

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Material belerang merupakan salah satu bahan baku penting dalam industri kimia yang banyak dimanfaatkan untuk produksi asam sulfat, pupuk, dan berbagai produk kimia lainnya. Di PT. XXX, material belerang disimpan pada area *open storage* dalam bentuk tumpukan (*stockpile*) sebelum digunakan atau didistribusikan. Sistem penyimpanan tersebut memberikan keuntungan dari segi kapasitas dan kemudahan penanganan, namun juga memiliki potensi risiko apabila dimensi dan kemiringan tumpukan tidak dikendalikan dengan baik. Tumpukan yang terlalu curam dapat mengalami longsoran sehingga berpotensi menyebabkan kehilangan material, mengganggu aktivitas operasional, serta meningkatkan risiko kecelakaan kerja.

Kestabilan tumpukan material granular dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tinggi tumpukan, jari-jari alas, ukuran partikel, kadar kelembapan, bentuk partikel, dan gesekan antarpartikel. Salah satu parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi kestabilan material granular adalah Natural Angle of Repose (AoR), yaitu sudut maksimum yang terbentuk secara alami antara permukaan tumpukan material dan bidang horizontal setelah material ditumpahkan. Nilai *Natural Angle of Repose* mencerminkan karakteristik aliran (*flowability*) dan kestabilan material, dimana semakin besar sudut yang terbentuk maka kecenderungan material membentuk tumpukan yang curam juga semakin tinggi.

Penyimpanan material curah di area *open storage* adalah bagian penting dalam operasional industri pertambangan dan bahan baku. Material granular seperti belerang ditumpuk dalam jumlah besar sebelum diproses atau dikirimkan, sehingga kestabilan kemiringan tumpukan menjadi faktor kunci untuk menghindari kegagalan lereng yang berpotensi membahayakan keselamatan kerja dan 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* dapat didefinisikan sebagai sudut kemiringan maksimum suatu material granular yang ditumpuk di atas bidang horizontal tanpa mengalami longsoran atau keruntuhan (Macho et al., 2020).

Natural angle of repose bahan granular merupakan parameter penting untuk memahami perilaku mikro bahan granular (Fu et al., 2020).

Natural angle of repose sering digunakan sebagai indikator kemampuan mengalir bahan granular (Lanzerstorfer, 2017). *Natural angle of repose* merupakan salah satu parameter utama dalam karakterisasi material curah karena mudah diukur dan berkaitan dengan sifat aliran material, seperti gesekan antarpartikel dan perilaku aliran serbuk atau granular. Namun demikian, nilai sudut diam bukan merupakan sifat intrinsik material, karena dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti ukuran dan bentuk partikel, kadar air, serta metode pengujian yang digunakan (Müller et al., 2021). Peran bentuk butiran dalam eksperimen sudut istirahat, yang merupakan metode umum untuk karakterisasi bahan granular (Willibald et al., 2020). *Natural angle of repose* merupakan nilai yang sering dilaporkan dalam karakterisasi bahan padat curah, dan popularitasnya berdasarkan pada pengaturan pengukuran yang sederhana (Rackl et al., 2017).

Sudut istirahat memainkan peran penting dalam stabilitas lereng (Dong et al., 2022) . Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa pengukuran *angle of repose* sangat berguna dalam aplikasi teknik, termasuk perancangan kemiringan tumpukan material, desain peralatan penanganan material, serta evaluasi aliran material dalam hopper dan silo. Nilai sudut istirahat yang lebih besar menunjukkan kecenderungan aliran yang lebih rendah, sedangkan nilai yang lebih kecil menunjukkan aliran material yang lebih mudah. Dalam studi eksperimental lain terhadap material granular, ditemukan bahwa faktor fisik seperti bentuk partikel dan kohesi material secara signifikan memengaruhi sudut istirahat, sehingga *angle of repose* “merupakan salah satu parameter paling penting yang menggambarkan sifat fisik dan mekanik material granular” (Elekes & Parteli, 2021).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu mengenai *angle of repose* lebih banyak berfokus pada material seperti pasir, bijih mineral, atau material pertanian, sedangkan kajian khusus mengenai sudut istirahat material belerang masih relatif terbatas. Belerang sebagai material granular memiliki karakteristik fisik yang berbeda dibandingkan material lain, sehingga perlu

