

**ANALISIS PENYANGGA ARCIS
PADA LUBANG SAWAHLUWUNG
PT BUKIT ASAM TBK UNIT PERTAMBANGAN OMBILIN**

TUGAS AKHIR



**AFRILIA DUWI WIJAYA
2023310034**

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PRABUMULIH
2026**

**ANALISIS PENYANGGA ARCIS
PADA LUBANG SAWAHLUWUNG
PT BUKIT ASAM TBK UNIT PERTAMBANGAN OMBILIN**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Ahli Madya
Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Prabumulih



**AFRILIA DUWI WIJAYA
2023310034**

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PRABUMULIH
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENYANGGA ARCIS PADA LUBANG SAWAHLUWUNG PT BUKIT ASAM TBK UNIT PERTAMBANGAN OMBILIN

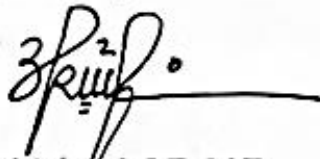
TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Ahli Madya
Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Prabumulih

Oleh:
Afrilla Duwi Wijaya
2023310034

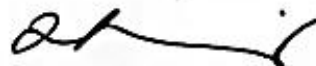
Prabumulih, 18 Juni 2026

Pembimbing I



Reni Arisanti, S.T., M.T
NUPTK. 1439755655300002

Pembimbing II



Ahmad Husni, S.T., M.T
NUPTK. 63387476500003

Ketua Program Studi
Teknik Pertambangan



Ridho Yovanda, S.T., M.T
NUPTK. 250771672130283

HALAMAN PERSETUJUAN

Tugas Akhir dengan judul "Analisis Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung PT Unit Pertambangan Ombilin" telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Sidang Tugas Akhir Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik, Universitas Prabumulih pada hari Kamis, 18 Juni 2026, dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai dengan masukan Tim Penguji Sidang Tugas Akhir.

Prabumulih, 18 Juni 2026

Tim Penguji Sidang Tugas Akhir

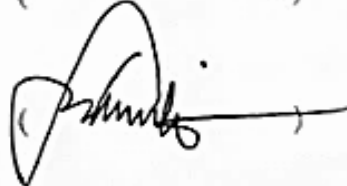
Ketua :

1. Reni Arisanti, S.T., M.T
NUPTK.1439755655300002

()

Anggota :

2. Ahmad Husni, S.T., M.T
NUPTK.6338747650200003
3. Suhardiman Gumanti, S.T., M.T
NUPTK.7553748650200002

()
()



Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ir. Aris Susilo, S.T., M.T., IPM.
NUPTK.9944755656130172



Ketua Program Studi
Teknik Pertambangan

Ridho Yovanda, S.T., M.T.
NUPTK.250771672130283

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Afrilia Duwi Wijaya
Nim : 2023310034
Prodi : Teknik Pertambangan
Judul : Analisis Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung PT Bukit Asam
TBK Unit Pertambangan Ombilin

Menyatakan bahwa Laporan Tugas Akhir saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Prabumulih sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksa paksaan dari siapapun.

Prabumulih, 18 Juni 2026

Yang Bersangkutan



Afrilia Duwi Wijaya

2023310034

ABSTRAK

Analisis Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung PT Bukit Asam TBK Unit Pertambangan Ombilin

Afrilia Duwi Wijaya, 2023310034, 2023

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi teknis aktual penyangga arcis dan mengevaluasi kontribusi kualitas material kayu terhadap umur pakai penyangga di lubang perawatan J38 Tambang Dalam Sawahluwung, PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin. Melalui metode pengamatan lapangan dan pengukuran deformasi spasial terhadap 19 unit arcis baja SS400, hasil penelitian menunjukkan adanya penyusutan dimensi lubang akibat konvergensi atap yang menurunkan tinggi dari 2,80 meter menjadi 2,70 meter, serta penyempitan dinding dari 4,40 meter menjadi 4,29 meter. Penurunan efektivitas penyangga ini dipicu oleh ketidaksempurnaan pemasangan kayu pengganjal yang menyisakan rongga (*void*), sehingga menyebabkan distribusi beban tidak merata (*point loading*) pada struktur baja. Selain itu, tingginya tingkat kelembapan udara (RH 89,0%) mempercepat degradasi biologis berupa serangan jamur dan rayap pada kayu Meranti Kelas Kuat II, yang secara drastis memangkas umur pakainya dari 2 tahun menjadi hanya 1-2 bulan. Material kayu berfungsi sebagai peredam energi memaksa beban batuan bertumpu langsung pada baja arcis yang juga mulai mengalami korosi termakan usia, sehingga diperlukan optimalisasi metode pengisian rongga yang rapat serta perlakuan pengawetan kayu untuk mencegah kegagalan struktur penyangga secara menyeluruh.

Kata Kunci: Penyangga Arcis, Tambang Bawah Tanah, Konvergensi, *Point Loading*, Kayu Meranti.

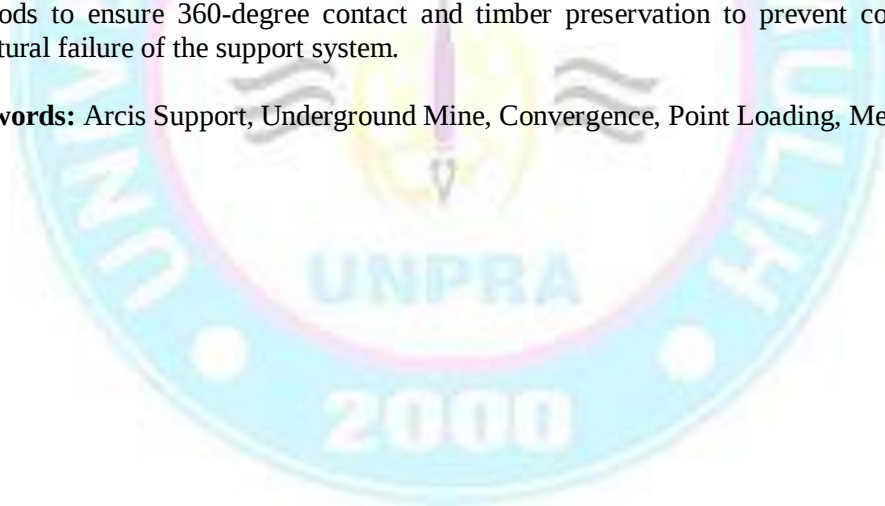
ABSTRACT

Analysis of Steel Arch Supports at Sawahluwung Tunnel PT Bukit Asam TBK Ombilin Mining Unit

Afrilia Duwi Wijaya, 2023310034, 2023

This study aims to analyze the actual technical condition of arch supports and evaluate the contribution of timber material quality to the service life of the supports in the J38 maintenance drift of the Sawahluwung Underground Mine, PT Bukit Asam Tbk Ombilin Mining Unit. Through field observations and spatial deformation measurements of 19 units of SS400 steel arches, the results indicate a reduction in drift dimensions due to roof convergence, which decreased the height from 2.80 meters to 2.70 meters, and sidewall convergence, which narrowed the width from 4.40 meters to 4.29 meters. The decline in support effectiveness is triggered by the imperfect installation of the blocking timber, leaving voids that cause uneven load distribution (point loading) on the steel structure. Furthermore, the high relative humidity (RH 89.0%) accelerates biological degradation, such as fungi and termite attacks on the Class II Meranti timber, drastically reducing its service life from 2 years to merely 1-2 months. The failure of the timber to function as an energy absorber forces the rock load to rest directly on the aging and corroding steel arches, necessitating immediate improvements in void-filling methods to ensure 360-degree contact and timber preservation to prevent comprehensive structural failure of the support system.

Keywords: Arcis Support, Underground Mine, Convergence, Point Loading, Meranti Wood.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung PT Bukit Asam Unit Pertambangan Ombilin” laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Ahli Madya Di Program studi D3 Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Prabumulih. Penulisan banyak menerima bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Yuniar Pratiwi, S.Si., M.Si. Selaku Rektor Universitas Prabumulih
2. Bapak Dr. Ir Aris Susilo, S.T., M.T., IPM Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Prabumulih.
3. Bapak Ridho Yovanda, S.T., M.T. Selaku Ketua Program Studi Teknik Pertambangan.
4. Ibu Reni Arisanti, S.T., M.T Sebagai Pembimbing I
5. Bapak Ahmad Husni, S.T., M.T Sebagai Pembimbing 2
6. Bapak Suhardiman Gumanti, S.T., M.T Sebagai penguji
7. Bapak dan ibu Dosen Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Prabumulih.
8. Bapak dan Ibu Administrasi Fakultas Teknik Universita Prabumulih.
9. Kepada Perusahaan, Pimpinan, dan seluruh staf Perusahaan PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin yang telah memberikan izin dan membantu untuk melakukan penelitian.
10. Ucapan terima kasih yang tak terhingga penulis sampaikan kepada kedua orang tua tercinta. Terima kasih atas kasih sayang yang luar biasa, didikan, serta pengorbanan baik moril maupun materiil yang tidak pernah putus. Pencapaian ini tidak akan pernah terwujud tanpa untaian doa yang senantiasa dipanjatkan di setiap sujud dan langkah kalian. Karya ini adalah persembahan kecil untuk membalas setetes dari lautan keringat dan cinta kalian.
11. Kepada kedua kakakku tersayang, terima kasih atas segala dukungan, nasihat, dan bantuan yang selalu diberikan selama ini. Terima kasih telah

menjadi sosok pelindung, pendengar yang baik untuk setiap keluhan, serta pemberi semangat di saat-saat saya merasa lelah dan ragu. Kehadiranmu sangat berarti dalam proses penyelesaian tugas ini.

12. Untuk Teman-teman seperjuangan, ciwi-ciwi dan angkatan 2023, terima kasih atas tawa, canda, dan kebersamaan yang luar biasa. Terima kasih telah menjadi tempat berbagi beban, saling menguatkan di kala sulit begadang mengerjakan tugas, dan mewarnai hari-hari saya. Masa-masa perjuangan ini tidak akan terasa ringan dan berkesan tanpa kehadiran kalian semua.
13. Untuk sahabat terbaik saya, Andini dan Adeine, terima kasih telah menjadi bagian paling berwarna dalam perjalanan ini. Segala bentuk dukungan, motivasi, dan kesabaran kalian dalam menemani masa-masa sulit saya adalah sebuah anugerah yang sangat saya syukuri. Karya ini turut menjadi saksi atas indahnya persahabatan kita.
14. Terakhir, namun tak kalah penting, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada diri saya sendiri. Terima kasih karena sudah bertahan sejauh ini, terima kasih karena tidak menyerah pada keadaan di saat semuanya terasa sangat berat. Terima kasih atas segala kerja keras, air mata, kurang tidur, dan dedikasi yang tak kenal lelah. Terima kasih karena selalu percaya bahwa kamu bisa menyelesaikannya.

Prabumulih, 18 Juni 2026



Afrilia Duwi Wijaya

2023310034

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Deskripsi dan Sejarah Perusahaan.....	4
2.1.1 Peta Kesampaian Daerah.....	4
2.1.2 Peta Administrasi IUP Ombilin.....	6
2.1.3 Peta Geologi	8
2.1.4 Sejarah Perusahaan	9
2.2 Landasan Teori.....	11
2.2.1 Tambang Bawah Tanah.....	11
2.2.2 Definisi Penyangga Arcis (<i>Arch Support</i>).....	13
2.2.3 Komponen Penyangga Arcis	14
2.2.4 Analisis Kondisi Fisik Penyangga Arcis	15
2.2.5 Susunan Blok Kayu (<i>Cribbing</i>)	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	21

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	21
3.1.1 Lokasi Penelitian	21
3.1.2 Waktu Penelitian	22
3.2 Tahapan Penelitian.....	22
3.3 Bagan Alir Penelitian	25
3.4 Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data	26
3.4.1 Teknik Pengumpulan	26
3.4.2 Pengolahan Data	26
BAB IV PEMBAHASAN	28
4.1 Kondisi Aktual Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung	28
4.1.1 Luas Penampang	28
4.1.2 Spesifikasi dan Pemasangan Penyangga Arcis.....	31
4.1.3 Kondisi Aktual Penyangga Arcis.....	34
4.1.4 Analisis Penilaian Penyangga Arcis yang Terpasang.....	37
4.2 Evaluasi Kualitas Material Blok Kayu Terhadap Masa Pakai Arcis	39
4.2.1 Karakteristik dan Kelas Kayu.....	39
4.2.2 Kapasitas Dukung <i>Log</i> Kayu.....	40
4.2.3 Dampak Kondisi Kelembapan.....	41
4.2.4 Faktor Penentu Umur Pakai Arcis	42
4.2.5 Pengaruh Kualitas Blok Kayu Terhadap Arcis.....	43
BAB V PENUTUP.....	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....	48
LAMPIRAN	50

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 <i>Roof Convergence</i>	15
Tabel 2.2 Prediksi Aman.....	16
Tabel 2.3 <i>Sidewall Convergence</i>	16
Tabel 2.4 Prediksi Aman.....	16
Tabel 2.5 Kekuatan Kayu.....	20
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian.....	22
Tabel 4.1 Perhitungan Selisih Standar Desain Dengan Kondisi Aktual (<i>Overbreak</i> dan <i>Underbreak</i>).....	29
Tabel 4.2 Hasil Observasi	33
Tabel 4.3 Kondisi Geologis di J.38	34
Tabel 4.4 Spesifikasi Geometri dan Spasi Interval 5 Meter	35
Tabel 4.5 Ringkasan Data Observasi Lapangan J38	35
Tabel 4.6 Spesifikasi Material dan Kondisi Teknis Arcis (Lokasi J38).....	37
Tabel 4.7 Penilaian kondisi arcis.....	38
Tabel 4.8 Klasifikasi Kekuatan Kayu Untuk Penyanggaan Tambang.....	40
Tabel 4.9 Spesifikasi Dimensi dan Fungsionalitas Log Kayu Pada Lokasi J38	40
Tabel 4.10 Dampak Terhadap Masa Pakai.....	42
Tabel 4.11 Defleksi Arcis Akibat Kegagalan Material Kayu (Lokasi J38 - 5m).....	43
Tabel 4.12 Klasifikasi Pelapukan Kayu.....	44

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Peta Kesampaian Daerah IUP Ombilin PT Bukit Asam Tbk.....	4
Gambar 2.2 Peta Administrasi IUP Ombilin PT Bukit Asam Tbk.....	6
Gambar 2.3 Peta Geologi.....	8
Gambar 2.4 Visualisasi Ragka Baja Lengkung.....	13
Gambar 2.5 Penyanggaan Kayu Sawahluwung	19
Gambar 2.6 Blok Kayu (<i>Cribbing</i>).....	19
Gambar 3.1 Lokasi J.38 Lubang Sawahluwung.....	23
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Meteran.....	33
Gambar 4. 2 Arcis Di Lokasi Penelitian	34
Gambar 4.3 Baja SS400.....	35
Gambar 4.4 Blocking.....	35
Gambar 4.5 Interval 5 Meter.....	38
Gambar 4.6 Blok dan Batuan.....	39
Gambar 4.7 Anemometer.....	44

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A Data Pengukuran Lapangan	51
Lampiran B Spesifikasi Baja SS400	54
Lampiran C Dokumentasi Foto Lapangan	55



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin (UPO) merupakan salah satu pertambangan batubara tertua di Asia Tenggara yang memiliki nilai historis dan strategis yang tinggi. Sejak ditetapkan sebagai Situs Warisan Dunia UNESCO pada tahun 2019, fokus operasional di lubang tambangnya termasuk Lubang Sawahluwung, telah bertransformasi menjadi fasilitas pendidikan dan warisan industri. Meskipun aktivitas produksi komersial telah berkurang, pemeliharaan struktur lubang bukaan tetap harus dilakukan secara intensif demi keamanan operasional dan keselamatan pengunjung maupun tenaga teknis di lapangan (UNESCO, 2019).

