

Analisis Kemiringan Tumpukan Material Belerang pada Area Open Storage PT. PKG Menggunakan Metode *Natural Angle Of Repose*

Rizqi Dimas Al'faiz^{1*}, Akhmad Andi Saputra¹, Bana Evardius¹

¹Universitas Gresik, Gresik, Indonesia

rizqidimas21@gmail.com*

| Received: 18/06/2026 | Revised: 16/07/2026 | Accepted: 27/07/2026 |

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Penyimpanan material belerang di area *open storage* memerlukan pengendalian kemiringan timbunan untuk menjaga kestabilan dan keselamatan operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai *Natural Angle of Repose* (AOR), mengevaluasi kesesuaian kemiringan aktual, mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi sudut kemiringan, serta menilai kestabilan timbunan material belerang di PT. PKG. Penelitian menggunakan metode *experimental* dengan analisa kuantitatif melalui pengukuran tinggi dan jari-jari alas timbunan, kemudian sudut kemiringan dihitung menggunakan persamaan $\theta = \arctan(h/r)$ dan dianalisis dengan regresi linier. Hasil penelitian menunjukkan nilai *Natural Angle of Repose* berkisar antara 37,80°–40,89° dengan rata-rata 39,29°. Regresi linier menunjukkan bahwa tinggi timbunan, ukuran partikel, dan kelembapan meningkatkan sudut kemiringan, sedangkan jari-jari alas menurunkan sudut kemiringan. Berdasarkan klasifikasi kestabilan, empat sampel termasuk kurang stabil dan dua sampel termasuk tidak stabil. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kestabilan timbunan material belerang dipengaruhi oleh dimensi timbunan dan karakteristik material. Hasil penelitian dapat menjadi dasar dalam pengendalian sudut kemiringan timbunan agar risiko longsor di area *open storage* dapat diminimalkan.

Kata kunci: *natural angle of repose*, sudut kemiringan aktual, timbunan belerang

Abstract

The storage of sulphur material in open storage areas requires control of the pile's slope to ensure stability and operational safety. This study aims to analyse the *Natural Angle of Repose* (AOR), evaluate the suitability of the actual slope, identify factors affecting the slope angle, and assess the stability of sulphur material piles at PT. PKG. The study employed a descriptive quantitative method by measuring the height and base radius of the stockpile; the slope angle was then calculated using the equation $\theta = \arctan(h/r)$ and analysed via linear regression. The results showed that the natural angle of repose ranged from 37.80° to 40.89°, with an average of 39.29°. Linear regression indicated that pile height, particle size, and moisture content increased the angle of repose, while the base radius decreased it. Based on the stability classification, four samples were classified as less stable and two samples as unstable. This study concludes that the stability of sulphur material stockpiles is influenced by stockpile dimensions and material characteristics. The results of this study can serve as a basis for controlling the slope angle of stockpiles to minimise the risk of landslides in open storage areas.

Keywords: *natural angle of repose, sulphur stockpile, the actual slope angle*

Pendahuluan

Penyimpanan material curah di area open storage merupakan bagian penting dalam operasional industri pertambangan dan industri bahan baku. Material granular seperti belerang umumnya ditumpuk dalam jumlah besar sebelum diproses atau didistribusikan, sehingga kestabilan kemiringan tumpukan menjadi faktor kunci untuk menghindari kegagalan lereng yang dapat membahayakan keselamatan kerja maupun fasilitas perusahaan. Dalam konteks ini, *natural angle of repose* atau sudut istirahat alami sering digunakan sebagai parameter teknis untuk menilai kestabilan lereng tumpukan material granular di lapangan. Angle of repose didefinisikan sebagai sudut kemiringan maksimum suatu material granular yang ditumpuk di atas bidang horizontal tanpa mengalami longsoran atau keruntuhan (Macho et al., 2020), dan parameter ini dipandang penting untuk memahami perilaku mikro bahan granular secara umum (Fu et al., 2020).

Sudut istirahat alami juga lazim digunakan sebagai indikator kemampuan mengalir suatu bahan granular (Lanzerstorfer, 2017), karena nilainya berkaitan langsung dengan sifat aliran material, seperti gesekan antarpartikel dan perilaku aliran serbuk atau granular. Meski demikian, nilai sudut istirahat bukan merupakan sifat intrinsik material, sebab dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti ukuran dan bentuk partikel, kadar air, serta metode pengujian yang digunakan (Müller et al., 2021). Bentuk butiran sendiri terbukti berperan signifikan dalam eksperimen pengukuran sudut istirahat, yang merupakan metode umum untuk karakterisasi bahan granular (Willibald et al., 2020). Popularitas penggunaan *natural angle of repose* dalam karakterisasi bahan padat curah tidak lepas dari kesederhanaan pengaturan pengukurannya (Rackl et al., 2017).

Lebih jauh, sudut istirahat berperan penting dalam stabilitas lereng tumpukan (Dong et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengukuran angle of repose sangat berguna dalam aplikasi teknik, antara lain untuk perancangan kemiringan tumpukan material, desain peralatan penanganan material, serta evaluasi aliran material di dalam hopper dan silo. Nilai sudut istirahat yang lebih besar mengindikasikan kecenderungan aliran yang lebih rendah, sedangkan nilai yang lebih kecil menunjukkan material yang lebih mudah mengalir. Bentuk partikel dan kohesi material juga ditemukan secara signifikan memengaruhi besarnya sudut istirahat, sehingga parameter ini dipandang sebagai salah satu karakteristik fisik dan mekanik yang paling penting dari material granular (Elekes & Parteli, 2021).

Namun demikian, sebagian besar penelitian mengenai *angle of repose* masih berfokus pada material granular seperti pasir, bijih mineral, dan bahan pertanian. (Kajiyama et al., 2024) menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel berpengaruh terhadap besarnya *angle of repose* pada material pasir, sedangkan (Chen et al., 2025) mengkaji pengaruh kadar air terhadap *angle of repose* beras menggunakan metode *Discrete Element Method* (DEM). (Li et al., 2025) juga meneliti pengaruh koefisien gesek dan bentuk partikel terhadap sudut tumpukan material sinter. Meskipun memberikan pemahaman mengenai perilaku material granular, penelitian-penelitian tersebut belum membahas karakteristik material belerang yang disimpan dalam kondisi *open storage*. Oleh karena itu, pengujian secara langsung pada material belerang diperlukan untuk memperoleh nilai *Natural Angle of Repose* yang sesuai dengan karakteristik fisik serta kondisi penyimpanan aktual.

Material belerang di area *open storage* PT. PKG disimpan dalam bentuk timbunan terbuka sebelum diproses atau didistribusikan. Berdasarkan hasil observasi lapangan, tinggi dan sudut kemiringan setiap timbunan tidak seragam karena proses penumpukan dilakukan menggunakan **wheel loader**, sehingga bentuk timbunan mengikuti pola penimbunan di lapangan dan ketersediaan area penyimpanan. Hasil pengukuran awal menunjukkan sudut kemiringan aktual berkisar **37,80°–40,89°**, yang berada pada rentang **kurang stabil hingga tidak stabil** berdasarkan klasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, kondisi material dipengaruhi oleh variasi ukuran partikel dan kelembapan akibat paparan lingkungan terbuka, yang menurut Müller et al. (2021) merupakan faktor penting yang memengaruhi nilai *angle of repose*. Meskipun demikian, hingga saat ini belum terdapat penelitian yang secara kuantitatif mengevaluasi kesesuaian sudut kemiringan aktual timbunan material belerang di area *open storage* PT. PKG terhadap nilai *Natural Angle of Repose* serta hubungannya dengan faktor tinggi timbunan, jari-jari alas, ukuran partikel, dan kelembapan material. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui pengukuran lapangan dan analisis *Natural Angle of Repose* sebagai dasar evaluasi kestabilan timbunan material belerang.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kemiringan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG menggunakan pendekatan *natural angle of response*. Secara spesifik, penelitian ini diarahkan untuk mengetahui nilai *natural angle of repose* material belerang, mengevaluasi kesesuaian kemiringan aktual tumpukan terhadap nilai tersebut, mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kemiringan tumpukan, serta menilai tingkat kestabilan tumpukan berdasarkan hasil analisis yang diperoleh. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengaitkan kondisi geometrik tumpukan dengan sifat fisik material secara objektif, sehingga perbandingan antara sudut kemiringan aktual hasil pengukuran lapangan dan nilai sudut alami material dapat menjadi dasar teknis yang jelas untuk menentukan batas aman penimbunan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai karakteristik kemiringan stabil belerang, sekaligus menjadi rekomendasi teknis bagi manajemen PT. PKG dalam upaya meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi penyimpanan material curah secara berkelanjutan.

