LAPORAN AKHIR
Inovasi Unggul Berdampak ITB – 2026

Pengembangan Alat Uji Kemampuledakan Debu Batubara Guna Mendukung Penerapan Green Mining Technology di Indonesia

Ketua Tim Periset
Prof. Dr.Eng. Nuhindro Priagung Widodo,M.T.

Nama KK/ Fakultas/ Sekolah:
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
November,2026

HALAMAN PENGESAHAN

1. Judul : Pengembangan Alat Uji Kemampuledakan Debu Batubara Guna Mendukung Penerapan Green Mining Technology di Indonesia
2. Mitra Riset : CV. Marnov Engineering
3. Waktu Pelaksanaan : 20/02/2026 – 11/11/2026
4. Tim Riset :
   a. Nama Lengkap Ketua Tim : Prof. Dr.Eng. Nuhindro Priagung Widodo,M.T.
   b. N I P : 197507202006041001
   c. Pangkat/Golongan : Guru besar/ golongan IVB
   d. Jabatan : Ketua Kelompok Keahlian
   e. Fakultas/Sekolah : FTTM
   f. Kelompok Keahlian : Teknik Pertambangan

4.1 Anggota Tim Riset :

No	Nama dan Gelar Akademik	Bidang Keahlian	Instansi
1	Prof. Dr.Eng. Ir. Nuhindro Priagung Widodo, M.T.	Mine Explosion	ITB
2	Aqsha, S.T., M.Sc., Ph.D.	Organic Geochemistry	ITB
3	Dr.Eng. Ahmad Ihsan, S.T., M.T.	Mine Safety	ITB
4	Dr.Eng. Arif Widiatmojo, S.T.	Mine Safety	ITB
5	Dr.Eng. Salmawati, S.T., M.T.	Mine Explosion	ITB
6	Hasbi Ash Shiddiqi, S.T., M.T.	Mine Safety	ITB
7	Anindya Nada Arinal Haque, S.T., M.T	—	ITB
8	Andika Rifqi Mulia	—	ITB

5. Nominal pendanaan : Rp 200,000,000
6. Target TKT : 5
7. Luaran yang dijanjikan : 1. Prototipe/TRL (100%)
   2. HAKI (100%)

Mengetahui,

Mitra Riset



Ammar Novel, S.T.
Direktur CV Marnov Engineering

Bandung, 10 Oktober 2026

Ketua Tim Riset



Prof. Dr.Eng. Nuhindro Priagung Widodo,M.T.
NIP 197507202006041001

II. RINGKASAN EKSEKUTIF

Pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara dilatarbelakangi oleh meningkatnya aktivitas pertambangan batubara bawah tanah di Indonesia yang memiliki risiko ledakan akibat akumulasi debu batubara di ruang tertutup. Permasalahan utama pada alat eksisting meliputi keterbatasan presisi pengukuran tekanan, ketidakstabilan energi penyalaan, serta mekanisme penguncian tudung dan pembuangan emisi yang masih manual. Inovasi ini bertujuan meningkatkan kinerja alat berbasis tabung peledakan tertutup 20 liter melalui pengembangan sistem akuisisi data tekanan, ignitor elektrik terkontrol, dan mekanisme keselamatan otomatis. Capaian utama meliputi terealisasinya prototipe *Exploding Wire Igniter* yang berhasil diuji menggunakan konfigurasi sepuluh kapasitor dengan energi tersampaikan maksimum sekitar 1.348 J. Kebaruan inovasi terletak pada integrasi sistem penyalaan elektrik yang terkontrol, pengukuran berpresisi tinggi, serta mekanisme penguncian *fail-safe* untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan pengujian. Kegiatan ini melibatkan CV Marnov Engineering sebagai mitra dengan kompetensi otomasi, sensor, dan perangkat lunak, didukung kolaborasi multidisiplin ITB. Inovasi ini diharapkan meningkatkan keselamatan pekerja tambang, mengurangi ketergantungan terhadap fasilitas pengujian luar negeri, serta memperkuat riset dan standardisasi nasional. Tindak lanjut difokuskan pada penyempurnaan, validasi terintegrasi, dan hilirisasi teknologi untuk industri pertambangan maupun industri lain yang memiliki potensi ledakan debu. Saat ini 100% luaran wajib sudah terpenuhi.