Pada Lubang Sawahluwung, khususnya di lokasi perawatan J38, sistem penyangga yang digunakan adalah arcis (*arch support*) yang mengombinasikan kekuatan struktural baja SS400 dengan fleksibilitas kayu Meranti Kelas II sebagai pengganjal (*wood blocking*). Secara teoretis, sistem komposit ini dirancang untuk mendistribusikan beban batuan secara merata ke seluruh struktur busur baja melalui perantara kayu yang berfungsi sebagai bantalan penyerap energi. Namun, kondisi aktual di lapangan menunjukkan adanya tantangan teknis berupa ketidaksempurnaan pemasangan yang menyisakan rongga kosong (*void*) di antara busur baja dan permukaan dinding batuan.

Adanya rongga tersebut memicu fenomena *point loading*, di mana beban batuan hanya tertumpu pada titik-titik tertentu sehingga menyebabkan distribusi beban menjadi tidak merata pada struktur baja. Kondisi ini diperparah oleh faktor lingkungan di area J.38 yang memiliki tingkat kelembapan udara relatif (RH) sangat tinggi. Lingkungan yang sangat lembap ini mempercepat laju pelapukan biologis akibat serangan jamur dan rayap pada material kayu Meranti, sehingga umur pakai efektif kayu berkurang drastis dari estimasi normal 2 tahun menjadi hanya 1-2 bulan saja. Kegagalan kayu dalam menjalankan fungsinya mengakibatkan beban batuan langsung menumpu pada baja arcis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian mengenai Analisis Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung di PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin, maka permasalahan yang akan dikaji dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi aktual arcis pada lubang sawahluwung?
2. Bagaimana kualitas material blok kayu terhadap masa pakai arcis pada lubang sawahluwung?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi dan hanya berfokus pada Analisis Penyangga Arcis pada Lubang sawahluwung di PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menganalisis penyangga arcis pada lubang sawahluwung, sehingga mendapat tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis kondisi aktual penyangga arcis pada lubang sawahluwung.
2. Mengevaluasi kualitas material blok kayu terhadap umur pakai arcis pada lubang sawahluwung.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan pengetahuan yang dibutuhkan untuk memecahkan masalah dan membuat keputusan. Berikut manfaat penelitian secara teoritis dan praktis:

1. Manfaat Teoritis

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberi kontribusi kepada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik pertambangan khususnya dalam bidang penyangga arcis pada tambang bawah tanah, yang menggunakan material kayu sebagai sistem penyangga tradisional.

2. Manfaat Praktis

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada perusahaan pertambangan, khususnya dalam perawatan penyangga

arcis yang ada di Tambang dalam PT Bukit Asam UPO, sehingga perusahaan dapat mengetahui kualitas material blok kayu terhadap umur pakai arcis pada lubang sawahluwung.



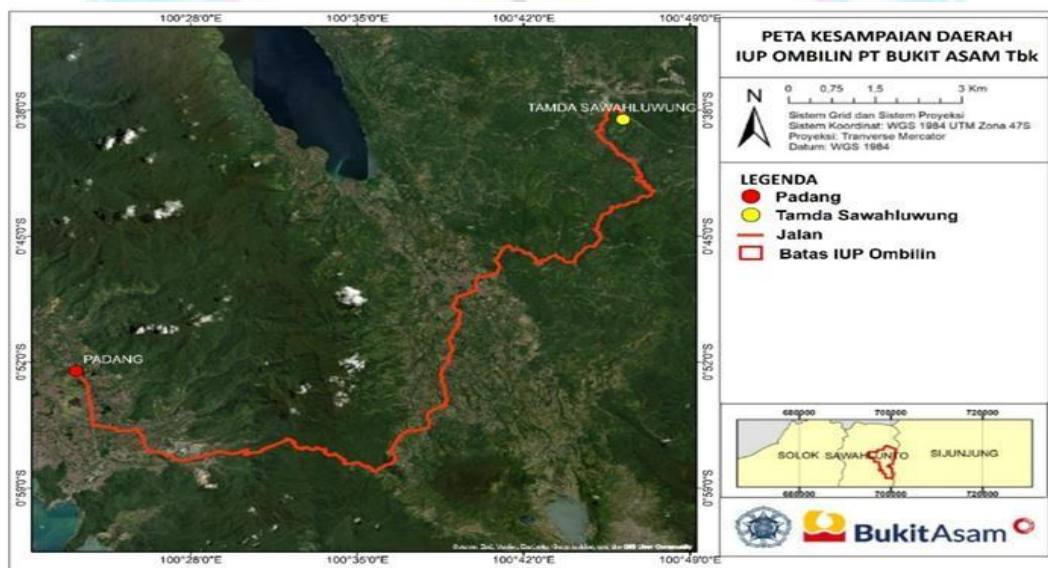
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deskripsi dan Sejarah Perusahaan

2.1.1 Peta Kesampaian Daerah

Peta Administrasi IUP Ombilin PT Bukit Asam Tbk memvisualisasikan letak geografis serta batas administratif dari area Izin Usaha Pertambangan tempat penelitian ini dilaksanakan. Secara administratif, wilayah operasional tambang ini berpusat di Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat, yang meliputi beberapa wilayah kecamatan seperti Talawi, Barangin, Lembah Segar, dan Silungkang. Selain itu, peta sisipan (*inset map*) memperlihatkan posisi keruangan wilayah ini yang berbatasan langsung dengan kabupaten sekitarnya, yakni Kabupaten Solok dan Kabupaten Sijunjung. Pemetaan tata letak ini berfungsi untuk memberikan orientasi spasial yang komprehensif mengenai keberadaan infrastruktur tambang terhadap pembagian wilayah administratif regional.



Sumber: PT BA UPO

Gambar 2.1 Peta Kesampaian Daerah IUP Ombilin PT Bukit Asam Tbk

Secara spesifik, garis poligon berwarna merah pada peta mendelineasi batas wilayah konsesi Izin Usaha Pertambangan (IUP) yang dikelola secara sah oleh PT Bukit Asam Tbk. Di dalam batas area konsesi inilah seluruh kegiatan operasional

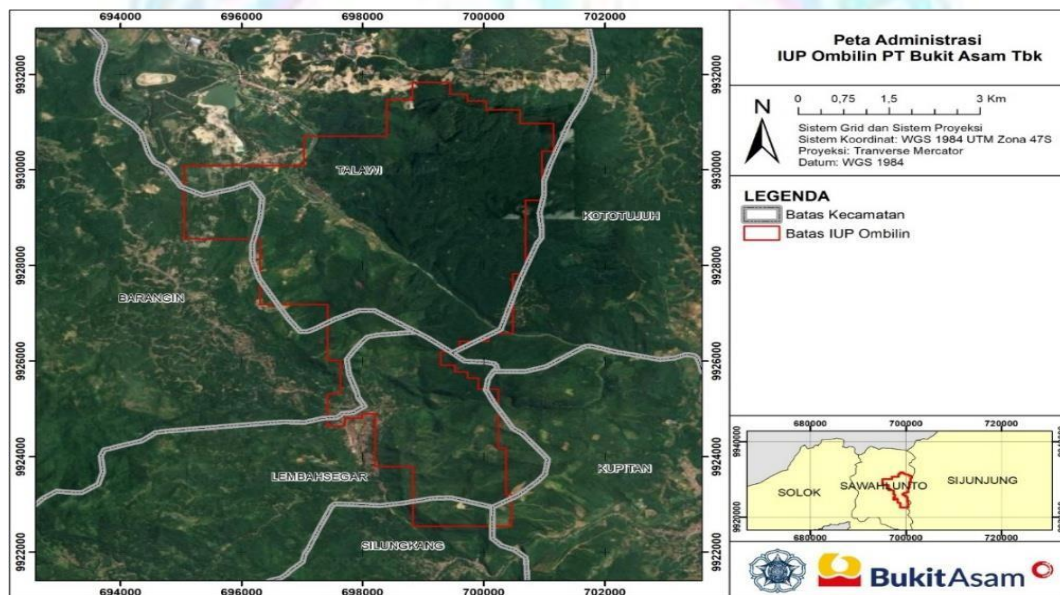
tambang bawah tanah difokuskan, termasuk Lubang Sawahluwung yang menjadi lokasi spesifik pengamatan kinerja penyangga arcis pada penelitian ini. Penggunaan sistem *grid* koordinat pada peta tersebut memvalidasi letak spasial secara presisi, sekaligus menegaskan bahwa seluruh rangkaian pengambilan data lapangan dilakukan sepenuhnya di dalam area otoritas resmi perusahaan.

Dengan menetapkan batasan area kerja yang jelas melalui informasi spasial tersebut, analisis terhadap kinerja penyangga arcis di Lubang Sawahluwung dapat dikorelasikan secara akurat dengan kondisi spesifik zona penambangan PT Bukit Asam Tbk. Hal ini memberikan dasar yang kuat bagi peneliti dalam menginterpretasikan fenomena teknis yang terjadi di bawah permukaan dengan batasan wilayah operasional yang telah ditentukan secara legal dan administratif (PT Bukit Asam Tbk., 2026).



2.1.2 Peta Administrasi IUP Ombilin

Peta Geologi Lembar Sawahluwung menunjukkan bahwa lokasi penelitian secara regional didominasi oleh Formasi Sawahlunto (*Tosh*), yang merupakan unit stratigrafi utama pembawa lapisan batubara di Cekungan Ombilin. Formasi ini tersusun atas perselingan batuan sedimen klastik halus hingga sedang, meliputi batupasir, batulanau, dan batulempung yang terendapkan dalam lingkungan *fluvial* hingga *lacustrine*. Keberadaan dominan batulempung dalam formasi ini memberikan dampak signifikan terhadap kestabilan lubang bukaan; sifat fisik batulempung yang memiliki plastisitas tinggi dan sensitivitas terhadap air menjadi faktor utama terjadinya deformasi pada terowongan. Hal ini menjelaskan secara geologis mengapa tekanan batuan di Lubang Sawahluwung cenderung besar, sehingga memerlukan sistem penyanggaan arsis yang mampu menahan beban deformasi kontinu tersebut.



Sumber: PT BA UPO

Gambar 2.2 Peta Administrasi IUP Ombilin PT Bukit Asam Tbk

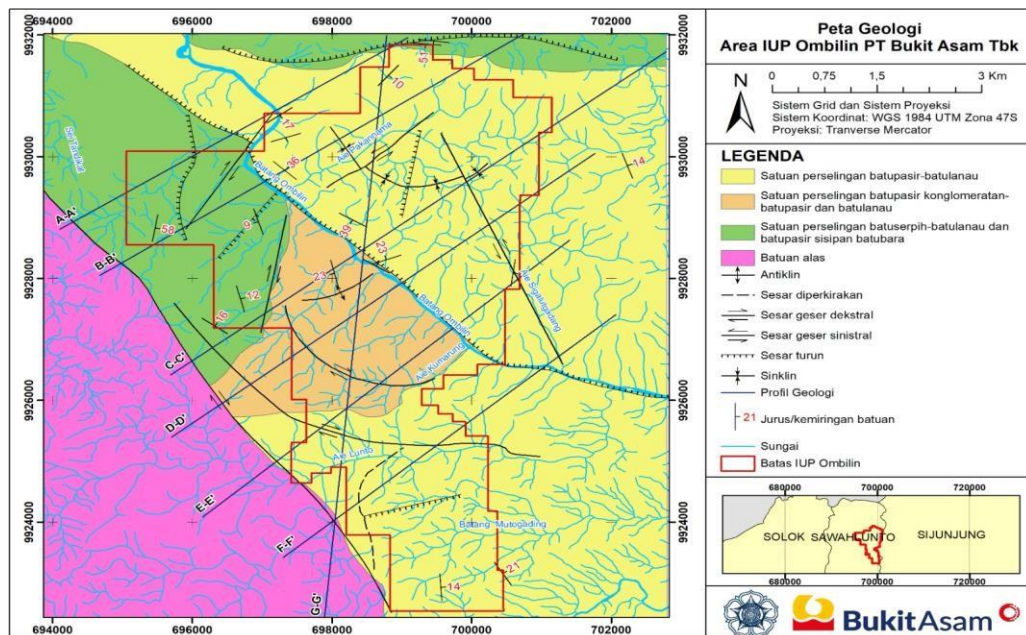
Secara struktural, daerah penelitian dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang kompleks, dicirikan dengan keberadaan struktur sesar (patahan) dan kemiringan lapisan batuan (*dip*) yang bervariasi sebagaimana tertera pada simbol-simbol peta. Keberadaan struktur sesar di sekitar lokasi lubang tambang mengindikasikan bahwa

massa batuan telah mengalami fragmentasi, yang secara teknis menurunkan kualitas massa batuan dan menciptakan distribusi tegangan yang tidak merata (*non-uniform stress*). Selain itu, penampang geologi pada bagian bawah peta memperlihatkan posisi lubang bukaan yang memotong lapisan miring, yang berpotensi menimbulkan tekanan lateral tambahan pada penyangga. Kombinasi antara karakteristik litologi yang lemah dan gangguan struktur geologi inilah yang menjadi landasan teknis penggunaan baja Arcis SS400 untuk memastikan keamanan operasional tambang bawah tanah PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin.