Metodologi Penelitian

Rancangan penelitian

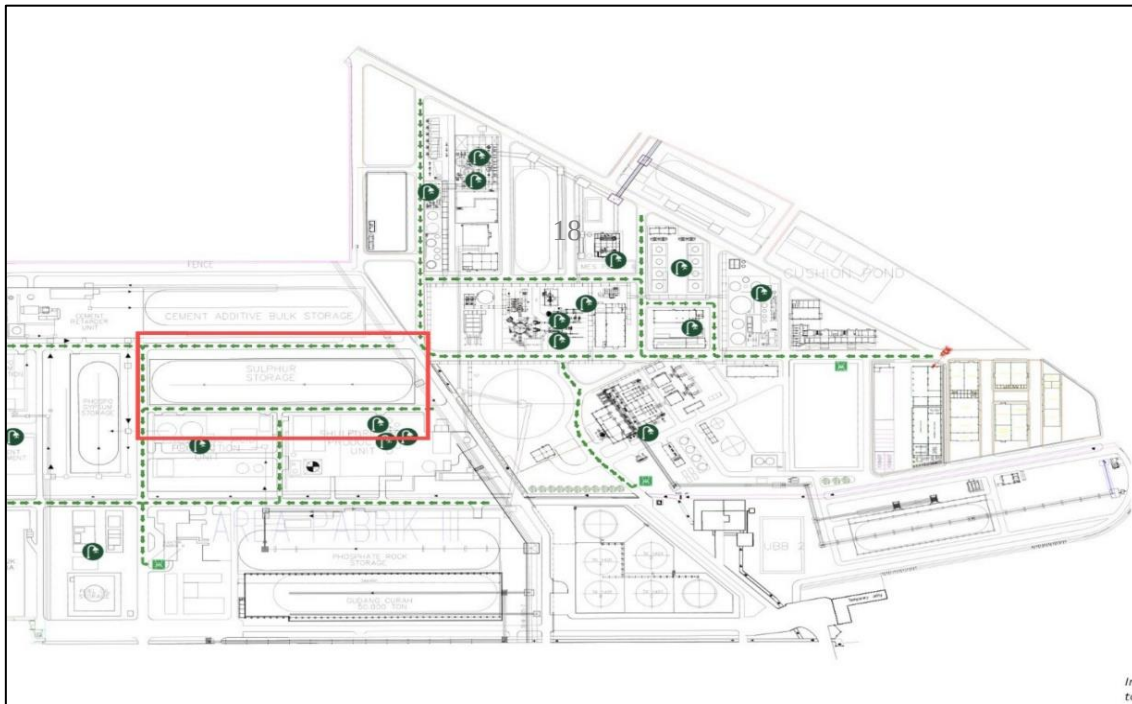
Penelitian ini bersifat eksperimental dengan analisis kuantitatif. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kemiringan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG menggunakan metode *natural angle of repose*. Penelitian eksperimen adalah penelitian yang dilakukan terhadap variabel yang data-datanya belum ada sehingga perlu dilakukan proses manipulasi melalui pemberian treatment/perlakuan tertentu terhadap subjek penelitian yang kemudian diamati/diukur dampaknya (data yang akan datang)(Auliya et al., n.d.).

Rancangan penelitian mencakup beberapa tahap, yaitu pengukuran sudut kemiringan tumpukan di lapangan, analisis karakteristik fisik material belerang, perbandingan sudut kemiringan aktual dengan *natural angle of repose*, serta evaluasi kestabilan tumpukan. Analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis terkait kemiringan lereng yang aman dan efisien.

Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan faktor-faktor yang memengaruhi sudut kemiringan, seperti ukuran butir, bentuk partikel, kelembapan, serta metode penumpukan. Dengan rancangan penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai perilaku tumpukan belerang di lapangan serta aplikasinya dalam perencanaan stockpile.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di area *open storage* PT. PKG, yang digunakan untuk penyimpanan material belerang. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik operasional yang representatif, serta keberadaan tumpukan material yang aktual dan beragam. Lokasi ini juga memudahkan pengambilan data lapangan dan sampel material.



Gambar 1. Peta Lokasi

Kondisi geografis dan lingkungan di lokasi penelitian, seperti ketinggian, curah hujan, dan kelembapan, turut diperhatikan karena dapat memengaruhi kestabilan tumpukan belerang. Pengukuran dilakukan pada beberapa tumpukan yang berbeda untuk memperoleh data yang representatif.

Waktu penelitian dilaksanakan selama 6 bulan, dari Desember 2025 hingga Juni 2026. Waktu ini mencakup tahap observasi lapangan, pengukuran sudut kemiringan, pengujian, analisis data, hingga penyusunan laporan. Pemilihan periode ini juga mempertimbangkan kondisi operasional yang stabil serta cuaca yang mendukung pengambilan data di lapangan.

Bahan, Peralatan dan Instrumen Penelitian

Bahan penelitian utama adalah material belerang yang ditumpuk di area *open storage* PT. PKG. Material ini diambil sebagai sampel untuk dianalisis karakteristik fisiknya, termasuk ukuran butir, dan kadar air.

No	Nama Alat	Fungsi
1	Clinometer	Mengukur sudut kemiringan tumpukan secara akurat
2	Penggaris dan pita ukur	Mengukur tinggi, panjang, dan lebar tumpukan
3	Saringan (sieve) standar	Analisis ukuran butir belerang
4	Alat pengukur kelembapan	Menentukan kadar air belerang
5	Laptop/Notebook	Pencatatan data

Tabel 1. Peralatan dan Instrumen Penelitian

Teknik Pengumpulan Data

Data primer diperoleh langsung di lapangan melalui observasi visual dan pengukuran geometrik tumpukan belerang. Data ini sangat penting karena menjadi dasar perhitungan sudut kemiringan (*angle of repose*) aktual. Prosedur pengumpulan data dimulai dengan observasi awal tumpukan belerang di lapangan dan pemetaan lokasi setiap tumpukan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui distribusi tumpukan dan variasi ukurannya. (tidak usah pakai kata tanya)

Informasi yang dikumpulkan melalui observasi :

1. Bentuk fisik tumpukan
 - a. Apakah tumpukan berbentuk kerucut, trapesium, memanjang, atau tidak beraturan.
 - b. Keseragaman permukaan lereng tumpukan.
2. Kondisi permukaan tumpukan
 - a. Kering atau lembap.
 - b. Adanya gumpalan (aglomerasi) belerang.
 - c. Permukaan halus atau kasar.
3. Metode penumpukan
 - a. Penumpukan menggunakan conveyor, loader, atau metode lainnya.
 - b. Apakah penumpukan dilakukan secara bertahap atau kontinu.
4. Kondisi lingkungan
 - a. Paparan hujan dan sinar matahari.
 - b. Pengaruh angin terhadap perubahan bentuk tumpukan.
 - c. Sistem drainase di sekitar area *open storage*.
5. Kondisi keselamatan dan stabilitas
 - a. Adanya longsoran kecil di lereng tumpukan.
 - b. Retakan atau perubahan bentuk lereng.

