk Management, *E3S Web of Conferences*, 174, 04043.
- [5] Markovic, P., Stevanovic, D., Kolonja, B., Slavkovic, D., & Krzanovic, D. (2025). A Hybrid Model for Risk-Based Strategic Planning in Open-Pit Mining: Integrating Deterministic, Stochastic, and ISO 31000 Approaches, *Applied Sciences*.
- [6] Budeba, MD., Joubert, JW., dan Webber-Youngman, RCW. (2015). A proposed approach for modelling competitiveness of new surface coal mines, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115, 1057.
- [7] O'Hara, TA. (1980). Quick guides to the evaluation of orebodies, *CIM Bulletin*, February 1980, 87.
- [8] Shafiee, S. dan Topal, E. (2012). New approach for estimating total mining costs in surface coal mines, *Mining Technology*, 121(3), 109.
- [9] Camm, TW. (1991). *Simplified Cost Models for Prefeasibility Mineral Evaluations* (Information Circular 9298). Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- [10] Mohutsiwa, M., & Musingwini, C. (2015). Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(8).
- [11] Lasabuda, GP. dan Mangantar, M. (2022). Pengaruh Struktur Modal, Likuiditas, dan Profitabilitas Terhadap Nilai Perusahaan pada Perusahaan Subsektor Otomotif yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia 2017-2020, *Jurnal EMBA: Jurnal Riset Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 10(2), 337-345.
- [12] Razali, NM., & Yap, BW. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests, *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.
- [13] Ghazali, I. (2018). *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 25* (Edisi 9). Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- [14] Gujarati, DN., & Porter, DC. (2009). *Basic Econometrics* (Edisi 5). New York: McGraw-Hill/Irwin.
- [15] Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (Edisi 5). London: SAGE Publications.
- [16] Yusiani, AS. dan Maulida, H. (2024). Pengaruh Disiplin Kerja dan Kompetensi Terhadap Kinerja Karyawan pada PT Aneka Tambang Tbk Unit Geomin Jakarta Selatan, *Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Manajemen*, 2(11), 14-25.
- [17] Ashari, ML., & Sadiki, M. (2020). Prediksi Data Transaksi Penjualan Time Series Menggunakan Regresi LSTM, *JANAPATI*, 9(1).
- [18] Hamd-Allh, HH., Moharram, MR., Yssin, MA., Gouda, MA., & Embaby, AK. (2020). Effect of Cutoff Grade and Stripping Ratio on the Net Present Value for Hamama Gold Project, Eastern Desert, Egypt, *Journal of Engineering Research and Reports*, 11(4), 1-8.
- [19] Wicker, P., Breuer, C., Lamprecht, M., & Fischer, A. (2014). Does club size matter: An examination of economies of scale, economies of scope, and organizational problems, *Journal of Sport Management*, 28, 266-280.