III. DOKUMEN TAHAP INOVASI

3.1 Dokumen Spesifikasi

3.1.1 Deskripsi Umum

Inovasi yang diusulkan berupa pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara berbasis tabung uji peledakan tertutup 20 liter dengan peningkatan pada subsistem utama. Prinsip kerja alat tetap mengacu pada standar internasional, yaitu dispersi debu batubara bertekanan tinggi ke dalam tabung uji, diikuti proses penyalaan dan perekaman tekanan secara real time.

Exploding Wire Igniter adalah sistem penghasil pulsa arus tinggi jangka pendek yang memanfaatkan pelepasan muatan bank kapasitor melalui kawat tipis. Ketika arus pulsa melebihi kemampuan termal kawat, kawat mengalami peledakan listrik (exploding wire) dan menghasilkan energi termal serta efek tekanan lokal yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber penyalaan atau uji peledakan kawat dalam lingkungan terkendali.

Pengembangan dilakukan secara bertahap. Pada tahap awal, sistem dibangun lengkap sesuai arsitektur akhir, tetapi diuji dengan dua kapasitor pada batas 200 V. Setelah verifikasi, pengujian dilanjutkan pada bank sepuluh kapasitor hingga setpoint 330 V. Dokumen ini bersifat teknis untuk laporan/publikasi dan dilengkapi ringkasan hasil uji dari lembar data pengukuran, tanpa menyalin seluruh baris data mentah.

Sistem terdiri atas rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Kontaktor K1 (charger) dan K2 (dump) menghubungkan keduanya. Hilangnya daya kontrol menurunkan semua koil sehingga kutub NC dump menutup dan bank dikosongkan melalui 50 Ω (fail-safe).

Rantai pengisian: PLN → MCB 6 A → kontaktor K1 → variac → transformator isolasi → sekering AC → jembatan penyearah → sekering DC → resistor 200 Ω → busbar positif. Arus pengisian dibatasi pada orde ampere; jalur pulsa kiloampere terpisah melalui SCR dan kabel las 35 mm^2.

ESP32 mengatur urutan arm–charge–fire–dump, membaca pembagi tegangan bank, dan memicu gate driver terisolasi. Shunt 1000 A / 75 mV dipakai untuk mengestimasi arus puncak bila tegangan puncak shunt tercatat.

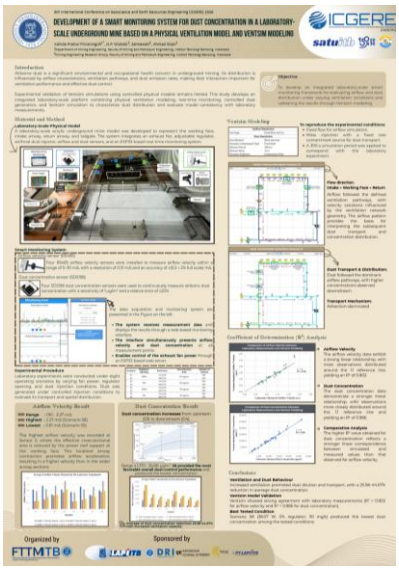
3.1.2 Spesifikasi luaran

Tabel 1 Luaran Pengembangan Alat Uji Kemampuledakan Debu Batubara Guna Mendukung Penerapan Green Mining Technology di Indonesia

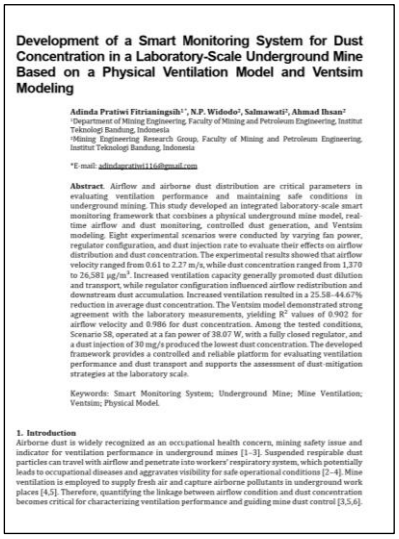
No	Jenis Luaran	Spesifikasi Teknis	Indikator Keberhasilan	Bukti yang Diharapkan
1.	Prototipe alat uji kemampuledakan debu batubara	Pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara berbasis tabung uji peledakan tertutup 20 liter dengan peningkatan pada subsistem utama. Integrasi sistem ignitor elektrik beserta unit kontrolnya, sensor tekanan berkecepatan tinggi dan sistem akuisisi data, serta mekanisme lock tudung dan sistem pembuangan emisi ledakan.	1. Meningkatnya presisi dan keandalan data tekanan dibandingkan sistem sebelumnya. 2. Tercapainya energi penyalaan yang konsisten pada setiap siklus pengujian. 3. Berfungsinya sistem lock tudung secara aman tanpa kegagalan selama pengujian. 4. Keberhasilan validasi prototipe di lingkungan laboratorium sebagai bukti capaian TKT 5.	1. Foto kegiatan dan prototipe. 2. Laporan hasil uji laboratorium. 3. Sertifikat hasil uji performa. 4. Screenshot hasil perhitungan TKT.
2.	HAKI	Algoritma dari perangkat lunak alat uji kemampuledakan debu batubara.	Bukti pendaftaran Hak Kekayaan Intelektual.	Bukti pendaftaran HKI.