Hasil observasi tersebut bersifat kualitatif, namun sangat penting untuk mendukung interpretasi hasil perhitungan sudut kemiringan. Selanjutnya, dilakukan pengukuran sudut kemiringan tumpukan menggunakan klinometer pada beberapa titik di setiap tumpukan. Titik

pengukuran dipilih secara acak, namun mewakili bagian puncak, lereng, dan kaki tumpukan agar data lebih representatif.

Sampel material belerang kemudian diambil untuk analisis fisik yang meliputi ukuran butir dan kadar air. Data ini dikombinasikan dengan hasil pengukuran lapangan untuk memperoleh informasi yang lengkap mengenai karakteristik tumpukan. Seluruh data dicatat secara sistematis dan didokumentasikan dengan foto untuk mendukung analisis lebih lanjut.

Pengukuran titik (geometrik tumpukan) bertujuan memperoleh data kuantitatif untuk menghitung sudut *natural angle of repose*. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik representatif di lereng tumpukan untuk memperoleh nilai sudut rata-rata dan variasi.

Variabel yang diukur yakni :

- Tinggi tumpukan (h) : jarak vertikal dari dasar tumpukan ke puncak.
- Jarak horizontal (r) : jarak mendatar dari kaki tumpukan ke titik proyeksi puncak.
- Sudut kemiringan tumpukan

Sudut kemiringan dihitung menggunakan persamaan :

$$\tan \theta = \frac{h}{r}$$

Keterangan :

θ = sudut kemiringan (angle of repose)

h = tinggi tumpukan

r = jarak horizontal

Data sekunder diperoleh dari dokumen, arsip, dan informasi teknis perusahaan. Data ini berfungsi sebagai data pendukung dan pembanding. Data yang dibutuhkan meliputi data karakteristik material belerang, data operasional open storage, serta data standar dan regulasi internal.

Integrasi data primer dan data sekunder dalam analisis didapatkan dari kombinasi kedua jenis data yang digunakan untuk membandingkan sudut kemiringan hasil pengukuran lapangan terhadap sudut angle of repose teoritis/standar perusahaan, menganalisis kestabilan tumpukan, menilai pengaruh variabel, serta menyusun rekomendasi teknis untuk sudut penumpukan ideal, tinggi maksimum tumpukan yang aman, dan perbaikan sistem penanganan dan penyimpanan.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian berjudul "*Analisis Kemiringan Tumpukan Material Belerang di Area Open Storage PT. PKG Menggunakan Metode Natural Angle of Repose*" dilakukan dengan metode mix, sesuai dengan tujuan penelitian dan rumusan masalah yang telah ditetapkan. Data yang digunakan terdiri atas data primer yang diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan serta data sekunder yang bersumber dari dokumen dan informasi teknis perusahaan.

Analisis nilai *natural angle of repose* pada tumpukan material belerang di area *open storage*

Analisis data dalam penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai *Natural Angle of Repose* serta mengevaluasi kesesuaian kemiringan aktual tumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG. Data diperoleh melalui pengukuran langsung geometri tumpukan yang diasumsikan berbentuk mendekati kerucut, meliputi tinggi tumpukan (h) dan jari-jari alas (r), sudut kemiringan aktual tumpukan dihitung menggunakan pendekatan trigonometri dengan persamaan:

$$\tan \theta = \frac{h}{r}$$

di mana θ merupakan sudut kemiringan tumpukan dalam satuan derajat.

Nilai sudut kemiringan aktual yang diperoleh dari perhitungan tersebut selanjutnya dibandingkan dengan nilai *natural angle of repose* material belerang. Nilai *natural angle of repose* ditentukan berdasarkan kajian literatur ilmiah dan pengamatan empiris terhadap sudut kemiringan alami yang terbentuk akibat proses penimbunan material tanpa perlakuan khusus. Perbandingan ini digunakan untuk menilai tingkat kestabilan tumpukan, dengan kriteria bahwa tumpukan dinyatakan stabil apabila sudut kemiringan aktual lebih kecil atau sama dengan nilai *natural angle of repose*, dan dinyatakan berpotensi tidak stabil apabila sudut kemiringan aktual melebihi nilai tersebut.

Selanjutnya, hasil perhitungan sudut kemiringan dianalisis secara statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata, nilai maksimum dan minimum, serta variasi sudut kemiringan antartumpukan di area *open storage*. Analisis ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi eksisting penimbunan material belerang secara menyeluruh dan menjadi dasar dalam mengevaluasi kesesuaian sudut tumpukan terhadap batas aman. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai acuan dalam penyusunan rekomendasi teknis terkait pengelolaan dan pengendalian kemiringan tumpukan material belerang agar tetap stabil dan aman.

Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi kemiringan tumpukan material belerang

a. Tinggi tumpukan

Tinggi tumpukan material granular berpengaruh terhadap nilai sudut *natural angle of repose* yang terbentuk. Seiring bertambahnya tinggi tumpukan, gaya normal dan gaya geser antarpartikel meningkat sehingga memicu terjadinya penataan ulang partikel dan pergerakan lokal pada lereng tumpukan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan perubahan sudut kemiringan alami hingga mencapai keseimbangan baru yang mencerminkan nilai sudut repose material.

b. Jari – jari alas tumpukan

Jari-jari alas tumpukan merupakan parameter geometris yang mempengaruhi sudut *natural angle of repose* material granular. Perubahan jari-jari alas berkaitan langsung dengan luas bidang kontak dan distribusi massa material, sehingga memengaruhi kemiringan lereng alami yang terbentuk. Semakin besar jari-jari alas tumpukan, lereng cenderung menjadi lebih landai dan sudut repose yang terbentuk relatif lebih kecil.

c. Kelembapan

Kadar kelembapan material granular berpengaruh terhadap nilai sudut *natural angle of repose*. Material dengan kelembapan rendah cenderung memiliki sudut repose yang lebih kecil, sedangkan peningkatan kelembapan dapat meningkatkan sudut tersebut hingga batas tertentu sebelum menyebabkan ketidakstabilan

d. Ukuran partikel

Variasi ukuran partikel memengaruhi sudut *natural angle of repose* material granular. Semakin besar ukuran partikel, sudut kemiringan alami yang terbentuk cenderung meningkat akibat bertambahnya gaya gesek antarpartikel.