2.1.3 Peta Geologi

Peta Geologi Lembar Sawahluwung memberikan kerangka dasar dalam memahami karakteristik mekanika batuan dan stabilitas lubang bukaan di PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin (UPO). Kondisi bawah permukaan yang terpetakan menjadi parameter utama dalam menentukan kebutuhan dan efektivitas sistem penyanggaan baja Arcis di Lubang Sawahluwung.



Sumber: PT BA UPO

Gambar 2.3 Peta Geologi

Berikut adalah tinjauan geologi mendalam yang relevan dengan analisis penyanggaan pada lokasi penelitian:

1. Kondisi stratigrafi dan litologi dominan lokasi penelitian berada pada formasi sawahlunto (*tosh*), yang merupakan formasi pembawa batubara (*coal-bearing formation*) utama di Cekungan Ombilin. Secara litologis, formasi ini terdiri dari perselingan batupasir, batulanau, dan batulempung. Keberadaan batulempung sebagai batuan sampung (*country rock*) memberikan pengaruh signifikan terhadap stabilitas terowongan karena sifatnya yang lunak dan memiliki potensi pengembangan (*swelling*) yang tinggi saat terpapar udara dan air.
2. Pengaruh struktur geologi dan tektonik berdasarkan fitur linearitas pada

peta, daerah Sawahluwung dicirikan oleh struktur tektonik yang cukup intens, ditandai dengan keberadaan sesar (patahan). Struktur sesar ini menyebabkan massa batuan di sekitar lubang tambang berada dalam kondisi terfragmentasi atau hancur. Secara teknis, batuan yang terganggu struktur akan menghasilkan distribusi tekanan yang tidak merata (*non-uniform pressure*), sehingga memerlukan penyangga aktif yang kuat seperti baja Arcis untuk mencegah keruntuhan atap.

3. Analisis geometri dan kemiringan lapisan data *strike* dan *dip* pada peta menunjukkan variasi kemiringan lapisan batuan yang cukup dinamis. Kemiringan lapisan yang curam pada lubang tambang bawah tanah meningkatkan risiko terjadinya geseran antar lapisan batuan (*bedding plane slip*). Hal ini menjelaskan mengapa beban pada penyangga Arcis tidak hanya berasal dari beban vertikal batuan di atasnya (*overburden*), tetapi juga tekanan lateral akibat kemiringan formasi.
4. Korelasi kondisi hidrogeologi terhadap durabilitas material formasi sedimen yang terpetakan memiliki karakteristik akuifer yang memungkinkan terjadinya perembesan air tanah melalui celah-celah batuan. Hal ini berkorelasi langsung dengan Universitas Prabumulih tingginya kelembapan relatif (RH) yang mencapai 89,0%. Kondisi lingkungan yang jenuh air ini mempercepat proses pelapukan kimia pada komponen kayu (*blocking*) dan meningkatkan risiko korosi pada baja SS400, yang pada akhirnya menurunkan umur layanan penyangga.
5. Implikasi geoteknik terhadap konvergensi kombinasi antara dominasi litologi batulempung dan tekanan beban *overburden* menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada lubang bukaan. Fenomena ini terdeteksi melalui data konvergensi atau penyusutan dimensi tinggi (10 cm) dan lebar (11 cm) pada profil baja Arcis. Data geologi ini memperkuat argumentasi bahwa penyangga Arcis berfungsi sebagai penahan deformasi kontinu yang diakibatkan oleh karakteristik batuan yang relatif lemah (*weak rock*).

2.1.4 Sejarah Perusahaan

Pertambangan batu bara Ombilin berawal dari penemuan kandungan batu

bara berkualitas tinggi oleh geolog Belanda, Willem Hendrik de Greve, pada tahun 1867 di sepanjang aliran Batang Ombilin, Sawahlunto. Penemuan strategis ini mendorong Pemerintah Kolonial Hindia Belanda untuk meresmikan operasional tambang pada tahun 1892 di bawah nama *Oost-Indische Staatsmijnen*. Guna mendukung distribusi hasil tambang menuju pelabuhan internasional (kini Pelabuhan Teluk Bayur), pemerintah membangun infrastruktur masif berupa jaringan kereta api menembus Bukit Barisan dan fasilitas pelabuhan yang canggih pada masanya. Periode ini menandai fase industrialisasi pertama di Sumatera Barat, di mana Sawahlunto bertransformasi dari kawasan pedalaman menjadi kota tambang modern yang dilengkapi dengan teknologi ekstraksi mutakhir dari Eropa. Memasuki era pasca-kemerdekaan, pengelolaan tambang mengalami serangkaian nasionalisasi hingga akhirnya bergabung menjadi bagian dari PT Bukit Asam (Persero) pada tahun 1990 sebagai Unit Pertambangan Ombilin (UPO). Meskipun cadangan batu bara di permukaan mulai menipis, unit ini tetap menjadi pusat keunggulan pertambangan bawah tanah (*underground mining*) satu-satunya di Indonesia pada masanya, yang menerapkan teknologi *longwall mining*. Signifikansi historis dan keunikan tata kota industrinya diakui secara global ketika UNESCO menetapkan "Warisan Tambang Batu Bara Ombilin Sawahlunto" sebagai Situs Warisan Dunia pada tahun 2019. (Rahman, 2025) Saat ini, fokus Unit Ombilin telah bertransformasi dari sekadar eksploitasi mineral menuju pelestarian sejarah, pendidikan pertambangan, dan pengembangan pariwisata berbasis warisan industri yang berkelanjutan (UNESCO, 2019).

PT Bukit Asam Tbk (PTBA) berdedikasi untuk konsisten bertransformasi menuju entitas energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Guna mengarahkan langkah strategis tersebut, berikut adalah Visi dan Misi Perusahaan.

1. Visi

"Menjadi perusahaan energi kelas dunia yang peduli lingkungan."

2. Misi

Dalam upaya mewujudkan visi tersebut, PTBA mengusung misi utama sebagai berikut:

- a. Mengelola sumber energi dengan mengoptimalkan kompetensi korporasi dan keunggulan teknologi.

- b. Mengembangkan talenta insani yang kompeten dan berintegritas untuk mendukung kemajuan industri.
- c. Memberikan nilai tambah maksimal bagi seluruh pemangku kepentingan dan masyarakat.
- d. Menjaga kelestarian lingkungan melalui praktik operasional yang hijau dan bertanggung jawab.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Tambang Bawah Tanah

Tambang bawah tanah (*underground mining*) didefinisikan sebagai metode penambangan yang seluruh kegiatan atau aktivitas penambangannya dilakukan di bawah permukaan bumi, di mana tempat kerjanya tidak langsung berhubungan dengan udara luar. Metode ini umumnya diterapkan apabila posisi endapan bahan galian berada jauh di bawah permukaan tanah atau ketika nilai perbandingan pengupasan (*stripping ratio*) sudah mencapai batas ekonomis untuk dilakukan dengan metode tambang terbuka. Selain aspek ekonomi, pemilihan metode bawah tanah juga didasari oleh pertimbangan perlindungan lingkungan di permukaan, seperti kawasan hutan lindung atau area dengan topografi ekstrem (Bullock, 2001).

Kegiatan penambangan bawah tanah secara umum terbagi menjadi dua tahapan besar, yaitu tahap pengembangan (*development*) dan tahap produksi (*production*). Tahap pengembangan meliputi pembuatan lubang bukaan sebagai akses utama menuju badan bijih atau lapisan batubara, sedangkan tahap produksi adalah proses ekstraksi bahan galian dari lombong (*stope*). Berdasarkan arah dan fungsinya, lubang bukaan pada tambang bawah tanah dibedakan menjadi:

1. *Shaft*: Lubang bukaan vertikal atau miring yang menghubungkan permukaan dengan level penambangan di bawah tanah.
2. *Adit*: Lubang bukaan horizontal yang menghubungkan permukaan langsung ke dalam tambang (biasanya digunakan pada daerah pegunungan).
3. *Drift*: Lubang bukaan horizontal yang dibuat mengikuti arah jurus (*strike*) endapan.

4. *Crosscut*: Lubang bukaan horizontal yang dibuat memotong arah jurus endapan atau menghubungkan dua lubang sejajar.

Operasi tambang bawah tanah memiliki tingkat risiko teknis yang lebih tinggi dibandingkan tambang terbuka. Hal ini dikarenakan adanya perubahan tegangan *in-situ* pada massa batuan akibat proses penggalian yang menciptakan lubang bukaan. Batuan yang semula berada dalam kondisi setimbang akan mencari titik keseimbangan baru, yang sering kali ditandai dengan terjadinya deformasi atau konvergensi pada atap dan dinding lubang. Oleh karena itu, faktor kestabilan lubang bukaan menjadi prioritas utama yang memerlukan sistem penyanggaan (*support system*) yang tepat, pengaturan ventilasi yang memadai untuk suplai oksigen dan pengenceran gas berbahaya, serta sistem drainase yang efektif untuk mengontrol air tanah (Bieniawski, 1984).

Untuk menghitung suatu lubang bukaan Persamaan matematis yang diaplikasikan untuk mendapatkan total luasan adalah sebagai berikut:

1. Luas Penampang Atap (Setengah Lingkaran - A_1):

$$A_1 = \left(\frac{1}{2}\pi \times r^2\right) \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

A_1 = luas penampang atap (m^2)

π = konstanta lingkaran (3,14)

r = jari-jari lengkungan arcis (m)

2. Luas penampang badan (persegi panjang - A_2):

$$A_2 = W \times h \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

A_2 = luas penampang dinding(m^2)

h = tinggi total aktual lubang bukaan (m)

W = lebar aktual lubang bukaan (m)

3. Luas penampang total (A_{total}):

$$A_1 + A_2 \dots\dots\dots(2.3)$$

2.2.2 Definisi Penyangga Arcis (*Arch Support*)

Arcis adalah salah satu sistem penyangga pasif (*passive support*) yang berupa struktur lengkung atau busur yang dipasang di sekitar bukaan lubang tambang bawah tanah untuk menahan dan memindahkan beban massa batuan di atasnya, sehingga mencegah runtuh langsung pada lubang. Struktur lengkung seperti ini bekerja seperti *pressure arch*, yaitu struktur yang mentransfer tegangan dari batuan yang cenderung runtuh ke kedua sisi lengkungan sehingga beban dapat di distribusikan ke massa batuan yang lebih stabil di sekitarnya.

Penyangga pasif seperti kayu dan baja arcis yang bekerja menahan massa batuan setelah beban atau deformasi mulai terjadi. arcis khususnya sangat efektif diaplikasikan pada terowongan dengan kondisi batuan lemah atau tekanan tinggi karena desain busurnya mampu mendistribusikan tekanan secara merata ke seluruh struktur, yang didukung oleh keandalan material baja SS400 berstandar Japanese Industrial Standard (JIS) G 3101. Material ini memiliki karakteristik mekanis yang sangat spesifik, meliputi nilai kuat luluh (*yield strength*) minimal 245 MPa untuk mencegah deformasi permanen, kuat tarik (*tensile strength*) pada rentang 400–500 MPa, serta tingkat daktilitas atau kelenturan antara 17%–21% yang memberikan kemampuan bagi struktur untuk melengkung mengikuti tekanan konvergensi batuan sebelum mencapai titik kegagalan atau patah.



Sumber: Onix Underground. (t.t.). *THN Steel Arches Visualisasi 3D Rangka Baja Lengkung*. Situs Web Onix Underground.

Gambar 2.4 Visualisasi 3D Rangka Baja Lengkung

PT Bukit Asam (UPO) menerapkan penyangga baja pada lubang perawatan. Pada metode arcis atau penyangga setengah lingkaran, digunakan blok kayu untuk menyangga bagian atas dan sampingnya. Jarak kayu satu dengan kayu yang lainnya yaitu 1,2 meter (Dwinagara, 2020).

2.2.3 Komponen Penyangga Arcis

Penyangga arcis tersusun dari beberapa komponen utama yang saling berinteraksi dalam menahan beban massa batuan dan menjaga kestabilan lubang bukaan tambang bawah tanah. Setiap komponen memiliki fungsi struktural yang berbeda namun bekerja secara terpadu sebagai satu sistem penyanggaan. Keandalan penyangga arcis sangat bergantung pada kondisi, kekuatan, dan kesesuaian masing-masing komponen terhadap kondisi geoteknik di lapangan. Komponen utama penyangga arcis meliputi:

1. Elemen Lengkung Utama (*Arch Frame*)

Struktur berbentuk busur yang berfungsi menanggung beban utama dari massa batuan di atas lubang bukaan. Elemen ini umumnya dibuat dari baja atau material berkekuatan tinggi agar mampu menahan tekanan besar dan mendistribusikan beban secara efektif.

2. Kaki Penyangga (*Legs/Posts*)

Bagian vertikal yang berada pada kedua ujung arcis dan berfungsi meneruskan gaya tekan dari elemen lengkung ke dasar atau ke massa batuan di sekitarnya yang lebih stabil.

3. Pengikat dan *Plate*

Komponen tambahan yang digunakan untuk menghubungkan dan mengunci elemen-elemen arcis agar bekerja sebagai satu kesatuan struktur. Pengikat ini umumnya berupa baut, pin, dan plat penguat yang meningkatkan kestabilan dan kekakuan sistem penyangga.

4. Material Penyangga Sekunder

Merupakan sistem pendukung tambahan seperti *shotcrete*, *wire mesh*, *rock bolt*, atau kombinasi penyangga lainnya yang dipasang bersama arcis untuk meningkatkan stabilitas batuan secara lokal dan mengontrol runtuh kecil di sekitar lubang bukaan (Brady, 2006).

2.2.4 Analisis Kondisi Fisik Penyangga Arcis

Analisis kondisi fisik penyangga dilakukan melalui pemeriksaan visual dan pengukuran secara langsung terhadap elemen-elemen struktural yang ada. Pemeriksaan ini mencakup beberapa aspek penting, antara lain:

1. Retak, patah, atau deformasi pada kayu yang dapat menandakan adanya penurunan kemampuan menahan beban.
2. Pelapukan dan kerusakan biologis, seperti serangan jamur, rayap, atau akibat kelembaban tinggi, yang berpotensi mengurangi kekuatan material.
3. Perubahan bentuk yang terjadi akibat tekanan batuan di sekitar penyangga, termasuk melengkung atau bergesernya posisi elemen penyangga.

Kondisi fisik yang tidak memenuhi standar teknis menunjukkan adanya potensi risiko kegagalan struktural, yang dapat mengancam stabilitas terowongan dan keselamatan pekerja di dalam tambang (Guley, 2023).