LUARAN TAMBAHAN

1. Prosiding Internasional.



2. Prosiding Nasional.



Development of a Smart Monitoring System for Dust Concentration in a Laboratory-Scale Underground Mine Based on a Physical Ventilation Model and Ventsim Modeling

Adinda Pratiwi Fitrianingsih[1*], N.P. Widodo[2], Salmawati[2], Ahmad Ihsan[2]
[1]Department of Mining Engineering, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
[2]Mining Engineering Research Group, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
*E-mail: adindapratiwi116@gmail.com

Abstract. Airflow and airborne dust distribution are critical parameters in evaluating ventilation performance and maintaining safe conditions in underground mining. This study developed an integrated laboratory-scale smart monitoring framework that combines a physical underground mine model, real-time airflow and dust monitoring, controlled dust generation, and Ventsim modeling. Eight experimental scenarios were conducted by varying fan power, regulator configuration, and dust injection rate to evaluate their effects on airflow distribution and dust concentration. The experimental results showed that airflow velocity ranged from 0.61 to 2.27 m/s, while dust concentration ranged from 1,370 to 26,581 µg/m³. Increased ventilation capacity generally promoted dust dilution and transport, while regulator configuration influenced airflow redistribution and downstream dust accumulation. Increased ventilation resulted in a 25.58–44.67% reduction in average dust concentration. The Ventsim model demonstrated strong agreement with the laboratory measurements, yielding R^2 values of 0.902 for airflow velocity and 0.986 for dust concentration. Among the tested conditions, Scenario S8, operated at a fan power of 38.07 W, with a fully closed regulator, and a dust injection of 30 mg/s produced the lowest dust concentration. The developed framework provides a controlled and reliable platform for evaluating ventilation performance and dust transport and supports the assessment of dust-mitigation strategies at the laboratory scale.

Keywords: Smart Monitoring System; Underground Mine; Mine Ventilation; Ventsim; Physical Model.

1. Introduction
Airborne dust is widely recognized as an occupational health concern, mining safety issue and indicator for ventilation performance in underground mines [1–3]. Suspended respirable dust particles can travel with airflow and penetrate into workers' respiratory system, which potentially leads to occupational diseases and aggravates visibility for safe operational conditions [2–4]. Mine ventilation is employed to supply fresh air and capture airborne pollutants in underground work places [4,5]. Therefore, quantifying the linkage between airflow condition and dust concentration becomes critical for characterizing ventilation performance and guiding mine dust control [3,5,6].