Analisis tingkat kestabilan tumpukan belerang

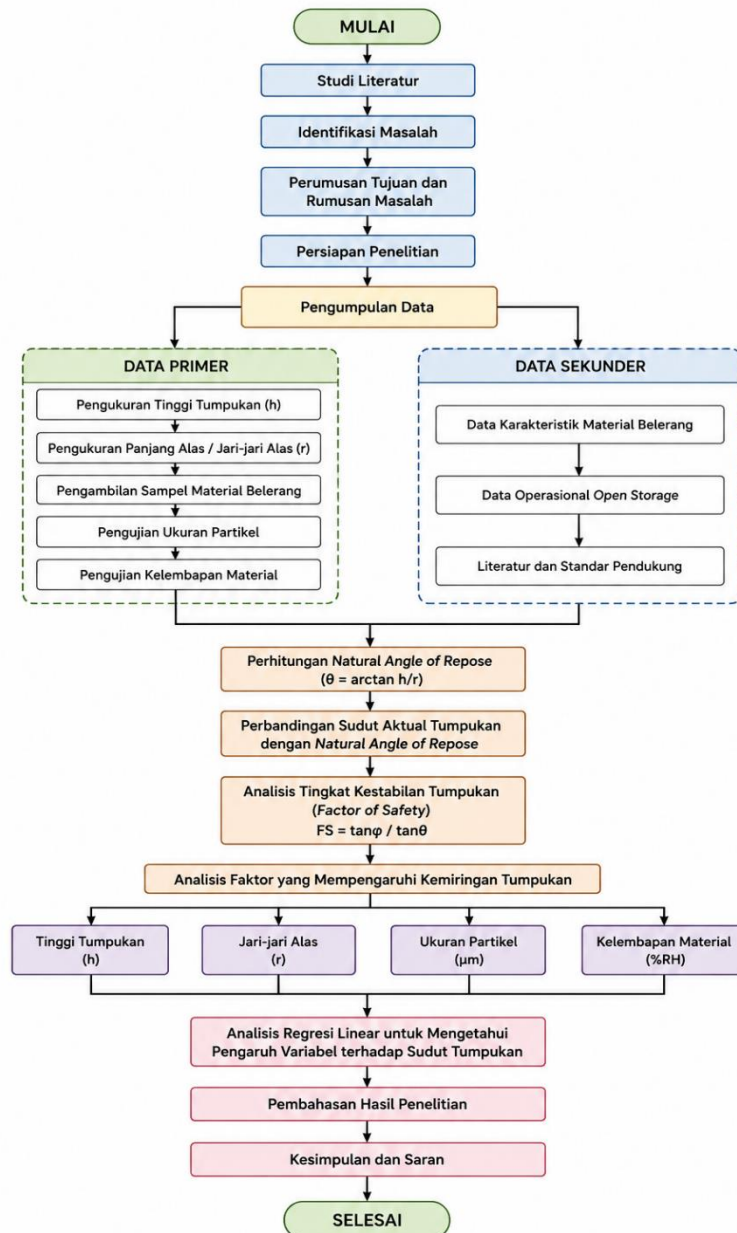
Analisis tingkat kestabilan tumpukan material belerang dilakukan menggunakan pendekatan limit equilibrium sederhana, tanpa melibatkan pemodelan atau simulasi numerik. Metode ini didasarkan pada asumsi keseimbangan gaya pada lereng tumpukan, di mana kestabilan ditentukan oleh perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak akibat berat material. Sudut kemiringan aktual tumpukan diperoleh dari hasil pengukuran lapangan, sedangkan nilai *natural angle of repose* digunakan sebagai parameter sudut geser internal material belerang. Pendekatan ini dinilai sesuai untuk kondisi *open storage* karena karakteristik tumpukan relatif sederhana dan materialnya bersifat granular.

Penilaian kestabilan tumpukan dilakukan dengan menghitung Faktor Keamanan (Factor of Safety/FS) menggunakan persamaan:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta}$$

Dimana FS adalah faktor keamanan, ϕ merupakan sudut geser internal material yang diasumsikan sama dengan nilai *natural angle of repose*, dan θ adalah sudut kemiringan aktual tumpukan. Kriteria kestabilan ditentukan berdasarkan nilai faktor keamanan, yaitu tumpukan dinyatakan stabil apabila $FS > 1$, kritis apabila $FS = 1$, dan tidak stabil apabila $FS < 1$. Hasil perhitungan faktor keamanan kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi tingkat kestabilan tumpukan material belerang di area *open storage* serta sebagai dasar penyusunan rekomendasi teknis pengendalian sudut kemiringan.

Flowchart Penelitian



Gambar 2. Flowchart Penelitian

Flowchart ini menggambarkan alur penelitian dari studi literatur hingga penyusunan rekomendasi teknis, sehingga memastikan setiap tahap penelitian dilakukan secara sistematis dan berurutan.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan di area open storage PT. PKG dengan objek penelitian berupa tumpukan material belerang yang terbentuk akibat aktivitas penimbunan material. Pengambilan

data dilakukan melalui observasi dan pengukuran langsung terhadap tumpukan, meliputi tinggi tumpukan dan jari-jari alas tumpukan, untuk memperoleh nilai sudut kemiringan aktual. Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap kondisi fisik material dan metode penimbunan yang diterapkan di lapangan guna mendukung analisis faktor-faktor yang memengaruhi kemiringan dan kestabilan tumpukan material belerang.

Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan pendekatan *natural angle of repose*, regresi linier sederhana, serta analisis kestabilan tumpukan. Hasil penelitian ini meliputi nilai sudut kemiringan aktual tumpukan material belerang, faktor-faktor yang memengaruhi perubahan sudut kemiringan, serta tingkat kestabilan tumpukan berdasarkan perbandingan dengan nilai *natural angle of repose*.



Gambar 3. Kondisi Tumpukan Material Belerang

Berdasarkan hasil observasi lapangan yang dilakukan di area *open storage* PT. PKG, bentuk fisik tumpukan material belerang umumnya menyerupai kerucut akibat proses penumpukan material yang dilakukan secara terus-menerus selama kegiatan operasional berlangsung. Bentuk tumpukan yang terbentuk dipengaruhi oleh pola jatuh material dari conveyor dan proses perapian menggunakan loader di area penimbunan. Pada beberapa titik pengamatan ditemukan perbedaan bentuk lereng antartumpukan, namun secara umum tumpukan masih menunjukkan pola penimbunan yang relatif seragam dan stabil.

Selain bentuk utama tumpukan, hasil observasi menunjukkan bahwa permukaan lereng tumpukan material belerang memiliki tingkat keseragaman yang cukup baik. Permukaan lereng terlihat relatif rata dan tidak ditemukan perubahan bentuk yang signifikan pada sisi lereng tumpukan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi material selama proses penumpukan berlangsung cukup merata sehingga membentuk sudut kemiringan yang relatif konsisten di beberapa area tumpukan. Bentuk fisik tumpukan ini menjadi salah satu parameter penting dalam analisis kemiringan aktual dan evaluasi kestabilan tumpukan material belerang menggunakan metode *natural angle of repose*.

Hasil observasi terhadap kondisi permukaan tumpukan material belerang menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan material berada dalam kondisi kering akibat paparan sinar matahari dan sirkulasi udara terbuka di area *open storage*. Pada beberapa bagian tertentu ditemukan kondisi permukaan yang sedikit lembap akibat pengaruh cuaca, namun kelembapan

tersebut tidak menyebabkan perubahan signifikan pada bentuk dan kestabilan permukaan tumpukan. Selain itu, selama proses pengamatan tidak ditemukan gumpalan (*agglomerasi*) material belerang pada permukaan tumpukan, sehingga material masih berada dalam kondisi terdistribusi secara normal.

Ukuran butir material belerang yang diamati di lapangan juga menunjukkan kondisi yang relatif seragam di seluruh area tumpukan. Keseragaman ukuran butir tersebut menyebabkan tekstur permukaan material terlihat cukup merata dengan tingkat kekasaran yang relatif sama pada setiap titik pengamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik fisik material belerang di area *open storage* cenderung homogen, sehingga pengaruh variasi ukuran butir terhadap perubahan sudut kemiringan tumpukan relatif kecil. Kondisi permukaan dan karakteristik material ini menjadi salah satu faktor yang mendukung kestabilan tumpukan material belerang di area penyimpanan terbuka.