Penilaian ini mencakup beberapa aspek, antara lain:

a. *Roof Convergence*

Dalam pemantauan kestabilan lubang bukaan ataupun *shaft* tambang bawah tanah, salah satu parameter penting yang harus diperhatikan adalah roof convergence atau penurunan atap tambang (Brady, 2006).

Rumus definisi geometrik/perubahan dimensi yang digunakan secara luas dalam pemantauan deformasi bukaan tambang bawah tanah, khususnya untuk *roof convergence* (penurunan atap) dari Hoek dan Brown (1997), diolah penulis (2025).

$$\Delta h = h_{\text{awal}} - h_{\text{akhir}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Tabel 2.1 *Roof Convergence*

Parameter	Keterangan
h_{awal}	Tinggi bukaan awal (cm/m)
h_{akhir}	Tinggi bukaan akhir
Δh	Besar penurunan atap

Sumber: Penulis (2026)

Tabel 2.2 Prediksi Aman Tinggi

Nilai Δh	Kondisi
<5 cm	Aman
5-10 cm	Perlu perbaikan
>10 cm	Kritis perlu perbaikan

Sumber: Penulis (2026)

b. *Sidewall Convergence*

Untuk memantau besar penyempitan yang terjadi, digunakan prinsip perhitungan perubahan dimensi dengan membandingkan rumus definisi perubahan dimensi (*displacement/convergence*) yang digunakan secara umum dalam analisis kestabilan bukaan tambang bawah tanah. Jarak dinding pada pengukuran awal dan pengukuran berikutnya. Brady dan Brown (2006), diolah penulis (2025). Dapat di hitung dengan rumus sederhana berikut:

$$\Delta w = w_{awal} - w_{akhir} \dots \dots \dots (2.5)$$

Tabel 2.3 *Sidewall Convergence*

Parameter	Keterangan
w_{awal}	Lebar bukaan awal (cm/m)
w_{akhir}	lebar bukaan akhir
Δw	besar penyempitan dinding

Sumber: Penulis (2026)

Tabel 2.4 Prediksi Aman Lebar

Nilai Δw	Kondisi
<3 cm	Stabil
3-8 cm	Ada tekanan
>8 cm	Potensi runtuh

Sumber: Penulis (2026)

2.2.5 Susunan Blok Kayu (*Cribbing*)

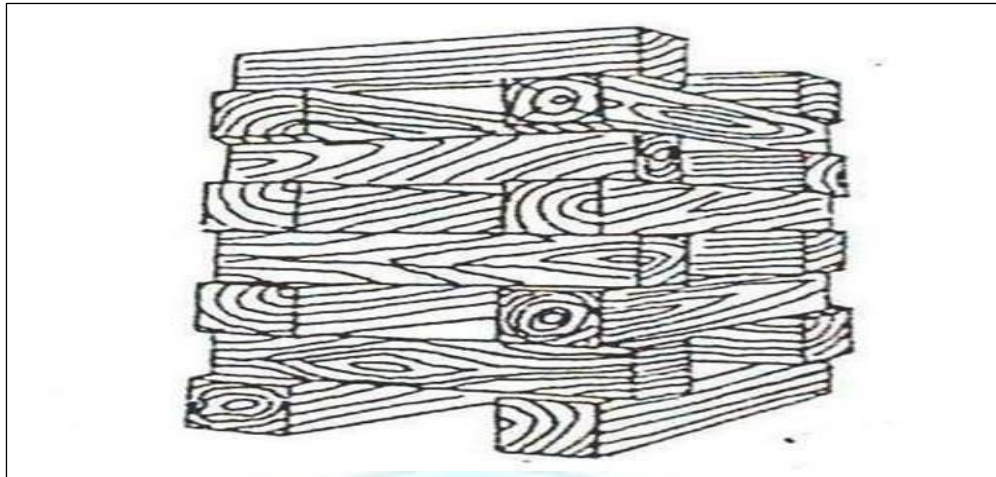
Susunan blok kayu atau *cribbing* merupakan komponen pendukung pada tambang bawah tanah yang disusun secara bersilangan atau bertumpuk untuk memperkuat posisi penyangga arcis. Blok-blok kayu ini berfungsi sebagai pengisi rongga (*void*) antara bagian atas busur arcis dengan atap terowongan, sehingga beban batuan dapat disalurkan secara merata ke seluruh struktur utama penyangga.



Sumber: Arsip Perusahaan (2023)

Gambar 2.5 Penyanggaan Kayu Sawahluwung

Penggunaan susunan blok ini sangat krusial untuk menjaga kestabilan arcis agar tidak bergeser, sekaligus melindungi area kerja dengan menahan fragmen batuan yang berpotensi lepas di area atap. Selain karena sifatnya yang mampu menyesuaikan dengan profil atap terowongan yang tidak rata, susunan blok kayu dipilih karena kemampuannya dalam menyerap beban secara bertahap. Melalui deformasi atau retakan pada serat kayunya, susunan blok ini memberikan indikasi visual yang jelas jika terjadi peningkatan tekanan beban batuan yang signifikan (PKKI, 1961).



Sumber: Buku KESDM (2023)

Gambar 2.6 Blok Kayu (*Cribbing*)

Susunan blok kayu (*cribbing*) telah lama digunakan sebagai elemen krusial untuk memperkuat efektivitas penyangga arcis di berbagai operasi penambangan bawah tanah. Dalam perannya sebagai pengisi rongga (*backfilling*) dan penyalur beban batuan ke struktur busur, material blok kayu memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Keuntungan Material Blok Kayu:

a. Fleksibilitas Pemasangan

Memiliki bobot yang relatif ringan sehingga mudah dibawa ke ruang sempit, serta mudah dibentuk dan disusun mengikuti profil atap di atas busur arcis.

b. Indikator Beban Visual

Kayu akan retak atau terdeformasi secara perlahan sepanjang seratinya, sehingga memberikan tanda peringatan dini yang mudah dideteksi sebelum terjadi kegagalan struktur penyangga utama.

c. Efisiensi Material

Sisa potongan blok atau patahannya dapat dimanfaatkan kembali sebagai pasak (*wedging*) untuk mengunci posisi blok kayu agar tetap stabil menekan batuan.

2. Kerugian Material Blok Kayu:

a. Variabilitas Kekuatan

Kekuatan mekaniknya sangat bergantung pada struktur serat dan keberadaan cacat alami pada tiap balok kayu yang disusun.

b. Sensitivitas Kelembaban

Lingkungan tambang yang basah dapat mempengaruhi kadar air kayu yang secara langsung menurunkan kapasitas dukungnya.

c. Daya Tahan Biologis

Paparan jamur dan serangga di area lembab dapat mempercepat pembusukan kayu, sehingga mengurangi masa layan susunan blok tersebut.

d. Resiko Kebakaran

Sebagai material organik, blok kayu memiliki kerentanan terhadap api yang perlu diantisipasi dalam sistem keamanan tambang.

Berdasarkan standar teknis yang berlaku Penentuan kualitas kayu tersebut diatur dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik, khususnya pada Lampiran II yang mengatur mengenai keselamatan pertambangan. Klasifikasi ini membagi kayu ke dalam lima kelas kuat berdasarkan parameter fisik dan mekanik, yaitu berat jenis, kekuatan lengkung, dan kekuatan tekan, guna memastikan material seperti kayu meranti kelas II yang digunakan pada lokasi penelitian memiliki ketahanan yang sesuai dengan beban massa batuan di lapangan.

Tabel 2.5 Kekuatan Kayu

Kelas Kuat	Berat Jenis	Kekuatan Lengkung (Kg/cm ²)	Kekuatan Tekan (Kg/cm ²)
I	≥ 0,9	≥ 1100	≥ 650
II	0,9 – 0,60	1100 – 725	650 – 425
III	0,60 – 0,40	725 – 500	425 – 300
IV	0,40 – 0,30	500 – 360	300 – 215
V	0,30	360	215

Sumber KESDM (2023)

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Blok Kayu:

Dalam menyusun blok kayu untuk mendukung struktur arcis, kapasitas beban yang dapat ditahan sangat dipengaruhi oleh:

1. Umur Kayu

Mempengaruhi kepadatan dan kematangan serat.

2. Kandungan Air

Kayu yang terlalu basah cenderung lebih elastis namun memiliki kuat tekan yang lebih rendah.

3. Struktur Serat

Arah serat kayu menentukan bagaimana beban dari atap didistribusikan ke kaki penyangga arcis.

4. Cacat Alami

Adanya mata kayu (*knot*) atau retakan (*crack*) pada balok dapat menjadi titik lemah saat menerima tekanan beban batuan yang besar.

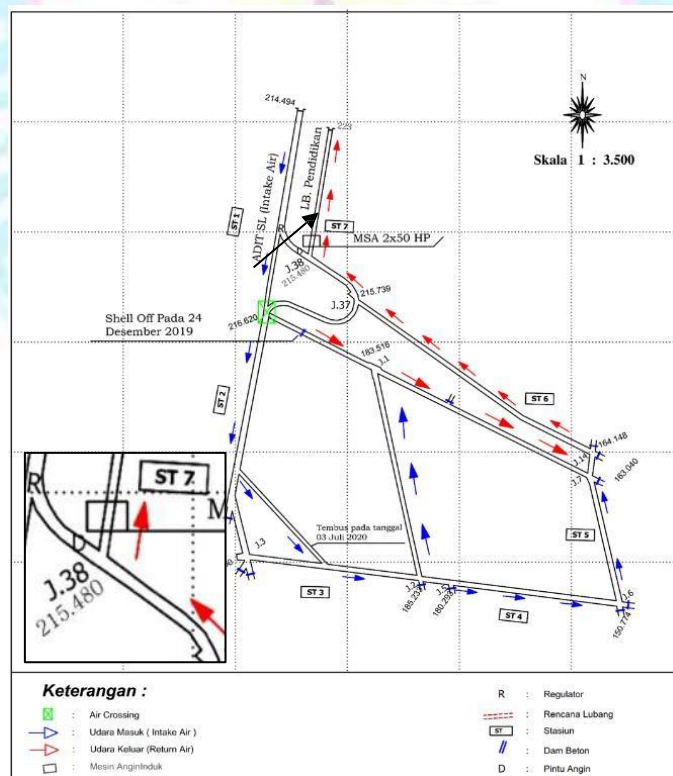
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.1.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini secara spesifik berfokus pada titik pengamatan J.38 yang merupakan bagian integral dari jaringan ventilasi bawah tanah pada Gambar 3.1. Berdasarkan peta teknis dengan skala 1:3.500, titik J.38 terletak di koordinat elevasi 215,480, yang memposisikannya sebagai area transisi penting di jalur utama udara segar. Secara administratif teknis, lokasi ini berada di jalur persimpangan yang menghubungkan aliran udara dari lubang masuk utama menuju ke arah Lubang Pendidikan dan area pengembangan blok penambangan lainnya. Lokasi ini dipilih karena karakteristiknya yang strategis sebagai titik distribusi aliran udara sebelum melewati percabangan menuju stasiun-stasiun pemantauan lebih lanjut di bagian dalam tambang.



Sumber: Arsip Perusahaan

Gambar 3.1 Lokasi J.38 Lubang Sawahluwung

3.1.2 Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan selama satu bulan, mulai tanggal 10 maret sampai 10 April 2026. Jadwal pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan					
		1					
		1	2	3	4	1	2
1	Observasi Lapangan						
2	Pengambilan Data Terkait Penelitian						
3	Pengolahan Data						
4	Analisis Data						
5	Konsultasi Dan Bimbingan						
6	Penyusunan Dan Pengumpulan Tugas Akhir						

Sumber: Penulis (2025)

3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang penulis gunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini antara lain:

1 Observasi Awal

Tahap ini merupakan langkah pertama untuk mengidentifikasi permasalahan secara langsung di lapangan. Observasi dilakukan di Lokasi J38 Tambang Dalam Sawahluwung PT Bukit Asam Tbk guna melihat kondisi aktual penyangga arcis yang mengalami deformasi serta kerusakan pada material kayu pengganjal.

2 Pengumpulan Referensi dan Data Terkait Penelitian

Data yang diambil pada saat penelitian dapat dikelompokkan menjadi data primer dan data sekunder.

3 Pengolahan Data

Data yang telah dikumpulkan kemudian ditabulasi dan dihitung secara teknis. Tahap ini melibatkan perhitungan besaran deformasi yang terjadi

pada setiap unit arcis serta pengelompokan kondisi fisik penyangga berdasarkan hasil pengamatan lapangan.

4 Analisis Data

Pada tahap ini, hasil pengolahan data dianalisis secara mendalam untuk mencari hubungan antara faktor lingkungan (kelembapan) dan kesalahan teknis pemasangan (adanya *void*) terhadap kegagalan struktur penyangga arcis di lubang perawatan.

5 Konsultasi dan Bimbingan

Merupakan proses diskusi berkala dengan dosen pembimbing untuk meninjau kemajuan penelitian, memvalidasi hasil analisis, serta mendapatkan arahan guna menyempurnakan isi laporan tugas akhir.

6 Penyusunan dan Pengumpulan Tugas Akhir

Tahap akhir penelitian yang meliputi penyusunan naskah lengkap dari Bab I hingga Bab V, pembuatan kesimpulan dan saran, serta penggandaan dokumen laporan untuk dikumpulkan sebagai syarat dalam menempuh ujian sidang tugas akhir di Universitas Prabumulih.

a. Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengamatan lapangan, serta dokumentasi akan diolah menggunakan metode kualitatif dan metode kuantitatif yang relevan untuk menilai kondisi penyangga arcis dan kualitas kayu.

Hasil analisis ini bertujuan untuk menilai secara menyeluruh kondisi teknis penyangga arcis pada lubang sawahluwung Dengan standar teknis perusahaan yang diatur. serta mengevaluasi kontribusi kualitas material kayu terhadap umur pakai penyangga. Analisis dilakukan dengan memadukan data kuantitatif, seperti jarak antar penyangga, jumlah penyangga, umur pemakaian, dan frekuensi penggantian, dengan data kualitatif berupa kondisi fisik arcis, tingkat pelapukan kayu, deformasi, sambungan, dan kerusakan biologis. Dengan pendekatan ini, peneliti dapat menentukan tingkat kelayakan penyangga arcis, mengidentifikasi lokasi yang membutuhkan perbaikan atau penggantian, serta mengetahui hubungan antara kualitas kayu dan daya dukung penyangga.