3. Publikasi pada Jurnal Internasional Bereputasi Q2.



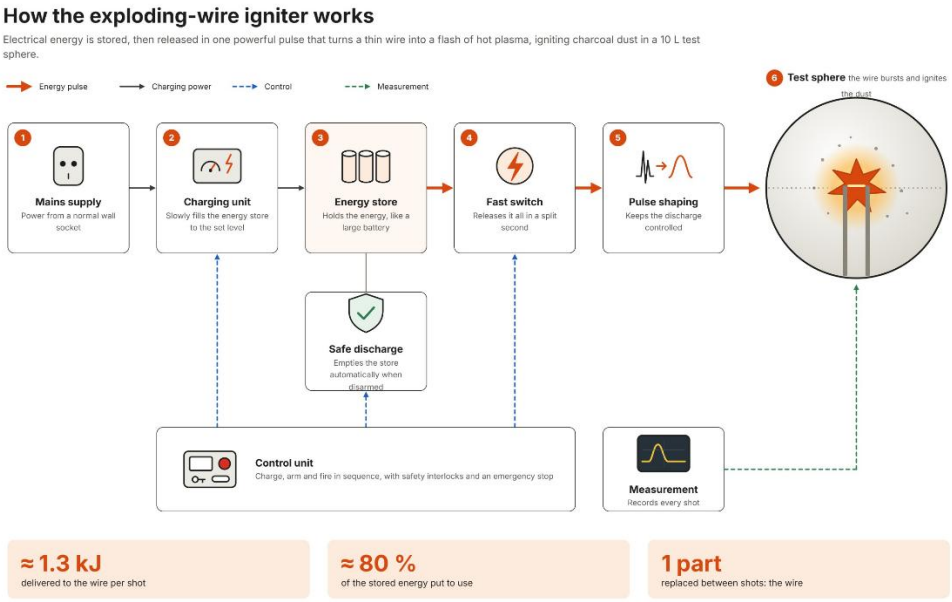
3.2 Dokumen Desain

3.2.1 Tujuan Desain

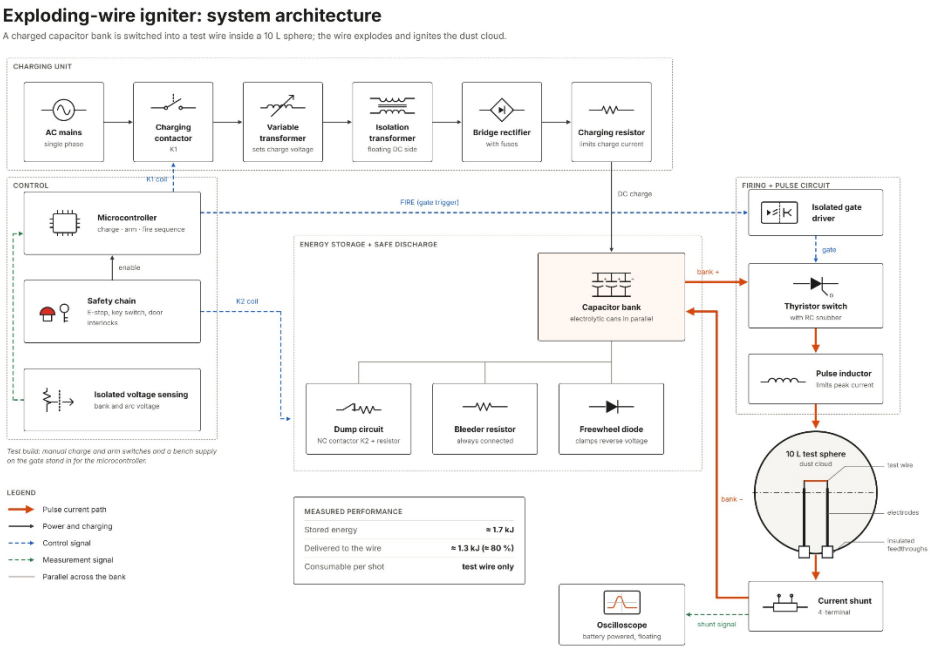
Tujuan dari inovasi yang diusulkan adalah mengembangkan dan meningkatkan kinerja alat uji kemampuledakan debu batubara skala laboratorium melalui integrasi sistem yang lebih andal, presisi, dan aman.

Secara khusus, tujuan inovasi ini meliputi:

1. Mengembangkan sistem akuisisi data tekanan berkecepatan tinggi yang mampu merekam dinamika tekanan ledakan secara lebih presisi dan reliabel.
2. Mengimplementasikan sistem ignitor berbasis sumber elektrik sebagai pengganti sistem piroteknik konvensional untuk meningkatkan konsistensi energi penyalaan dan keselamatan operasional.
3. Merancang sistem lock tudung dan pembuangan emisi ledakan yang lebih kuat dan andal, sehingga meningkatkan aspek keselamatan pengguna dan kesiapan alat untuk pengujian berulang.



Gambar 1. Skematik cara alat bekerja



Gambar 2. Sistem Arsitektur alat

Metode perancangan dilakukan melalui pendekatan requirement-based engineering, dengan mengidentifikasi kebutuhan teknis dan keselamatan berdasarkan evaluasi kinerja alat eksisting. Desain teknis dilakukan melalui pemodelan sistem, pemilihan komponen utama (sensor tekanan, sistem kontrol, dan material mekanik), serta perancangan integrasi antar-subsistem agar dapat bekerja secara sinergis.