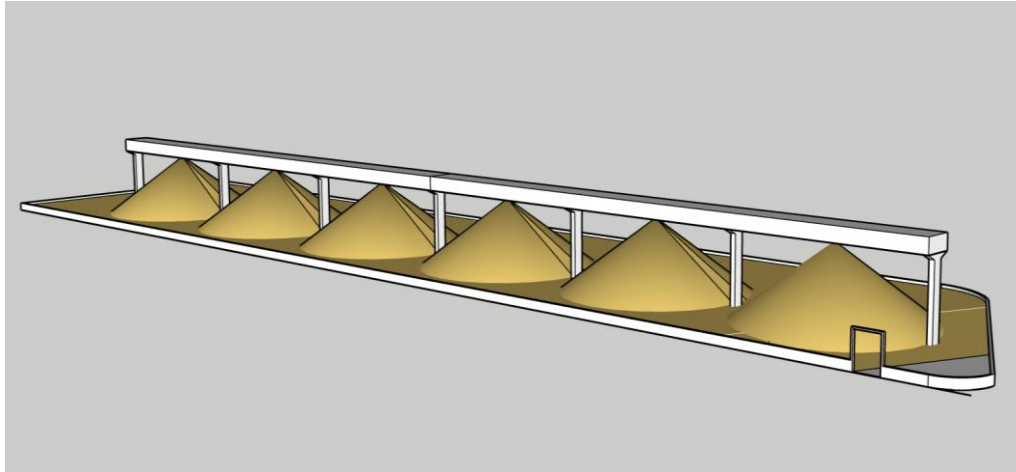
Gambar 4. Wheel Loader Untuk Penumpukan Material Belerang

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, proses penumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG dilakukan menggunakan sistem conveyor dan alat bantu loader. Material belerang yang berasal dari proses produksi dialirkan secara kontinu menuju area penimbunan, kemudian dilakukan pengaturan posisi dan perapian tumpukan menggunakan loader agar material tetap berada dalam area penyimpanan yang telah ditentukan. Proses penumpukan dilakukan secara bertahap sesuai dengan jumlah material yang masuk ke area *open storage*, sehingga tinggi dan dimensi tumpukan mengalami perubahan seiring dengan volume material yang ditimbun.

Metode penumpukan yang dilakukan secara kontinu tersebut menyebabkan terbentuknya tumpukan material dengan variasi tinggi dan luas alas yang berbeda pada setiap titik penimbunan. Meskipun demikian, pola penumpukan yang diterapkan di lapangan masih menghasilkan bentuk tumpukan yang relatif stabil dan teratur. Aktivitas loader yang digunakan untuk merapikan sisi lereng tumpukan juga membantu menjaga distribusi material agar tidak terjadi penumpukan berlebih pada satu sisi tertentu. Hasil observasi terhadap metode penumpukan ini digunakan sebagai dasar untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kemiringan aktual dan tingkat kestabilan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG.

Berdasarkan hasil observasi lapangan, area *open storage* material belerang secara langsung terpapar kondisi lingkungan terbuka seperti sinar matahari, hujan, dan angin. Paparan

sinar matahari yang berlangsung terus-menerus menyebabkan permukaan material belerang cenderung kering di sebagian besar area tumpukan. Sementara itu, saat terjadi hujan, beberapa bagian permukaan tumpukan mengalami peningkatan kelembapan, terutama pada area sisi lereng dan bagian bawah tumpukan yang lebih sulit untuk mengering dengan cepat. Meskipun demikian, kondisi kelembapan di lapangan tidak menyebabkan perubahan signifikan pada bentuk umum tumpukan material belerang.



Gambar 5. Dimensi Open Storage

Selain pengaruh hujan dan sinar matahari, kondisi angin di area *open storage* juga memengaruhi permukaan tumpukan material belerang. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa hembusan angin menyebabkan perpindahan material berukuran halus pada permukaan luar tumpukan, namun tidak menimbulkan perubahan bentuk lereng yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh ukuran butir material yang relatif seragam dan kondisi permukaan tumpukan yang cukup stabil. Di sekitar area *open storage* juga terdapat sistem drainase yang berfungsi mengalirkan air hujan agar tidak terjadi genangan di area penumpukan. Keberadaan sistem drainase tersebut membantu menjaga kondisi area penyimpanan tetap kering dan mendukung kestabilan tumpukan material belerang selama proses penyimpanan.

Hasil observasi terhadap kondisi keselamatan dan stabilitas tumpukan material belerang menunjukkan bahwa secara umum tumpukan berada dalam kondisi relatif stabil selama proses pengamatan. Pada area lereng tumpukan tidak ditemukan longsoran besar maupun keruntuhan material yang dapat mengganggu aktivitas operasional di area *open storage*. Namun, pada beberapa bagian lereng ditemukan pergeseran kecil pada material permukaan akibat aktivitas loader dan pengaruh distribusi material selama proses penumpukan. Pergeseran kecil tersebut masih berada dalam kondisi normal dan tidak menyebabkan perubahan bentuk tumpukan yang signifikan.

Selain itu, hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa tidak ditemukan retakan besar maupun perubahan bentuk lereng yang mengindikasikan kondisi ketidakstabilan serius pada tumpukan material belerang. Bentuk lereng tumpukan secara umum masih mampu mempertahankan kemiringannya sesuai dengan karakteristik alami material. Kondisi ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan aktual tumpukan masih berada dalam batas yang relatif aman dibandingkan dengan nilai *natural angle of repose*. Hasil observasi kondisi keselamatan

dan stabilitas ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai tingkat kestabilan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. PKG.

Pengukuran dilakukan pada 6 titik pengamatan tumpukan material belerang. Parameter yang diukur meliputi tinggi tumpukan, panjang alas tumpukan dan sudut tumpukan.

Tabel 2. Data Tumpukan Material Belerang di Open Storage PT. PKG

No	Tinggi Tumpukan (m)	Panjang Alas (m)	Sudut (°)	Dokumentasi
1	10,4	26,8	38	
2	10,9	27,4	38	
3	11,4	28,1	39	
4	11,8	28,7	39	
5	12,3	29,3	40	
6	12,9	29,8	41	



Gambar 6. Analisa Pengaruh Ukuran Partikel

Analisa Pengaruh Ukuran Partikel

Untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel terhadap nilai *natural angle of repose*, dilakukan pengelompokan material belerang berdasarkan rentang ukuran partikel tertentu. Pengujian dilakukan menggunakan berat sampel yang sama pada setiap kategori ukuran partikel agar hasil pengukuran dapat dibandingkan secara konsisten. Dari hasil pengujian diperoleh perbedaan nilai sudut tumpukan pada masing-masing ukuran partikel yang menunjukkan adanya pengaruh karakteristik fisik material terhadap tingkat kestabilan tumpukan. Hasil pengelompokan ukuran partikel, berat sampel, serta nilai sudut tumpukan material belerang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Data Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Nilai *Natural angle of repose*

Jenis Partikel	Ukuran partikel (μm)	Berat Sample (kg)	Rata-rata sudut tumpukan ($^{\circ}$)	Klasifikasi stabilitas
Halus	250	5	33,2	Stabil
Sedang	750	5	35,8	Cukup stabil
Kasar	1500	5	38,9	Kurang stabil

Tabel 4. Pengaruh Kelembapan Terhadap Nilai *Natural angle of Repose*

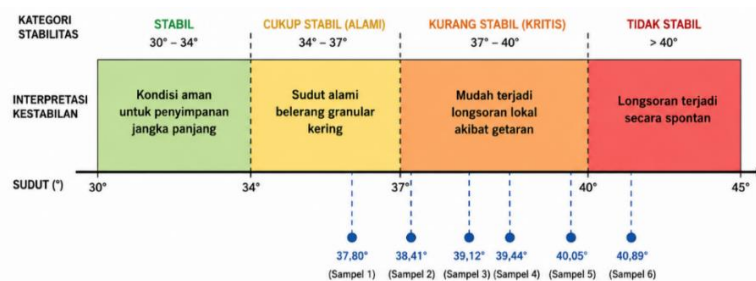
No	Kelembapan (%)	Berat Sample (kg)	Tinggi Tumpukan (cm)	Diameter Alas (cm)	Sudut Tumpukan ($^{\circ}$)
1	0,5	5	14,8	49	31,1
2	1	5	15,9	48	33,5
3	1,5	5	17,2	47	36,2
4	2	5	18,7	46	39,1
5	2,5	5	19,6	45	41,1
6	3	5	20,8	44	43,4

Pengujian pengaruh kelembapan terhadap nilai *natural angle of repose* dilakukan dengan menggunakan berat sampel yang sama, yaitu 5 kg pada setiap tingkat kelembapan. Variasi kadar air diberikan untuk mengetahui perubahan karakteristik aliran dan kestabilan material belerang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan cenderung meningkatkan nilai sudut tumpukan yang terbentuk akibat meningkatnya kohesi antarpartikel material.