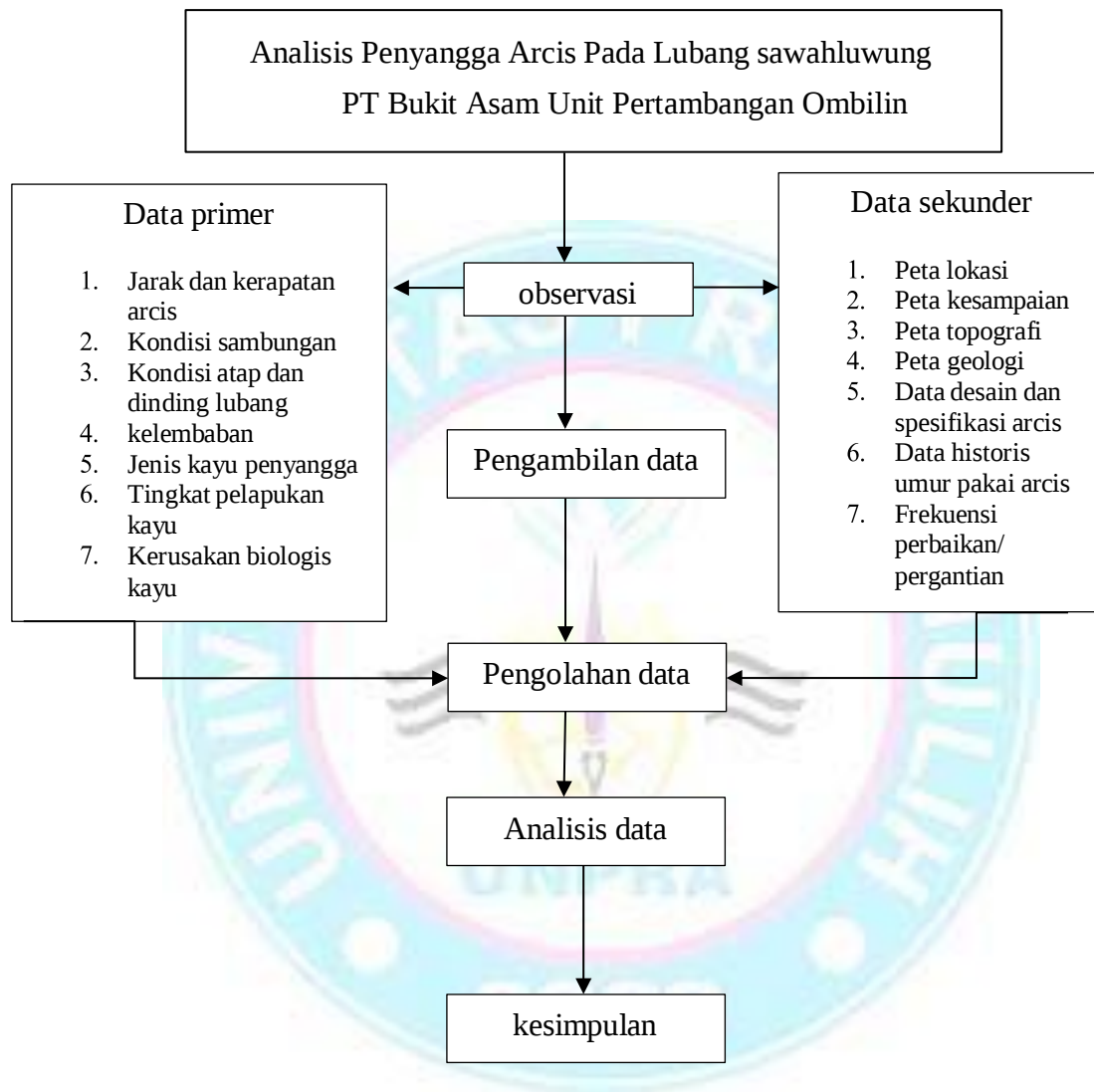
b. Kesimpulan

Tahap kesimpulan merupakan fase akhir dalam metodologi penelitian yang bertujuan untuk menggabungkan seluruh hasil temuan lapangan dan analisis data secara komprehensif. Pada tahap ini, hasil evaluasi kualitas dengan analisis kekuatan mekanis penyangga *steel arch* berbahan baja SS400 serta efektivitas kayu penahan (*wood blocking*) kelas II dalam mendistribusikan beban atap. Melalui integrasi data tersebut, ditentukan nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) dari sistem penyanggaan yang diterapkan, guna memastikan bahwa struktur tersebut mampu menjaga kestabilan lubang Sawahluwung di PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin secara aman, efisien, dan sesuai dengan standar teknis pertambangan yang berlaku.



3.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir dari kegiatan penelitian yang dilakukan disesuaikan dengan tahapan dari penelitian seperti Gambar 3.1 berikut:



Sumber penulis (2026)

Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian

3.4 Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

3.4.1 Teknik Pengumpulan

Data yang dikumpulkan selama penelitian berlangsung dikelompokkan menjadi dua, yaitu data primer dan data sekunder, dengan rincian sebagai berikut:

1. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh baik lapangan, ataupun hasil dari wawancara yang dilakukan di PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin.

Data Primer yang akan di ambil dalam penelitian:

- a. Jarak dan kerapatan arcis
- b. Kondisi sambungan arcis
- c. Kondisi atap dan dinding lubang
- d. Kelembaban
- e. Jenis kayu penyangga
- f. Tingkat pelapukan kayu
- g. Kerusakan biologis kayu

2. Data Sekunder

Data sekunder pada umumnya berupa bukti dan laporan yang telah tersusun dalam arsip perusahaan, data yang dibutuhkan antara lain:

- a. Peta lokasi
- b. Peta kesampaian
- c. Peta topografi
- d. Peta geologi
- e. Data desain dan spesifikasi arcis
- f. Umur pakai arcis
- g. Frekuensi perbaikan / pergantian

3.4.2 Pengolahan Data

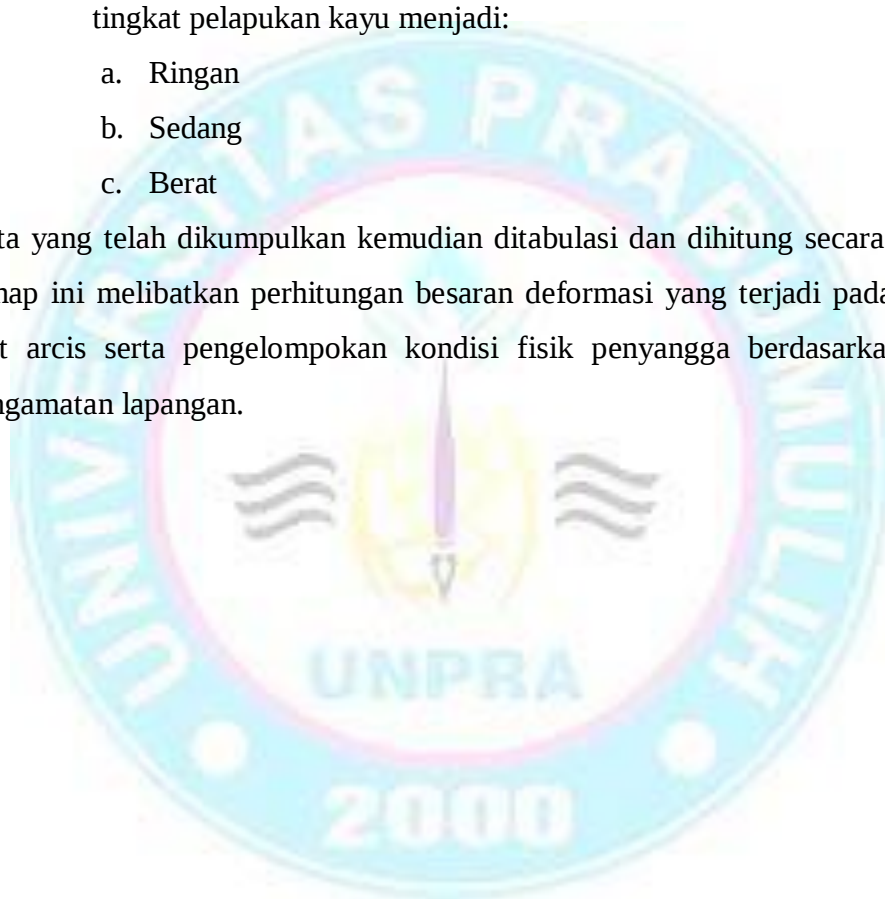
Pengolahan data dilakukan dengan cara mengelompokkan kondisi penyangga arcis dan material kayu berdasarkan tingkat kerusakan dan kelayakan. Seluruh data yang terkumpul, baik kualitatif maupun kuantitatif, akan diolah secara terstruktur sebagai berikut:

1. Kondisi penyangga arcis diklasifikasikan menjadi:
 - a. Baik
 - b. rusak ringan
 - c. rusak sedang,
 - d. rusak berat

Data jarak kerapatan penyangga dibandingkan dengan standar atau desain penyanggaan yang berlaku.

2. Kualitas material kayu diolah dengan cara mengklasifikasikan tingkat pelapukan kayu menjadi:
 - a. Ringan
 - b. Sedang
 - c. Berat

Data yang telah dikumpulkan kemudian ditabulasi dan dihitung secara teknis. Tahap ini melibatkan perhitungan besaran deformasi yang terjadi pada setiap unit arcis serta pengelompokan kondisi fisik penyangga berdasarkan hasil pengamatan lapangan.



BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Aktual Penyangga Arcis Pada Lubang Sawahluwung

Sistem penyangga pada lubang sawahluwung di lokasi J38, PT Bukit Asam Unit Pertambangan Ombilin, saat ini menggunakan konstruksi semi permanen yang terdiri dari 19 set arcis baja. Penyangga ini memiliki geometri setengah lingkaran yang dirancang untuk mendistribusikan beban tekan batuan secara merata ke seluruh struktur. Untuk memperkuat stabilitas, standar jarak dari perusahaan untuk setiap unit arcis dipasang dengan jarak antar (*spacing*) yakni 1,2 meter, yang merupakan interval standar untuk memastikan keamanan area perawatan dari potensi deformasi atau runtuh batuan atap.

Guna mengoptimalkan fungsi perlindungan, struktur baja tersebut dikombinasikan dengan material kayu penyusun yang ditempatkan secara sistematis pada bagian atas dan samping arcis. Komponen kayu ini berfungsi sebagai lapisan pengisi (*lagging*) yang menahan batuan lepas agar tidak jatuh di antara celah baja, sekaligus menyalurkan tekanan beban *overburden* langsung ke rangka arcis. Sinergi antara kekuatan tarik baja dan fleksibilitas kayu di lokasi J38 ini menciptakan sistem penyangga yang kokoh namun tetap adaptif terhadap karakteristik batuan di tambang bawah tanah Sawahluwung.

4.1.1 Luas Penampang

Kondisi aktual dari lubang bukaan pada lokasi penelitian (sepanjang jalur J38) dihitung dengan penampang menjadi dua bagian utama: bagian atap (*roof*) yang berbentuk setengah lingkaran, dan bagian badan (*wall*) yang berbentuk persegi panjang.

Berdasarkan pengamatan di 19 titik sepanjang lokasi J38, diperoleh data fluktuasi dimensi yang menggambarkan profil konvergensi terowongan. Seluruh hasil perhitungan luas penampang dari Titik 1 hingga Titik 19 dirangkum secara komprehensif pada Tabel A.1 Perhitungan Luas Penampang tinggi dan lebar aktual.

Rumus untuk mendapat selisih dari perbandingan pengukuran awal arcis pada tahun 1985 hingga pengukuran akhir pada tahun 2026:

Standar Desain – Kondisi Aktual
--

Tabel 4.1 Perhitungan Selisih Standar Desain Dengan Kondisi Aktual Lokasi J.38 (*Overbreak* Dan *Underbreak*).

Titik/ No	Parameter	Standar Desain (m)	Kondisi Aktual (m)	Selisih (m)	Keterangan
1-2	Tinggi	2,80	2,90	+0,10	<i>Overbreak</i>
	Lebar	4,40	4,30	-0,10	<i>Underbreak</i>
3	Tinggi	2,80	2,80	0,00	Sesuai
	Lebar	4,40	4,30	-0,10	<i>Underbreak</i>
4	Tinggi	2,80	2,70	-0,10	<i>Underbreak</i>
	Lebar	4,40	4,29	-0,11	<i>Underbreak</i>
5-8	Tinggi	2,80	2,75	-0,05	<i>Underbreak</i>
	Lebar	4,40	4,40	0,00	Sesuai
9	Tinggi	2,80	2,80	0,00	Sesuai
	Lebar	4,40	4,40	0,00	Sesuai
10-13	Tinggi	2,80	2,75	-0,05	<i>Underbreak</i>
	Lebar	4,40	4,30	-0,10	<i>Underbreak</i>
14	Tinggi	2,80	2,80	0,00	Sesuai
	Lebar	4,40	4,30	-0,10	<i>Underbreak</i>
15-18	Tinggi	2,80	2,75	-0,05	<i>Underbreak</i>
	Lebar	4,40	4,40	0,00	Sesuai
19	Tinggi	2,80	2,80	0,00	Sesuai
	Lebar	4,40	4,40	0,00	Sesuai

Sumber: penulis (2026)

Keterangan:

1. Nilai Positif (+): Mengindikasikan *overbreak* (penggalan melebihi batas desain). Kondisi ini dapat mempengaruhi kebutuhan material pengisi (seperti *grouting* atau *shotcrete* jika ada) di belakang *steel arch*, serta berpotensi memicu pelonggaran massa batuan (*rock mass loosening*).
2. Nilai Negatif (-): Mengindikasikan *underbreak* (penggalan kurang dari desain). Kondisi ini bisa mengganggu spasi dan pemasangan *steel arch* atau menghambat ruang gerak (profil bebas) peralatan tambang.

3. Mendekati Nol: Sesuai desain (dalam batas toleransi).

Berdasarkan hasil *observasi* lapangan dan pengukuran langsung pada lubang bukaan di lokasi J38, dilakukan evaluasi terhadap kesesuaian antara dimensi aktual hasil penggalian dengan desain teknis yang telah ditetapkan. Pengukuran ini difokuskan pada parameter tinggi dan lebar bukaan guna mengidentifikasi adanya penyimpangan geometri berupa *overbreak* maupun *underbreak*.

Data spasi antar arcis diperoleh dari hasil pengukuran lapangan menggunakan meteran, di mana ditemukan jarak konsisten sebesar 1,2 meter pada setiap interval penyangga karna telah terpasang sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan perusahaan.



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4.1 Meteran

Panjang total bentangan penyanggaan ditentukan oleh jumlah interval antar set penyangga, bukan dari total unit penyangga yang terpasang. Dengan adanya 19 set arcis baja, maka terbentuk 18 interval spasi. Panjang total bentangan penyangga di lokasi J38 tersebut 21,6 meter.