dilakukan penelitian secara empiris untuk mengetahui nilai sudut istirahat yang valid di lapangan, terutama di area *open storage*. Penelitian semacam ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa tumpukan belerang disusun dalam kemiringan yang aman dan stabil serta tidak menimbulkan risiko longsor yang dapat membahayakan keselamatan dan operasi perusahaan.

Material belerang yang disimpan dalam bentuk tumpukan terbuka memiliki potensi risiko longsor apabila sudut kemiringannya melebihi batas kestabilan material. Salah satu parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi stabilitas material granular adalah sudut diam (*angle of repose*), yang didefinisikan sebagai sudut maksimum antara permukaan tumpukan material dan bidang horizontal dimana material masih berada dalam kondisi stabil (Easter et al., 2024).

Berdasarkan hal tersebut, diperlukan penelitian yang mendalami aspek kemiringan tumpukan belerang di *open storage* PT. XXX melalui pendekatan *natural angle of repose*. Area *open storage* PT. XXX digunakan sebagai tempat penumpukan material belerang hasil produksi sebelum dilakukan proses distribusi atau pengolahan lanjutan. Berdasarkan hasil observasi lapangan, kondisi tumpukan material belerang menunjukkan variasi kemiringan yang tidak seragam akibat metode penimbunan yang masih mengandalkan kebiasaan operasional dan keterbatasan area penyimpanan. Dalam praktiknya, tinggi dan sudut kemiringan tumpukan sering kali tidak terkontrol secara teknis, sehingga berpotensi melebihi batas kemiringan aman material granular. Selain itu, faktor sifat fisik material belerang seperti ukuran butir, bentuk partikel, serta kondisi kelembapan lingkungan turut memengaruhi kestabilan tumpukan. Kondisi ini menimbulkan risiko terjadinya longsor material, gangguan operasional, serta potensi bahaya keselamatan kerja di area *open storage*. Namun demikian, hingga saat ini belum terdapat analisis teknis yang secara kuantitatif mengevaluasi kesesuaian sudut kemiringan aktual tumpukan material belerang terhadap nilai *Natural Angle of Repose* sebagai parameter kestabilan tumpukan. Oleh karena itu, diperlukan suatu penelitian yang mampu menganalisis kemiringan tumpukan material belerang secara sistematis dan terukur guna memastikan kondisi penyimpanan yang aman dan sesuai standar teknis.

Menurut peneliti, analisis kemiringan tumpukan material belerang menggunakan metode *Natural Angle of Repose* merupakan pendekatan yang tepat dan relevan untuk menilai kestabilan tumpukan di area *open storage* PT. XXX, karena metode ini mampu mengaitkan kondisi geometrik tumpukan dengan sifat fisik material secara objektif. Dengan membandingkan sudut kemiringan aktual hasil pengukuran lapangan terhadap nilai sudut alami material, perusahaan dapat memperoleh dasar teknis yang jelas dalam menentukan batas aman penimbunan. Peneliti meyakini bahwa penerapan hasil analisis ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan keselamatan kerja dan pengurangan risiko longsoran material, tetapi juga dapat menjadi acuan dalam perbaikan sistem penataan dan pengelolaan stockpile secara berkelanjutan di lingkungan industri. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas tentang karakteristik kemiringan stabil belerang serta rekomendasi teknis untuk meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi penyimpanan. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi acuan bagi manajemen PT. XXX dalam pengendalian operasional penyimpanan material curah secara aman dan efektif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai *natural angle of repose* pada tumpukan material belerang di area *open storage* PT. XXX?
2. Apakah kemiringan aktual tumpukan material belerang di area *open storage* PT. XXX telah sesuai dengan nilai *natural angle of repose* material tersebut?
3. Faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi kemiringan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. XXX?
4. Bagaimana tingkat kestabilan tumpukan material belerang berdasarkan hasil analisis *natural angle of repose*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui nilai *natural angle of repose* pada material belerang di area *open storage* PT. XXX.
2. Mengetahui kesesuaian kemiringan aktual tumpukan material belerang dengan nilai *natural angle of repose*.
3. Mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kemiringan dan kestabilan tumpukan material belerang di area *open storage*.
4. Mengetahui tingkat kestabilan tumpukan material belerang berdasarkan metode *natural angle of repose*.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat untuk mahasiswa:

1. Menambah khazanah ilmu pengetahuan dalam bidang teknik, khususnya terkait analisis kemiringan dan kestabilan tumpukan material curah menggunakan metode *natural angle of repose*.
2. Memberikan pemahaman ilmiah mengenai karakteristik fisik material belerang dalam kondisi penyimpanan terbuka (*open storage*).
3. Membantu mahasiswa mengembangkan penalaran logis dan kemampuan evaluasi teknis terkait desain stockpile material curah.
4. Menjadi pengalaman langsung dalam penelitian ilmiah, mulai dari studi literatur, pengumpulan data, hingga analisis dan interpretasi.

1.4.2 Manfaat untuk perguruan tinggi:

1. Menambah sumber referensi akademik yang relevan untuk bidang pertambangan, teknik lingkungan, atau teknik material.
2. Meningkatkan kualitas penelitian mahasiswa, sehingga mendukung reputasi akademik perguruan tinggi.
3. Menjadi bahan ajar praktis untuk mata kuliah terkait manajemen material curah dan keselamatan kerja.

4. Memberikan data empiris untuk pengembangan laboratorium atau fasilitas penelitian perguruan tinggi.

1.4.3 Manfaat untuk perusahaan:

1. Memberikan informasi mengenai kondisi aktual kemiringan tumpukan material belerang di area *open storage* PT. XXX.
2. Membantu perusahaan dalam menilai tingkat kestabilan dan keamanan tumpukan material belerang berdasarkan parameter teknis yang terukur.
3. Menjadi dasar pertimbangan dalam penetapan standar operasional kemiringan tumpukan material belerang.
4. Mendukung upaya peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dengan meminimalkan risiko longsor material.

1.4.4 Manfaat untuk peneliti selanjutnya:

1. Menjadi referensi empiris untuk penelitian terkait kestabilan tumpukan material curah lainnya, misalnya batubara, pasir, atau bijih mineral.
2. Memberikan metodologi yang dapat dikembangkan untuk penelitian dengan variabel tambahan, seperti suhu atau curah hujan.
3. Menjadi acuan untuk penelitian perbandingan antara metode *natural angle of repose* dan metode lain dalam analisis tumpukan material
4. Memberikan basis data awal yang dapat digunakan dalam penelitian simulasi atau modeling kestabilan stockpile.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terfokus, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada tumpukan material belerang yang berada di area *open storage* PT. XXX.
2. Analisis kemiringan tumpukan dilakukan menggunakan metode *natural angle of repose* tanpa mempertimbangkan metode analisis kestabilan lainnya.

3. Parameter yang dianalisis terbatas pada kemiringan tumpukan, tinggi tumpukan, dan karakteristik fisik material belerang yang berpengaruh terhadap *angle of repose* dan tidak melibatkan pengaruh ukuran partikel
4. Pengaruh faktor eksternal seperti cuaca ekstrem, reaksi kimia curah hujan, dan aktivitas alat berat hanya ditinjau secara umum dan tidak dianalisis secara mendalam.