Tabel 5. Analisis Nilai *Natural angle of repose*

No	Tinggi Tumpukan	Panjang Alas	$\theta = \arctan (h/r)$
1	10,4m	26,8m	37,8
2	10,9m	27,4m	38,41
3	11,4m	28,1m	39,12
4	11,8m	28,7m	39,44
5	12,3m	29,3m	40,05
6	12,9m	29,8m	40,89

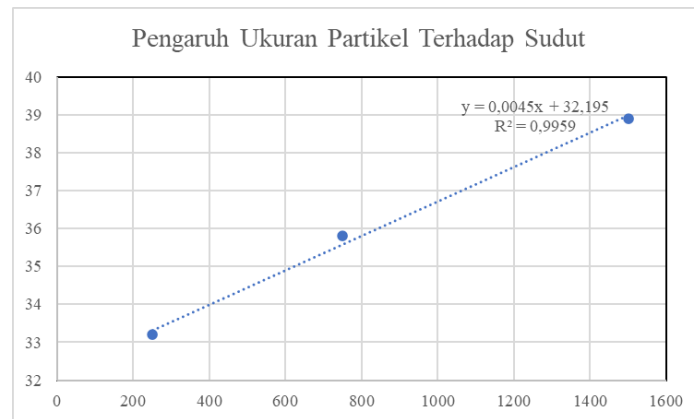
Berdasarkan data pada tabel di atas, diperoleh nilai sudut tumpukan (*natural angle of repose*) material belerang yang berkisar antara 37,80° hingga 40,89° dengan nilai rata-rata sebesar 39,29°. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tinggi tumpukan yang terbentuk terhadap panjang alasnya, nilai sudut tumpukan cenderung meningkat.



Gambar 7. Diagram Klasifikasi Sudut *Natural angle of repose*

Berdasarkan klasifikasi sudut *Natural angle of response*, sebagian besar hasil pengukuran berada pada rentang 37°–40° yang termasuk kategori kurang stabil (kritis), sedangkan pada titik pengukuran ke-5 dan ke-6 nilai sudut telah mencapai lebih dari 40° yang mengindikasikan kondisi tumpukan mendekati kategori tidak stabil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tumpukan material belerang pada area *open storage* PT. PKG berpotensi mengalami longsoran lokal apabila terjadi gangguan berupa getaran dari alat berat, aktivitas pemindahan material, atau pengaruh kondisi lingkungan. Oleh karena itu, nilai sudut tumpukan yang diperoleh perlu menjadi perhatian dalam menentukan batas aman penumpukan material guna menjaga kestabilan dan keselamatan operasional di area penyimpanan.

Untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel terhadap sudut tumpukan, dilakukan analisis regresi linear menggunakan data ukuran partikel material belerang. Hasil perhitungan menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut:

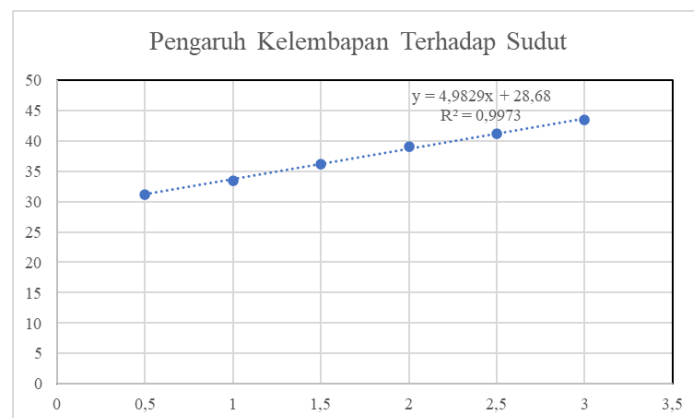


Gambar 8. Bubble Chart Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Sudut

$$\theta = 32,195 + 0,0045(\mu m)$$

Koefisien regresi sebesar 0,0045 menunjukkan bahwa setiap peningkatan ukuran partikel sebesar 1 μm akan meningkatkan sudut tumpukan sebesar 0,0045°. Nilai koefisien yang positif menunjukkan bahwa ukuran partikel memiliki hubungan yang searah dengan sudut tumpukan. Material dengan ukuran partikel yang lebih besar cenderung memiliki gaya gesek antarpartikel yang lebih tinggi sehingga mampu membentuk tumpukan dengan kemiringan yang lebih besar dibandingkan material berukuran halus.

Analisis regresi linier dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kelembapan material dan sudut tumpukan yang terbentuk. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh persamaan regresi:

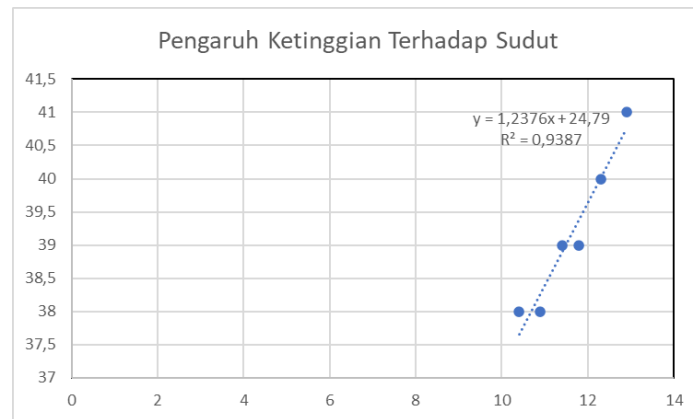


Gambar 9 Bubble Chart Pengaruh Kelembapan Terhadap Sudut

$$\theta = 28,68 + 4,9829(RH)$$

Koefisien regresi sebesar 4,9829 menunjukkan bahwa setiap peningkatan kelembapan material sebesar 1% akan meningkatkan sudut tumpukan sebesar 4,9829°. Hal ini menunjukkan bahwa kelembapan memiliki pengaruh positif terhadap nilai *natural angle of repose* karena meningkatkan kohesi antarpartikel material.

Analisis regresi linier sederhana dilakukan untuk mengetahui hubungan antara tinggi tumpukan material belerang dan sudut tumpukan yang terbentuk. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh persamaan regresi sebagai berikut:

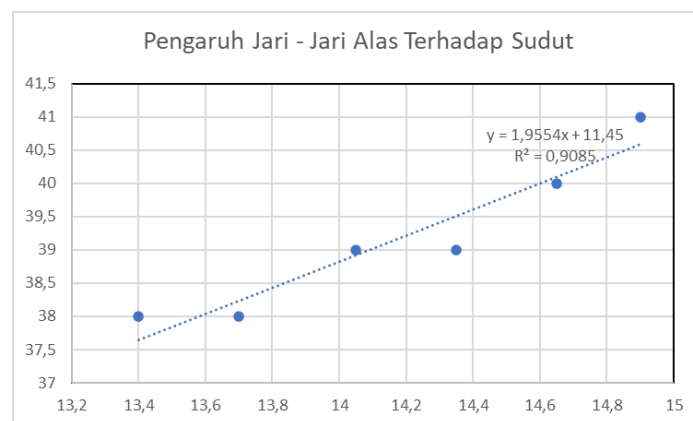


Gambar 10 Bubble Chart Pengaruh Tinggi Tumpukan Terhadap Sudut

$$\theta = 24,79 + 1,2376h$$

Nilai koefisien regresi sebesar 1,2376 menunjukkan bahwa setiap kenaikan tinggi tumpukan sebesar 1 meter akan meningkatkan sudut tumpukan sebesar 1,2376°. Koefisien bernilai positif menunjukkan adanya hubungan searah antara tinggi tumpukan dan sudut tumpukan. Semakin tinggi material yang ditumpuk, sudut kemiringan yang terbentuk akan semakin besar. Hasil tersebut sesuai dengan teori *Natural angle of repose* yang menyatakan bahwa peningkatan rasio tinggi terhadap alas akan menghasilkan lereng yang lebih curam.