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4. 2 Arcis Di Lokasi Penelitian

Hasil inspeksi pada 19 unit arcis di lokasi J38 dengan elevasi 215.480 meter di bawah permukaan, tidak ditemukan adanya rembesan air tanah, sehingga risiko tekanan hidrostatik tambahan pada struktur penyangga dapat diminimalisir. Fokus identifikasi dialihkan sepenuhnya pada pemetaan struktur geologi seperti sesar dan kekar yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan fragmen batuan. Tanpa adanya pengaruh air yang melunakkan material, tim dapat lebih akurat dalam menilai integritas mekanis batuan dalam menumpu beban langsung pada arcis baja.

4.1.2 Spesifikasi dan Pemasangan Penyangga Arcis

Sistem penyangga yang diterapkan di lokasi penelitian merupakan sistem komposit yang mengintegrasikan kekuatan struktural baja dengan fleksibilitas material kayu. Spesifikasi material dan kondisi teknis pemasangan pada area kritis (J38).



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4.3 Baja SS400

Proses pemasangan dilakukan secara sistematis, dimulai dari pembersihan atap lubang (*scalling*), perakitan segmen busur baja, hingga pengencangan baut pengikat (*joint*). Pemasangan ini dirancang untuk menciptakan sistem penyanggaan pasif yang mampu menahan tekanan massa batuan di atas lubang perawatan melalui kayu Meranti sebagai media distribusi beban (Dwinagara, 2020).

1. Kondisi Kontak dan *Blocking* (Pegangan Kayu)



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4.4 *Blocking*

Sistem penyangga di lokasi menunjukkan bahwa kualitas pemasangan komponen pengganjal menjadi faktor penentu utama dalam menjaga kestabilan lubang bukaan. Mengingat kunci kekuatan struktur arcis sangat bergantung pada kerapatan kontak antara baja dengan massa batuan, ditemukan beberapa poin penting berdasarkan observasi langsung di lapangan sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Observasi

Aspek Observasi	Deskripsi Kondisi Aktual	Implikasi Teknis & Mekanis
Material & Distribusi <i>Blocking</i>	Penggunaan blok kayu yang disusun secara manual pada bagian atap (<i>crown</i>) dan dinding samping (<i>sidewall</i>) busur baja.	Distribusi beban sangat bergantung pada ketelitian penyusunan blok kayu secara manual.
Kondisi Kontak Antarmuka	Ditemukan banyak rongga kosong (<i>void</i>) yang signifikan antara busur baja dan lapisan batuan atap (<i>sandstone</i>).	Kontak antara penyangga dan batuan tidak bersifat kontinu (terputus-putus).
Mekanisme Pembebanan	Terjadi fenomena <i>point loading</i> (pembebanan titik) akibat distribusi blok kayu yang tidak merata.	Beban massa batuan terkonsentrasi pada titik tertentu, bukan terdistribusi merata ke seluruh lengkungan baja.
Integritas Struktural	Kapasitas dukung beban tidak mencapai efisiensi maksimal (100%).	Timbulnya titik lemah (<i>weak points</i>) yang memicu deformasi dini dan perubahan geometri busur baja.

Sumber: penulis (2026)

Meskipun material busur baja memiliki spesifikasi yang memadai secara metalurgi, ketidaksempurnaan teknis pada sistem *blocking* kayu di lokasi J38 menyebabkan kegagalan dalam mendistribusikan tegangan batuan. Hal ini mengakibatkan penurunan performa mekanis penyangga secara keseluruhan dalam menahan tekanan batuan secara optimal.

2. Evaluasi Kondisi Geologis di J.38

Berdasarkan hasil observasi dan pengukuran parameter di lapangan, terdapat beberapa poin penting yang menggambarkan kondisi geoteknik saat ini:

Tabel 4.3 Kondisi Geologis di J.38

Indikator Pengamatan	Deskripsi Kondisi Lapangan	Implikasi Geomekanika
Lebar Penampang	Terjadi penyusutan dari lebar ideal 4,4 m menjadi 4,29 m.	Adanya pergerakan lateral (samping) dari massa batuan dinding.
Tinggi Penampang	Terjadi penurunan dari tinggi ideal 2,8 m menjadi 2,7 m.	Terdeteksi beban vertikal yang menyebabkan konvergensi atap sebesar 10 cm.
Status Geometri	Perubahan dimensi nyata pada titik pengamatan J38.	Tekanan batuan mulai bekerja melebihi kapasitas awal lubang tambang.
Karakteristik Litologi	Dominasi batu pasir (<i>sandstone</i>).	Umumnya stabil, namun penyangga tetap krusial untuk mencegah peluruhan butiran (<i>spalling</i>).
Iklim Mikro	Lingkungan kering, suhu 20,7°C.	Sangat menguntungkan; mencegah pelapukan cepat kayu dan meminimalisir korosi baja.

Sumber: Penulis (2026)

Secara keseluruhan, data geologis ini menunjukkan bahwa meskipun lingkungan kerja sangat mendukung keawetan material arcis, tekanan aktif dari massa batuan tetap memberikan pengaruh nyata terhadap perubahan profil geometri bukaan di lokasi J38.

4.1.3 Kondisi Aktual Penyangga Arcis

Berdasarkan pengamatan langsung di lapangan pada lokasi J38, kondisi penyangga *steel arch* (arcis baja) menunjukkan stabilitas yang terjaga dalam menahan beban batuan di atas lubang. Namun, dari hasil inspeksi mendalam pada 19 unit arcis baja yang terpasang, ditemukan adanya indikasi tekanan batuan aktif (*active rock pressure*) pada beberapa titik tertentu yang ditandai dengan penurunan pada busur baja.

Kondisi tersebut menggambarkan efektivitas distribusi beban yang dilakukan oleh media kayu Meranti sebagai penyangga antara busur baja dan massa batuan. Kondisi lapangan pada interval jarak 5 meter dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut:



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4.5 Interval 5 Meter

Tabel 4.4 Spesifikasi Geometri dan Spasi interval 5 meter

Parameter Geometri	Spesifikasi Desain (m)	Pengukuran Aktual (m)	Deviasi / Konvergensi (cm)	Implikasi Geomekanika
Tinggi Bebas	2,8	2,7	10	Indikasi beban vertikal atap (<i>roof</i>) atau pengangkatan lantai (<i>floor heave</i>).
Lebar Bersih	4,4	4,29	11	Indikasi tekanan lateral yang menyebabkan penyempitan dinding.
Jarak Antar Arcis	1,2	1,2	-	Jarak pemasangan masih konsisten sesuai standar desain.

Sumber: Penulis (2026)

Tabel 4.5 Ringkasan Data Observasi Lapangan J38

Parameter	Data Lapangan	Kondisi / Dampak
Suhu	20,7 °C	Sejuk, ideal bagi mikroorganisme perusak.
Kelembaban (RH)	89%	Sangat Tinggi, memicu jamur pada bagian bawah kayu.
Rembesan Air	Nihil (Kering)	Karat pada baja murni karena usia & kelembaban udara.
Serangga (Rayap)	Tiap 5 Meter	Merusak densitas kayu di sepanjang jalur J38.
Jamur	Titik 10 m dst.	Pembusukan biologis pada area sirkulasi rendah.

Sumber: Penulis (2026)

Meskipun material penyangga dalam kondisi fisik yang baik, adanya rongga antara blok kayu dan batuan menyebabkan distribusi beban tidak merata (*point loading*). Hal ini menjelaskan mengapa terjadi penyempitan dimensi pada salah satu arcis; beban batuan tidak tersalurkan secara seragam ke seluruh busur baja, melainkan terkonsentrasi pada titik tertentu.



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4. 6 Blok dan Batuan

Kondisi aktual di J38 menunjukkan sistem penyangga berfungsi, tetapi belum bekerja secara optimal karena adanya rongga pada *blocking* kayu dapat dilihat pada Gambar B.1 Detail rongga kosong (*void*) antara batuan atap dan blok kayu.

Penyempitan dimensi yang ditemukan menjadi peringatan dini bahwa tekanan batuan pada formasi batu pasir tersebut mulai melampaui kapasitas tahanan arcis akibat pemasangan elemen pendukung yang kurang rapat. Perlu dilakukan pengencangan ulang atau penambahan *blocking* kayu untuk memastikan kontak 360 derajat antara batuan dan penyangga baja.

Tabel 4.6 Spesifikasi Material dan Kondisi Teknis Arcis (Lokasi J38)

Komponen Penyangga	Spesifikasi Material	Fungsi dan Kondisi Teknis
Penyangga Utama	Baja SS400 (<i>Steel Arch</i>)	Menahan beban utama massa batuan atap dan dinding terowongan.
Pelapis / Pengganjal	Kayu Meranti Kelas II	Media transmisi beban dan pengisi celah (<i>wood blocking</i>).
Sistem Gabungan	Komposit Baja-Kayu	Menghadapi tekanan geomekanika kritis akibat beban dinamis batuan.
Status Konvergensi	Terukur di Lapangan	Terjadi penyusutan dimensi tinggi (10 cm) dan lebar (11 cm).

Sumber: Penulis (2026)

Berdasarkan hasil inspeksi langsung selama kurang lebih satu bulan, kondisi titik sambungan (*joints/connections*) pada ke-19 unit arcis di lokasi J38 secara keseluruhan masih berada dalam status sangat baik. Evaluasi terhadap baut dan pelat sambung menunjukkan tidak adanya indikasi kegagalan material atau kerusakan fisik, seluruh baut terpasang dengan kencang tanpa ditemukan adanya kelonggaran sedikit pun. Kondisi ini menandakan bahwa meskipun terdapat tekanan batuan yang menyebabkan penyempitan dimensi pada salah satu unit, kekuatan mekanis pada sambungan antar-profil baja masih mampu menjaga integritas rangka arcis sebagai satu kesatuan struktur.

4.1.4 Analisis Penilaian Penyangga Arcis yang Terpasang

Berdasarkan hasil observasi mendalam dan pengukuran teknis yang dilakukan di lokasi J38 Lubang Sawahluwung, data yang diperoleh kemudian diolah untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai stabilitas lubang perawatan. Untuk menjawab kondisi aktual di lokasi J38, digunakan data deformasi spasial yang telah diukur dari 19 unit arcis dengan interval pemasangan setiap 5 meter. Berdasarkan analisis data tersebut, ditemukan indikasi deformasi sebagai berikut:

Dalam mengevaluasi stabilitas penyangga *steel arch*, salah satu parameter utama yang diukur adalah besarnya deformasi atau penurunan yang terjadi pada

sistem penyangga. Besarnya penurunan tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan selisih tinggi pada jarak 5 meter pertama perhitungan menunjukkan nilai Δh :

$$\Delta h = h_{\text{awal}} - h_{\text{akhir}} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\Delta h = 2,8 \text{ m} - 2,7 \text{ m} = 0,10 \text{ m (10 cm)}.$$

Merujuk pada parameter evaluasi geoteknik, penurunan sebesar 10 cm ini masuk dalam kondisi batas toleransi 10 cm.

Selain penurunan vertikal, stabilitas sistem penyangga *steel arch* juga sangat bergantung pada perubahan lebar bentang antar kaki penyangga. Konvergensi atau pergerakan lateral ini menunjukkan seberapa besar tekanan massa batuan yang menekan dari arah samping (tekanan lateral). Penyempitan Dinding (*Sidewall Convergence*) Pengukuran lebar bukaan menunjukkan nilai Δw :

$$\Delta w = w_{\text{awal}} - w_{\text{akhir}} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\Delta w = 4,4 \text{ m} - 4,29 \text{ m} = 0,11 \text{ m (11 cm)}.$$

Nilai penyempitan ini masuk dalam kategori Potensi Runtuh karena berada di atas ambang batas geomekanika sebesar 8 cm.

Tabel 4.7 Penilaian Kondisi Arcis

Parameter	Fungsi	Interpretasi
Δh (<i>roof convergence</i>)	Mengetahui penurunan atap	Semakin tinggi Δh semakin bahaya
Δw (<i>sidewall convergence</i>)	Mengetahui penyempitan dinding	Semakin tinggi Δw potensi runtuh
Visual rating kayu	Menilai kelayakan kayu	Retak, pelapukan, lengkung, kelembaban

Sumber: Penulis (2026)

Penyebab Kondisi kritis ini diperparah oleh penyusunan blok kayu pelapis yang tidak merata sehingga menciptakan banyak rongga kosong (*void*). Akibatnya, beban batuan pasir menekan baja secara tidak merata (*point loading*), yang memaksa struktur baja melengkung secara asimetris. Meskipun sambungan pelat dan baut masih berfungsi dengan baik, rangka utama baja telah kehilangan sebagian luasan penampang efektifnya akibat faktor korosi termakan usia.

4.2 Evaluasi Kualitas Material Blok Kayu Terhadap Masa Pakai Arcis

Kualitas material blok merupakan variabel kritis yang menentukan keamanan jangka panjang dari sebuah lubang bukaan tambang bawah tanah. Dalam pengamatan yang dilakukan di lapangan, terlihat adanya hubungan yang sangat erat antara pemilihan jenis kayu dengan ketahanannya terhadap beban batuan dan pengaruh lingkungan. Meskipun secara struktural arcis baja adalah komponen utama, namun kayu yang berfungsi sebagai *stapling* atau pengganjal berperan penting dalam mendistribusikan beban secara merata. Jika kualitas kayu menurun, maka efektivitas seluruh sistem penyangga arcis akan terganggu.

Kualitas material kayu memegang peranan krusial sebagai penentu utama durasi stabilitas lubang bukaan tambang. Dalam sistem penyangga komposit, kayu berfungsi sebagai media transmisi atau penyalur beban dari massa batuan menuju busur baja (*steel arch*). Oleh karena itu, segala bentuk penurunan kualitas pada material kayu akan berdampak langsung terhadap degradasi kekuatan struktur, yang pada akhirnya memicu kegagalan sistem penyangga secara keseluruhan dalam menahan tekanan geomekanika.

4.2.1 Karakteristik dan Kelas Kayu

Berdasarkan regulasi teknis dalam Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, kayu yang digunakan dalam operasional tambang bawah tanah diklasifikasikan berdasarkan sifat fisik dan mekanisnya. Kayu Meranti yang digunakan pada lokasi penelitian dikategorikan sebagai kayu Kelas Kuat II (Pratama, 2021).