Analisis regresi linier juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antara jari-jari alas tumpukan dengan sudut tumpukan material belerang. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh persamaan regresi:



Gambar 11 Bubble Chart Pengaruh Jari – Jari Alas Terhadap Sudut

$$\theta = 11,45 + 1,9554r$$

Koefisien regresi sebesar 1,9554 menunjukkan bahwa setiap kenaikan jari-jari alas tumpukan sebesar 1 meter diikuti oleh kenaikan sudut tumpukan sebesar 1,9554°. Hubungan positif ini terjadi pada data penelitian karena peningkatan jari-jari alas berlangsung bersamaan dengan peningkatan tinggi tumpukan. Oleh karena itu, meskipun secara teoritis jari-jari alas yang lebih besar cenderung menghasilkan lereng yang lebih landai, pada kondisi aktual penelitian peningkatan tinggi tumpukan lebih dominan sehingga sudut tumpukan tetap meningkat.

Penilaian kestabilan tumpukan material belerang dilakukan dengan menghitung nilai Faktor Keamanan (*Factor of Safety/FS*). Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng tumpukan melalui perbandingan antara sudut geser internal material dan sudut kemiringan aktual tumpukan. Nilai FS dihitung menggunakan persamaan.

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta}$$

Dengan asumsi :

$$\phi = 39,29^\circ$$

Maka $\tan \phi$:

$$\tan 39,29^\circ = 0,819$$

Diperoleh tabel perhitungan sebagai berikut :

Tabel 6. Tabel Analisa *Factor of Safety*

No	Sudut Tumpukan (θ)	$\tan \theta$	$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta}$	Kriteria
1	37,8	0,775	1,057	Stabil
2	38,41	0,793	1,033	Stabil
3	39,12	0,812	1,009	Stabil
4	39,44	0,823	0,995	Kritis
5	40,05	0,841	0,974	Tidak Stabil
6	40,89	0,866	0,946	Tidak Stabil

Berdasarkan hasil perhitungan faktor keamanan (*Factor of Safety*), diperoleh nilai FS berkisar antara 0,946 dan 1,057. Tiga titik pengamatan pertama memiliki nilai FS lebih besar dari 1 sehingga tergolong stabil. Pada titik pengamatan keempat diperoleh nilai FS sebesar 0,995 yang sangat mendekati 1, sehingga dapat dikategorikan sebagai kondisi kritis. Sementara itu, titik pengamatan kelima dan keenam memiliki nilai FS kurang dari satu, yaitu masing-masing sebesar 0,974 dan 0,946, yang menunjukkan bahwa tumpukan berada dalam kondisi tidak stabil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan tumpukan menyebabkan penurunan nilai faktor keamanan. Semakin besar sudut kemiringan aktual mendekati atau melebihi sudut geser internal material, maka kemampuan material untuk mempertahankan kestabilannya akan semakin berkurang sehingga risiko terjadinya longsoran lokal menjadi lebih tinggi. Secara keseluruhan, rata-rata kondisi tumpukan material belerang pada area *open storage* PT. PKG berada pada kondisi stabil hingga kritis dan memerlukan pengendalian kemiringan untuk menjaga nilai faktor keamanan tetap di atas 1.

Pembahasan

Pada bab ini dibahas hasil penelitian yang diperoleh dari pengukuran sudut tumpukan (*natural angle of repose*) material belerang di area *open storage* PT. PKG. Pembahasan difokuskan pada analisis nilai sudut tumpukan yang terbentuk, pengaruh ukuran partikel terhadap

kemiringan tumpukan, serta tingkat kestabilan material berdasarkan klasifikasi *Natural angle of repose*. Hasil penelitian selanjutnya dibandingkan dengan teori dan penelitian terdahulu untuk mengetahui kesesuaian karakteristik material belerang terhadap perilaku material granular. Melalui pembahasan ini diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai kondisi aktual kestabilan tumpukan material belerang serta faktor-faktor yang memengaruhinya, sehingga dapat menjadi dasar dalam pengelolaan area penyimpanan yang lebih aman dan efektif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *natural angle of repose* material belerang di area *open storage* PT. PKG berada pada rentang $37,80^{\circ}$ – $40,89^{\circ}$ dengan nilai rata-rata $39,29^{\circ}$. Berdasarkan klasifikasi sudut tumpukan yang digunakan dalam penelitian ini, nilai tersebut termasuk dalam kategori kurang stabil (kritis) karena berada pada rentang 37° – 40° . Bahkan, beberapa titik pengamatan telah mendekati kategori tidak stabil ($>40^{\circ}$). Kondisi ini menunjukkan bahwa kemiringan tumpukan material belerang telah mendekati batas kestabilan alami sehingga berpotensi mengalami longsor apabila terdapat gangguan eksternal seperti getaran alat berat, hujan, maupun penambahan material secara terus-menerus.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Li et al., 2025) yang menyatakan bahwa nilai *angle of repose* meningkat seiring bertambahnya koefisien gesekan dan perubahan karakteristik partikel. Pada penelitian tersebut diperoleh nilai *angle of repose* sekitar 30° – 33° pada kondisi tertentu, sedangkan pada penelitian ini diperoleh nilai yang lebih tinggi, yaitu $37,80^{\circ}$ – $40,89^{\circ}$. Perbedaan tersebut disebabkan oleh objek penelitian yang berbeda, di mana penelitian Li et al. menggunakan simulasi material sinter dalam lingkungan terkontrol, sedangkan penelitian ini menggunakan material belerang aktual pada area *open storage* yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan proses penumpukan di lapangan.

Penelitian ini juga menunjukkan hasil yang serupa dengan penelitian Kajiyama et al. (2024), yang menemukan bahwa distribusi ukuran butir berpengaruh terhadap nilai *angle of repose*. Hasil pengujian ukuran partikel pada penelitian ini menunjukkan bahwa partikel berukuran $250\ \mu\text{m}$ menghasilkan sudut rata-rata $33,2^{\circ}$, partikel berukuran $750\ \mu\text{m}$ menghasilkan sudut $35,8^{\circ}$, dan partikel berukuran $1500\ \mu\text{m}$ menghasilkan sudut $38,9^{\circ}$. Temuan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar ukuran partikel, sudut tumpukan cenderung meningkat. Hasil ini konsisten dengan penelitian Kajiyama et al. yang menyatakan bahwa distribusi ukuran partikel yang lebih kasar mampu menghasilkan sudut tumpukan yang lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan ukuran partikel yang lebih halus.

Pengaruh kelembapan material yang diperoleh pada penelitian ini juga mendukung hasil penelitian (Chen et al., 2025) dan (Widjaja, 2019). Pada penelitian ini, sudut tumpukan meningkat dari $31,1^{\circ}$ pada kelembapan 0,5% menjadi $43,4^{\circ}$ pada kelembapan 3%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kadar air menyebabkan kohesi antarpartikel bertambah, sehingga material mampu membentuk tumpukan yang lebih curam. Hasil ini sesuai dengan penelitian Chen et al. yang menunjukkan bahwa variasi *moisture content* memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai *angle of repose* pada material granular. Penelitian Widjaja pada material lumpur vulkanik juga menemukan hubungan berbanding lurus antara kadar air dan *angle of repose*, sehingga hasil penelitian ini semakin memperkuat bahwa kelembapan merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi kestabilan material curah.

Jika dibandingkan dengan penelitian (Listyawan et al., 2020) pada campuran pasir dan lempung, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa peningkatan kadar lempung dan kadar air

meningkatkan sudut tenang material. Hasil yang diperoleh pada material belerang menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu semakin tinggi kelembapan, semakin besar sudut tumpukan. Meskipun jenis material yang digunakan berbeda, mekanisme yang terjadi relatif sama, yaitu peningkatan gaya kohesi antarpartikel yang menyebabkan material mampu mempertahankan kemiringan yang lebih curam.