Standar klasifikasi kekuatan kayu tersebut dirangkum dalam Tabel 4.8 berikut:

Tabel 4.8 Klasifikasi Kekuatan Kayu untuk Penyanggaan Tambang

Kelas Kuat	Berat Jenis (Kering Udara)	Kuat Lentur Mutlak (kg/cm ²)	Kuat Tekan Mutlak (kg/cm ²)
I	$\geq 0,90$	≥ 1.100	≥ 650
II	0,60 – 0,90	725 – 1.100	425 – 650
III	0,40 – 0,60	500 – 725	300 – 425
IV	0,30 – 0,40	300 – 500	215 – 300
V	$\leq 0,30$	≤ 300	≤ 215

Sumber: ESDM (2026)

Kayu Meranti termasuk ke dalam jenis kayu dengan kelas kuat II yang memiliki karakteristik mampu meredam deformasi batuan. Sifat Kuat Tekan Mutlak yang dimiliki kayu ini memungkinkan media penyangga untuk menerima beban vertikal dari *back* (atap) lubang secara merata, sementara Kuat Lentur Mutlak memberikan ketahanan kayu terhadap beban titik yang tidak merata, sehingga mencegah terjadinya kegagalan struktur pada titik kontak antara batuan dan busur baja.

4.2.2 Kapasitas Dukung Log Kayu

Penggunaan material kayu bulat (*log*) dengan spesifikasi dimensi tertentu merupakan aspek krusial dalam sistem penyanggaan hibrida antara komponen kayu dan baja arcis. Spesifikasi fungsional dimensi log kayu dirangkum dalam Tabel 4.9 berikut:

Tabel 4.9 Spesifikasi Dimensi dan Fungsionalitas Log Kayu Pada Lokasi J38

Parameter Teknis	Nilai Spesifikasi	Implikasi dan Fungsionalitas Mekanik
Diameter Log	15 – 17 cm	Menghasilkan luas penampang yang proporsional untuk menahan tekanan kompresi batuan.
Keliling Log	40 – 45 cm	Memastikan area kontak yang luas guna menghindari konsentrasi tegangan lokal.
Peran Struktural	<i>Cushioning</i>	Bertindak sebagai bantalan peredam antara batuan dinamis dan profil baja SS400.
Distribusi Beban	Transmisi Merata	Menjamin interaksi stabil antara batuan dan arcis guna menjaga integritas profil baja.

Sumber: penulis (2026)

Dimensi yang masif ini memberikan kapasitas dukung yang cukup untuk menghadapi karakteristik beban batuan di lubang sawahluwung yang cenderung bersifat dinamis dan tidak teratur. Dengan penampang yang luas, kayu mampu berperan sebagai perantara atau bantalan (*cushioning*) yang efektif, sehingga mencegah terjadinya kerusakan dini atau deformasi permanen pada penyangga baja akibat tekanan langsung dari massa batuan.

4.2.3 Dampak Kondisi Kelembapan

Kelembapan udara yang tinggi di J38 disebabkan oleh pengupasan drainase lantai yang menyebabkan penjemuran serat kayu secara permanen. Kelembapan relatif atau *relative humidity* (RH) dihitung menggunakan perbandingan antara tekanan uap air aktual dengan tekanan uap air jenuh pada suhu yang sama. (Rachmat, 2007)



Sumber: Penulis (2026)

Gambar 4.7 Anemometer

Nilai RH 89% ini menunjukkan kondisi yang sangat lembab, yang memicu:

1. Penurunan durabilitas
Di area kering kayu bertahan 2 tahun, namun di J38 hanya bertahan 1-2 bulan.
2. Serangga biologis
Ditemukan aktivitas rayap setiap 5 meter dan pertumbuhan jamur pada area siklus udara rendah.

Kondisi atmosferik di dalam tambang bawah tanah menciptakan tantangan tersendiri bagi material organik seperti kayu. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan psikrometer, didapatkan nilai RH sebesar 89,0%, yang menunjukkan tingkat kelembapan udara yang tinggi. Meskipun secara visual tidak ditemukan adanya rembesan air (*seepage*) langsung dari dinding atau atap lubang bukaan, keberadaan aliran drainase yang konstan di lantai tambang memberikan kontribusi besar terhadap uap air di udara. Kelembapan yang tinggi ini menyebabkan kayu mengalami penjuhan serat secara perlahan, yang secara drastis menurunkan kemampuan mekaniknya dalam menahan beban desak.

4.2.4 Faktor Penentu Umur Pakai Arcis

Evaluasi terhadap umur pakai sistem penyangga arcis menunjukkan adanya anomali antara ketahanan baja dengan kayu pendukungnya. Di satu sisi, arcis baja menunjukkan durabilitas yang sangat baik karena tidak pernah mengalami penggantian sejak pemasangan awal. Di sisi lain, komponen kayu seperti *stapling* menunjukkan performa yang bervariasi, beberapa titik terakhir diganti 4 tahun yang lalu, namun pada titik yang terpapar kelembapan drainase secara langsung, kerusakan terjadi jauh lebih cepat. Hal ini menegaskan bahwa faktor lingkungan (*mikroklimat*) lebih dominan dalam menentukan umur pakai dibandingkan beban mekanik itu sendiri.

Tabel 4.10 Dampak Terhadap Masa Pakai

Parameter Mutu	Penjelasan Naratif Lapangan	Dampak Terhadap Masa Pakai
Densitas & Jenis	Kayu meranti kelas II memberikan ketahanan tekan awal yang stabil bagi struktur arcis.	Memberikan stabilitas pada masa awal operasional
Kadar Air	Paparan uap air dari drainase (RH 89,0%) memicu pelapukan biologis meski tanpa rembesan	Masa pakai turun drastis menjadi hanya 1-2 bulan pada area lembap
Cacat Fisik	Tekanan beban pada kayu yang sudah melunak akibat lembap memicu retak serat.	Menjadi titik lemah yang mempercepat kegagalan struktural arcis
Kualitas Sambungan	Arcis baja sangat stabil, namun kayu stapling yang berusia 4 tahun mulai mengalami fatigue	Perlu penggantian parsial pada kayu stapling tua untuk menjaga geometri arcis

Sumber: Penulis (2026)

4.2.5 Pengaruh Kualitas Blok Kayu Terhadap Arcis

Analisis korelasi antara degradasi material kayu dengan perubahan dimensi fisik pada baja arcis di lokasi J38 menunjukkan adanya interaksi geomekanika yang kritis. Khususnya pada titik pengamatan 5 meter pertama, kegagalan mekanis kayu secara langsung memicu konvergensi (penyempitan) dimensi lubang bukaan. Korelasi teknis antara kegagalan kayu dan defleksi arcis dirangkum dalam Tabel 4.11:

Tabel 4.11 Defleksi Arcis Akibat Kegagalan Material Kayu (Lokasi J38 - 5m)

Tinggi Bebas	Kondisi Desain	Kondisi Aktual	Defleksi / Konvergensi	Status Mekanis Material
Tinggi Bebas	2,80 m	2,70 m	0,10 m (Vertikal)	Kayu pengganjal (<i>blocking</i>) terbelah; kehilangan fungsi penyerapan energi.
Lebar Bersih	4,40 m	4,29 m	0,11 m (Horizontal)	Kayu pelapis (<i>lagging</i>) gagal; transfer beban lateral langsung ke baja.
Profil Baja SS400	Simetris	Melengkung	Deformasi Plastis	Arcis tetap utuh (tidak patah), menyesuaikan beban kritis.
Distribusi Beban	Merata	Asimetris	Pembebanan Eksentrik	Ketidaksamaan kualitas kayu memicu puntiran pada profil.

Sumber: Penulis (2026)

Berdasarkan analisis di titik 5 meter pertama, terdapat korelasi langsung antara kegagalan mekanis kayu dengan defleksi (perubahan bentuk) pada *arcis*. Kegagalan kayu penahan mengakibatkan hilangnya fase penyerapan deformasi awal dari massa batuan pasir yang ekstrem. Kayu yang terbelah tidak lagi berfungsi sebagai bantalan elastis, sehingga beban batuan ditransfer secara kasar (*direct impact*) langsung ke busur baja arcis. Meskipun baja SS400 menunjukkan durabilitas material yang baik dengan tetap utuh, terjadinya penurunan dimensi vertikal sebesar 10 cm dan horizontal 11 cm mengindikasikan bahwa baja telah memasuki fase deformasi plastis.

Ketiadaan tindakan perawatan berupa penggantian kayu yang lapuk atau terbelah memperburuk integritas struktur dalam jangka panjang. Hilangnya volume material kayu akibat pembusukan biologis (*keropos*) menciptakan rongga yang memicu runtuhnya kecil batuan pasir, sehingga menimbulkan beban kejutan tambahan

(*impact load*). Kondisi ini memaksa baja arcis berupaya mencari keseimbangan baru dengan massa batuan di sekelilingnya melalui konvergensi masif. Tanpa adanya intervensi berupa penggantian komponen kayu, risiko kegagalan struktur total akan terus meningkat seiring bertambahnya usia pelapukan material kayu.

Pelapukan kayu merupakan proses degradasi fisik dan kimia pada material kayu yang disebabkan oleh faktor lingkungan, terutama kelembapan relatif RH yang tinggi, suhu, serta serangan organisme biologis seperti jamur (fungi) dan serangga (rayap) dapat dilihat pada Gambar B.3 dan B.4 Kondisi kayu Meranti Kelas Kuat II yang mengalami pelapukan/jamur dan Serangga (Rayap) Pada Komponen Kayu. Di lingkungan tambang bawah tanah seperti PT Bukit Asam Tbk Unit Pertambangan Ombilin, tingkat pelapukan sangat mempengaruhi integritas struktural sistem penyanggaan Arcis.

Berdasarkan hasil observasi pada lubang perawatan di lokasi J38, sebagian *wood blocking* (kayu Meranti Kelas II) yang berfungsi sebagai media distribusi beban pada struktur *steel arch* teridentifikasi mengalami pelapukan Tingkat III (Lapuk Sedang). Fase transisi ini ditandai dengan perubahan visual dan fisik yang signifikan, seperti warna kayu yang memucat atau menggelap serta munculnya retakan halus (*micro-cracks*) yang menandakan terlepasnya ikatan antar serat kayu. Degradasi ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lubang perawatan dengan kelembapan relatif (RH) tinggi yang mencapai 89%, sehingga menciptakan habitat ideal bagi pertumbuhan badan buah jamur yang terlihat menempel pada permukaan kayu dan perlahan merusak selulosa penyusun strukturnya.

Penurunan kualitas kayu pada Tingkat III ini juga terkonfirmasi melalui uji lapangan yang mengindikasikan penurunan kapasitas mekaniknya. Saat dilakukan uji ketuk, suara yang dihasilkan terdengar teredam akibat berkurangnya kepadatan internal kayu, sementara uji penetrasi menunjukkan bahwa lapisan luar kayu telah melunak hingga kedalaman 5–10 mm. Meskipun kayu masih menyisakan bagian inti yang cukup padat untuk menahan *steel arch*, pelunakan permukaan tersebut membuat bantalan kayu lebih mudah terkompresi saat menerima beban tekan dari atap lubang. Kondisi lapuk sedang ini berpotensi memicu pelonggaran pada sistem penyanggaan pasif, sehingga pemantauan ekstra sangat diperlukan agar kestabilan penyangga di lokasi J38 tetap terkendali dapat dilihat pada tabel 4.12:

Tabel 4.12 Klasifikasi Pelapukan Kayu

Tingkat (Grade)	Kondisi (Status)	Deskripsi Visual & Fisik	Uji Lapangan (Penetrasi/Suara)
I	Segar (<i>Fresh</i>)	Warna kayu asli, tidak ada tanda serangan jamur, serat kayu rapat dan padat.	Suara denting keras saat dipukul palu; pisau sulit menembus permukaan.
II	Lapuk Ringan (<i>Slightly Weathered</i>)	Terjadi perubahan warna (<i>discoloration</i>) pada permukaan, bercak jamur tipis mulai terlihat.	Suara sedikit redup; penetrasi pisau hanya pada lapisan permukaan (< 2mm).
III	Lapuk Sedang (<i>Moderately Weathered</i>)	Warna kayu memucat/gelap, terdapat retakan halus (<i>micro-cracks</i>), badan buah jamur terlihat jelas.	Suara pukulan palu teredam (mendem); pisau dapat menusuk masuk hingga 5-10 mm.
IV	Lapuk Berat (<i>Highly Weathered</i>)	Struktur kayu melunak, serat mulai terpisah/berserabut, volume kayu menyusut.	Kayu terasa "empuk" seperti spons; dapat dicungkil dengan jari atau obeng dengan mudah.
V	Lapuk Total (<i>Completely Weathered</i>)	Integritas struktural hilang, kayu hancur menjadi serbuk atau fragmen kecil saat ditekan.	Sangat berbahaya untuk menyangga beban; kapasitas dukung dianggap nol.

Sumber: ESDM (2018)

Sesuai dengan Kepmen ESDM No. 1827 K/2018, penggunaan kayu sebagai pengisi rongga (*cribbing*) harus memperhatikan penurunan kekuatan akibat pelapukan. Kayu Meranti Kelas II yang mengalami pelapukan Tingkat III dapat mengalami penurunan kuat tekan hingga 50%. Hal ini mengakibatkan distribusi beban dari atap menuju busur baja Arcis menjadi tidak merata, yang berpotensi menyebabkan kegagalan sistem penyangga secara mendadak.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan perhitungan data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi aktual penyangga arcis pada lubang sawahluwung terjadi deviasi dimensi lubang bukaan (*underbreak*) dengan penurunan tinggi sebesar 0,10 m dan penyempitan lebar 0,11 m. Kondisi ini dipicu oleh kegagalan material kayu penahan (*blocking*) yang terbelah akibat tekanan batuan, sehingga beban massa batuan berpindah langsung ke rangka baja SS400 dan menyebabkan baja mengalami deformasi plastis (melengkung secara asimetris).
2. Kualitas material blok kayu terhadap umur pakai arcis dengan kondisi lubang yang sangat lembap (RH 89,0%) akibat penguapan drainase lantai menjadi penyebab utama kerusakan biologis pada blok kayu Meranti Kelas kuat II. Tingginya tingkat kelembapan ini memicu serangan rayap dan jamur secara masif yang memangkas umur pakai efektif kayu secara drastis, dari estimasi awal 2 tahun menjadi hanya 1-2 bulan. Hancurnya material ini mengakibatkan hilangnya fungsi kayu sebagai penyerap energi, yang pada akhirnya menurunkan efektivitas dan umur pakai *steel arch* (arcis)."

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka disarankan beberapa tindakan teknis bagi perusahaan sebagai berikut:

1. Optimasi Pemasangan dan Tindakan Korektif Segera
Melakukan penggantian segera terhadap komponen kayu (*blocking* dan *lagging*) yang telah lapuk atau terbelah, terutama pada interval 5 meter pertama lokasi J38. Pemasangan elemen pendukung baru harus dipastikan rapat tanpa rongga (*zero void*) untuk menjamin kontak 360 derajat antara baja arcis dan batuan guna mengeliminasi risiko tegangan terpusat (*point loading*).

2. Manajemen Lingkungan dan Perlindungan Material

Melakukan tindakan preventif berupa pengawetan kayu menggunakan cairan anti-rayap dan fungisida sebelum instalasi bawah tanah untuk meningkatkan durabilitas di area lembap. Selain itu, diperlukan rekayasa sistem drainase (menggunakan saluran tertutup) dan peningkatan ventilasi lokal untuk menurunkan tingkat kelembapan udara guna memperlambat laju korosi pada baja dan pelapukan pada kayu.



DAFTAR PUSTAKA

- Dwinagara., (2020). *Evaluasi Ground Support Berdasarkan Klasifikasi Massa Batuan Rock Mass Index dan Rock Mass Rating serta Menggunakan Finite Element Method Numerical Modeling pada Tambang Bawah Tanah Kencana PT Nusa Halmahera Minerals*. Jurnal Geoteknik Pertambangan, 14(2), hal. 45–58.
- Guley, C. (2023). *Application, Mechanics, and Durability of Timber Supports in Modern Underground Mining Operations*. International Journal of Underground Mining Systems, 19(3), hal. 201–215.
- Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (Eds.). (2001). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), hal. 345–362.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Jakarta: KESDM RI, hal. 215–230 (Lampiran II Pedoman Keselamatan Kerja Pertambangan Bawah Tanah).
- PKKI. (1961). *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia (NI-5)*. Bandung: Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, hal. 12–22.
- Pratama, R. (2021). *Studi Karakteristik Massa Batuan dan Evaluasi Penyangga Kayu pada Lubang Tambang Batubara BMK-35 CV. Bara Mitra Kencana, Talawi Sawahlunto*. Skripsi/Tugas Akhir, Program Studi Teknik Pertambangan, Sawahlunto, hal. 56–74.
- PT Bukit Asam Tbk., (2019). *Bukit Asam Received Certificate of Ombilin Coal Mining Heritage of Sawahlunto*. Tanjung Enim: Corporate Communication PTBA, hal. 1–4.
- Rachmat, R. K. (2007). *Pengaruh Pengawetan terhadap Sifat Mekanis Tiga Jenis Kayu Komersial*. Laporan Penelitian, Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan, hal. 14–29.
- Rahman, N. (2025). *Analisis Historis dan Profil Geoteknis Tambang Batubara Bawah Tanah Ombilin Sawahlunto*. Jurnal Sejarah dan Industri Pertambangan Indonesia, 5(1), hal. 88–97.
- UNESCO. (2019). *Ombilin Coal Mining Heritage of Sawahlunto*. Paris: UNESCO World Heritage Centre, hal. 12–19.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Mendukung analisis hubungan antara kondisi geologi, kualitas massa batuan, dan kinerja sistem penyangga di tambang bawah tanah.

Brady, B. H. (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining (3rd ed.)*. Springer.

Cahyono, Y. D. (2023). Sistem Penyanggaan dalam Terowongan. Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya (ITATS).

Ginting, A. P. (2021). Inovasi Sistem Penyanggaan di Tambang Bawah Tanah DMLZ PT Freeport Indonesia. Prosiding Konferensi Universitas Sriwijaya.

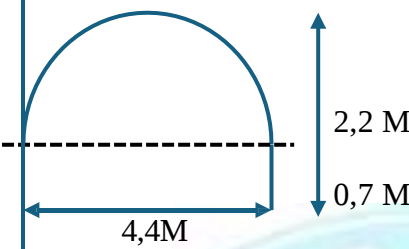
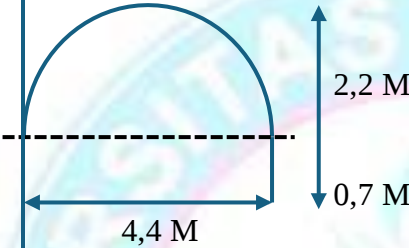
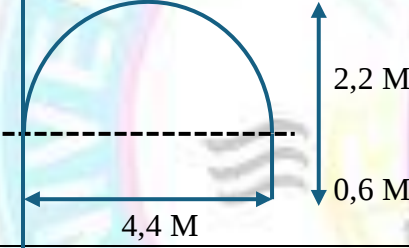
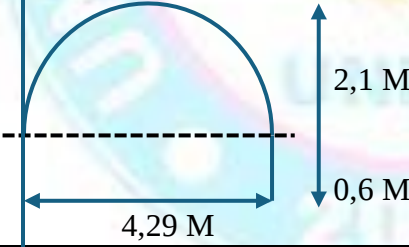
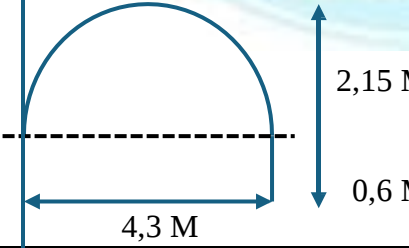
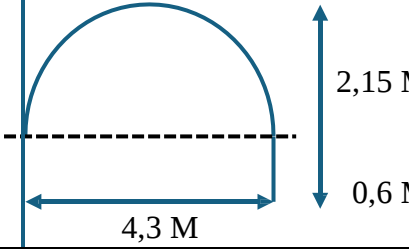
Hoek, E. K. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock.

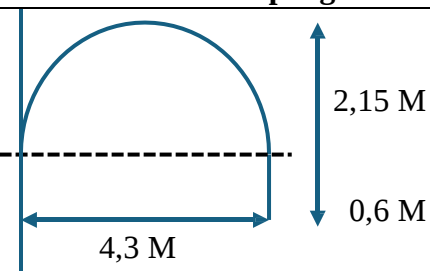
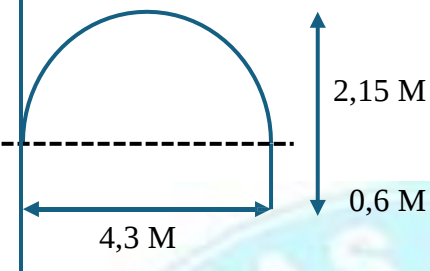
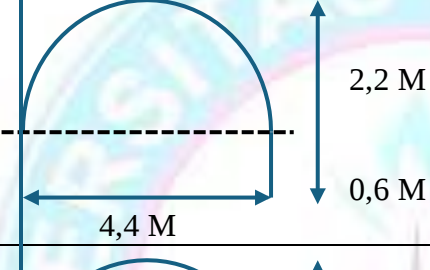
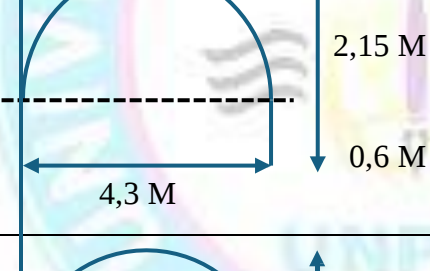
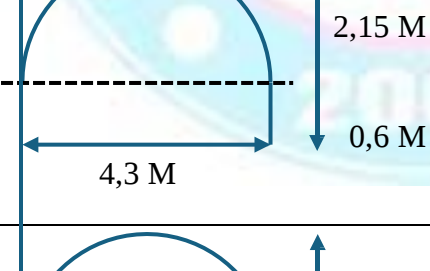
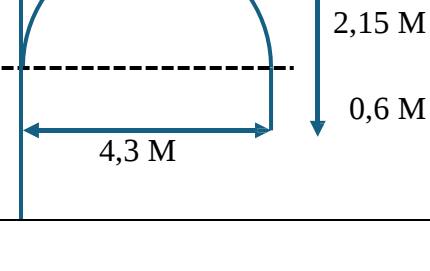


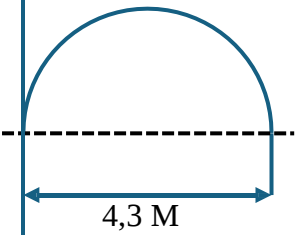
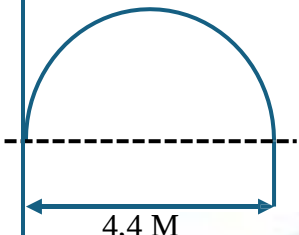
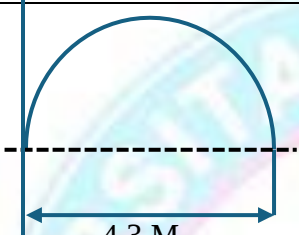
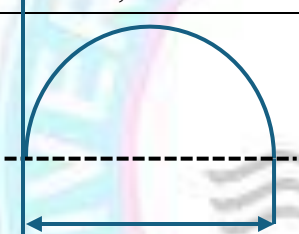
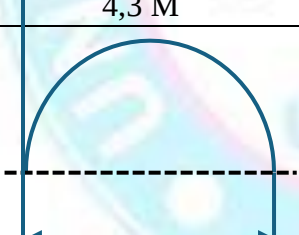
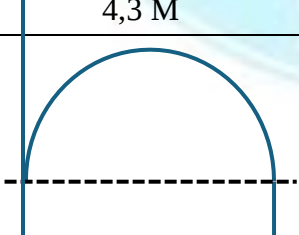
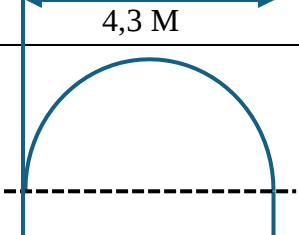
LAMPIRAN A

Data Pengukuran Lapangan

Tabel A.1 Perhitungan Luas Penampang tinggi dan lebar aktual (Titik 1-19)

No	Lokasi	Bentuk Penampang	Perhitungan Luas Penampang
1	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,9 - 2,2) x 4,4 = 3,08 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 3,08 = 9,98 \text{ m}^2$
2	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,9 - 2,2) x 4,4 = 3,08 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 3,08 = 9,98 \text{ m}^2$
3	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,8 - 2,2) x 4,4 = 2,64 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 2,64 = 9,54 \text{ m}^2$
4	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,1^2}{2} = 6,59 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,7 - 2,1) x 4,29 = 2,57 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,59 + 2,57 = 9,16 \text{ m}^2$
5	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
6	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$

No	Lokasi	Bentuk Penampang	Perhitungan Luas Penampang
7	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
8	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
9	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,8 - 2,2) x 4,4 = 2,64 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 2,64 = 9,54 \text{ m}^2$
10	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
11	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
12	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$

No	Lokasi	Bentuk Penampang	Perhitungan Luas Penampang
13	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
14	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,8 - 2,2) x 4,4 = 2,64 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 2,64 = 9,54 \text{ m}^2$
15	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
16	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
17	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
18	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,15^2}{2} = 6,75 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,75 - 2,15) x 4,3 = 2,58 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,75 + 2,58 = 9,33 \text{ m}^2$
19	J38 – J37		$A^1 = \left(\frac{1}{2} \pi x r^2\right) = \frac{3,14 x 2,2^2}{2} = 6,90 \text{ m}^2$ $A^2 = (2,8 - 2,2) x 4,4 = 2,64 \text{ m}^2$ $A^1 + A^2 = 6,90 + 2,64 = 9,54 \text{ m}^2$

Sumber: Penulis (2026)

LAMPIRAN B

Spesifikasi Baja SS400

Tabel B.1 Komposisi Kimia (*Chemical Composition*)

Unsur Kimia	Simbol	Persentase (%)	Keterangan
Karbon	C	Tidak ditentukan	Umumnya berkisar antara 0,17% - 0,20%
Mangan	Mn	Tidak ditentukan	Umumnya berkisar maksimal 1,40%
Fosfor	P	Maks. 0,050 %	Berpengaruh pada kegetasan baja
Belarang / Sulfur	S	Maks. 0,050 %	Mempengaruhi sifat mampu las (<i>weldability</i>)

Sumber: Penulis (2026)

Tabel B.2 Sifat Mekanis (*Mechanical Properties*)

Parameter mekanis	Nilai Standar	Keterangan / Implikasi Lapangan
Kuat tarik	400-500 Mpa	batas maksimal tegangan sebelum material baja putus/patah
Kuat luluh	≥ 245 Mpa (tebal ≤ 16 mm)	batas tegangan elastis. Di atas nilai ini, arcis akan melengkung secara permanen
Regangan	17%-21%	menunjukkan dektilitas (kelenturan) baja yang baik sebelum putus akibat tegangan konvergensi

Sumber: Penulis (2026)

LAMPIRAN C

Dokumentasi Foto Lapangan



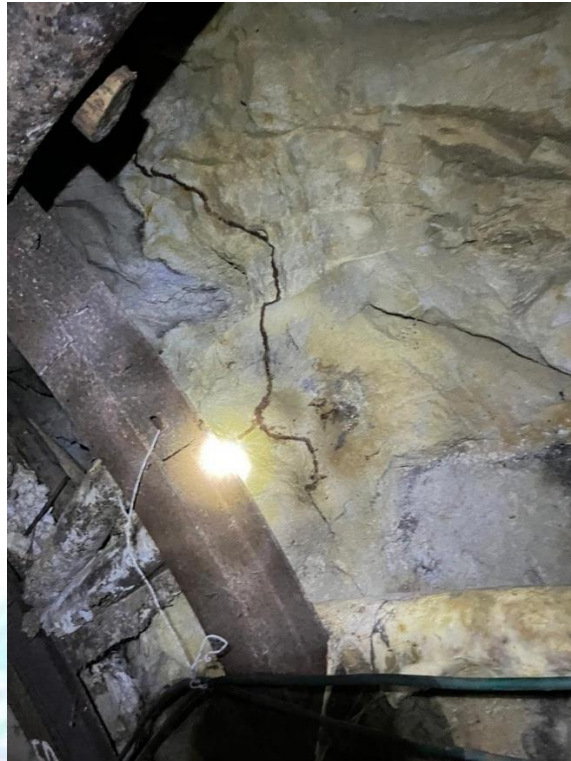
Sumber: penulis (2026)

Gambar C.1 Detail rongga kosong (*void*) antara batuan atap dan blok kayu.



Sumber: Penulis (2026)

Gambar C.3 Kondisi kayu Meranti Kelas II yang mengalami pelapukan/jamur.



Sumber: Penulis (2026)

Gambar C.4 Serangga (Rayap) Pada Komponen Kayu.