Penelitian (Schlick-Hasper et al., 2022) melaporkan rentang nilai *angle of repose* material serbuk dan granular antara 18° – 54° tergantung pada jenis material dan metode pengukuran yang digunakan. Nilai *angle of repose* material belerang yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang tersebut. Namun demikian, nilai rata-rata $39,29^{\circ}$ yang diperoleh menunjukkan bahwa material belerang memiliki karakteristik aliran yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan material granular yang memiliki sudut tumpukan kecil. Semakin besar sudut tumpukan, semakin sulit material mengalir dan cenderung membentuk lereng yang lebih curam.

Berdasarkan hasil regresi linier, tinggi tumpukan memiliki hubungan positif terhadap sudut tumpukan dengan persamaan $\theta = 24,79 + 1,2376h$, sedangkan jari-jari alas memiliki hubungan yang dinyatakan oleh persamaan $\theta = 11,45 + 1,9554r$. Selain itu, ukuran partikel dan kelembapan juga menunjukkan hubungan positif terhadap sudut tumpukan melalui persamaan $\theta = 32,195 + 0,0045(\mu m)$ dan $\theta = 28,68 + 4,9829RH$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tinggi tumpukan, ukuran partikel, dan kelembapan merupakan faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai *natural angle of repose*. Temuan ini memperkuat hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa karakteristik fisik material dan kondisi lingkungan berpengaruh langsung terhadap pembentukan sudut tumpukan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memiliki keterbaruan dibandingkan penelitian sebelumnya karena tidak hanya mengkaji pengaruh ukuran partikel atau kelembapan di laboratorium, tetapi juga mengevaluasi kondisi aktual tumpukan material belerang di area *open storage* menggunakan pendekatan *Natural angle of repose* dan *Factor of Safety*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar tumpukan material belerang berada pada kondisi kritis dengan nilai sudut mendekati batas ketidakstabilan. Oleh karena itu, pengendalian tinggi tumpukan, ukuran material, dan kelembapan perlu dilakukan untuk menjaga kestabilan tumpukan serta meminimalkan risiko longsor selama proses penyimpanan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis kemiringan tumpukan material belerang di area open storage PT. PKG menggunakan metode *Natural angle of repose*, serta berdasarkan hasil pengukuran lapangan, perhitungan faktor keamanan, pengujian ukuran partikel, dan analisis kelembapan material, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai Natural Angle of Repose material belerang di area *open storage* PT. PKG berkisar antara $37,80^{\circ}$ – $40,89^{\circ}$, dengan nilai rata-rata $39,29^{\circ}$.
2. Kemiringan aktual tumpukan umumnya telah mendekati Natural Angle of Repose. Namun, berdasarkan klasifikasi sudut, sebagian besar sampel berada pada kategori kurang stabil, bahkan beberapa sampel termasuk tidak stabil karena memiliki sudut di atas 40° .

3. Hasil regresi linier menunjukkan bahwa tinggi tumpukan, kelembapan, dan ukuran partikel berpengaruh positif terhadap sudut kemiringan, sedangkan jari-jari alas berpengaruh negatif.
4. Berdasarkan hasil analisis, pengendalian dimensi tumpukan, ukuran partikel, dan kelembapan material perlu dilakukan agar kemiringan tumpukan tetap berada pada kondisi yang aman dan risiko longsoran dapat diminimalkan

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka beberapa saran yang dapat diberikan untuk perusahaan maupun penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Bagi PT. PKG, disarankan melakukan pemantauan kemiringan dan tinggi tumpukan material belerang secara berkala serta mengendalikan proses penimbunan agar sudut kemiringan tidak melebihi nilai *Natural Angle of Repose*, sehingga risiko longsoran dapat diminimalkan.
2. Bagi akademisi, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan kajian mengenai kestabilan material granular, khususnya penerapan metode *Natural Angle of Repose* pada material curah di area *open storage*.
3. Bagi masyarakat dan praktisi, penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman mengenai pentingnya pengendalian kemiringan tumpukan material granular sebagai upaya meningkatkan keselamatan kerja dan keamanan penyimpanan material.
4. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan jumlah sampel yang lebih banyak, periode pengamatan yang lebih panjang, serta menambahkan variabel seperti densitas material, curah hujan, dan getaran alat berat atau mengombinasikan metode *Natural Angle of Repose* dengan analisis numerik kestabilan lereng agar diperoleh hasil yang lebih komprehensif. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan untuk menggunakan jumlah data pengamatan yang lebih banyak dan periode pengamatan yang lebih panjang agar diperoleh hasil analisis yang lebih representatif. Selain itu, penelitian dapat dikembangkan dengan menambahkan variabel lain seperti densitas material, distribusi ukuran partikel yang lebih rinci, pengaruh curah hujan, pengaruh getaran alat berat, serta analisis numerik kestabilan lereng sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku tumpukan material belerang pada area penyimpanan terbuka.

Daftar Pustaka

- Chen, Z., Che, G., Wan, L., Wang, H., & Zhang, K. (2025). Calibration and Experimental Validation of Discrete Element Parameters for Long-Grain Rice with Different Moisture Contents Based on Repose Angle. *Agriculture (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture15101058>
- Dong, H., Wang, J., Zhang, D., Xu, Y., & Li, Z. (2022). *Microscopic Mechanism Angle of Repose in Friable Loess and Its Relationship With Slope Angle*. 9(January), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.777467>
- Elekes, F., & Parteli, E. J. R. (2021). An expression for the angle of repose of dry cohesive granular materials on Earth and in planetary environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(38).

<https://doi.org/10.1073/pnas.2107965118>

- Fu, J., Chen, C., Ferellec, J., & Yang, J. (2020). *Effect of Particle Shape on Repose Angle Based on Hopper Flow Test and Discrete Element Method*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8811063>
- Kajiyama, S., Nakata, Y., & Nakase, H. (2024). Fundamental study on the effect of grain size distribution on angle of repose. *E3S Web of Conferences*, 544. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454401007>
- Lanzerstorfer, C. (2017). Dusts from dry off-gas cleaning : comparison of flowability determined by angle of repose and with shear cells. *Granular Matter*, 19(3), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0745-2>
- Li, M., Yu, Y., & Saxén, H. (2025). Computational study of the effect of friction coefficients and particle shape on the repose angle and porosity of sinter piles. *Particuology*, 98, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2025.01.020>
- Listyawan, A. B., Wiqoyah, Q., & Pradana, A. G. (2020). *Sudut Tenang Pasir Pantai dan Pasir Merapi Pada Kondisi Runtuh Dengan Variasi Kadar Lempung*. 4(2), 161–171.
- Macho, O., Peciar, P., & Fekete, R. (2020). ANALYSIS OF STATIC ANGLE OF REPOSE WITH RESPECT TO. 60(1), 73–80. <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0073>
- Müller, D., Fimbingier, E., & Brand, C. (2021). Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. *Powder Technology*, 383, 598–605. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2021.01.010>
- Rackl, M., Grötsch, F. E., & Günthner, W. A. (2017). *Angle of repose revisited : When is a heap a cone ? 02002*, 1–4.
- Schlick-Hasper, E., Bethke, J., Vogler, N., & Goedecke, T. (2022). Flow properties of powdery or granular filling substances of dangerous goods packagings—Comparison of the measurement of the angle of repose and the determination of the Hausner ratio. *Packaging Technology and Science*, 35(10), 765–782. <https://doi.org/10.1002/pts.2678>
- Widjaja, B. (2019). *STUDI ANGLE OF REPOSE MUD VOLCANO*. 4(2007), 96–101.
- Willibald, C., Löwe, H., Theile, T., & Dual, J. (2020). *Angle of repose experiments with snow : role of grain shape and cohesion*. 1–9.