Kriteria keberhasilan desain ditentukan berdasarkan terpenuhinya spesifikasi teknis dan keselamatan pada setiap subsistem yang dikembangkan. Adapun indikator keberhasilan desain meliputi:

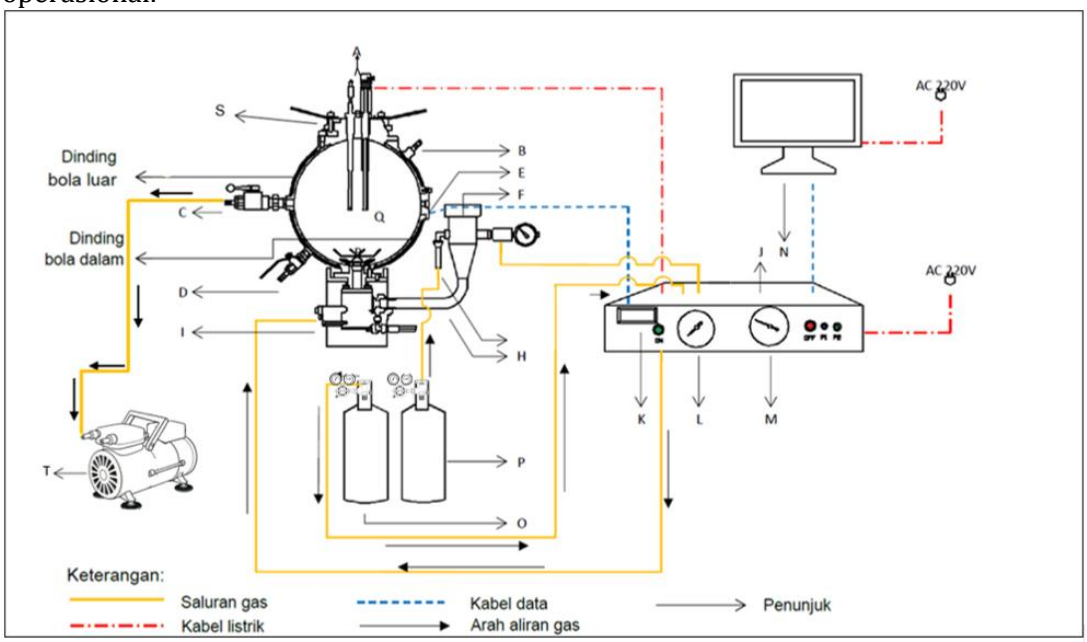
1. Meningkatnya presisi dan keandalan data tekanan dibandingkan dengan sistem sebelumnya.
2. Tercapainya energi penyalaan yang konsisten pada setiap siklus pengujian.
3. Berfungsinya sistem lock tudung secara aman tanpa kegagalan selama pengujian.
4. Keberhasilan validasi prototipe di lingkungan laboratorium sebagai bukti capaian TKT 5.

3.2.2 Desain Inovasi

Inovasi yang diusulkan berupa pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara berbasis tabung uji peledakan tertutup 20 liter dengan peningkatan pada subsistem utama. Prinsip kerja alat tetap mengacu ke standar internasional, yaitu dispersi debu batubara bertekanan tinggi ke dalam tabung uji, diikuti proses penyalaan dan perekaman tekanan secara real time. Pengembangan difokuskan pada tiga bagian utama sebagai berikut.

1. Sistem akuisisi data tekanan berkecepatan tinggi
   Alat yang digunakan saat ini menggunakan sensor tekanan yang mampu membaca perubahan tekanan secara cepat. Namun, kelemahannya adalah sensor tersebut mempunyai durabilitas yang singkat. Dari pengalaman kami, sensor hanya mampu beroperasi dengan akurat dalam 25–30 kali percobaan. Untuk itu, sensor tersebut akan diganti dengan sensor berkecepatan tinggi dan stabilitas pengukuran yang lebih baik serta pembuatan sistem akuisisi data tekanan berpresisi tinggi.
2. Sistem ignitor elektrik terkontrol
   Ignitor yang ada pada saat ini masih menggunakan sistem manual, sehingga akurasi energi ignitor tidak begitu konstan. Inovasi yang dilakukan adalah penggantian ignitor piroteknik dengan sistem ignitor elektrik yang memiliki kontrol energi lebih stabil dan repetabel.

3. Sistem lock tudung dan pembuangan emisi otomatis
   Pada alat yang sekarang, mekanisme penguncian tudung masih bersifat mekanis sederhana dan bergantung pada pengoperasian manual. Akibatnya, bagian tersebut berpotensi menimbulkan risiko lepasnya tekanan, terutama apabila teknisi lupa dengan SOP. Oleh karena itu, inovasi yang diajukan adalah perancangan sistem lock tudung yang diperkuat dan dilengkapi mekanisme fail-safe untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional.



Gambar 3. Skematik Sistem *Lock* Tudung

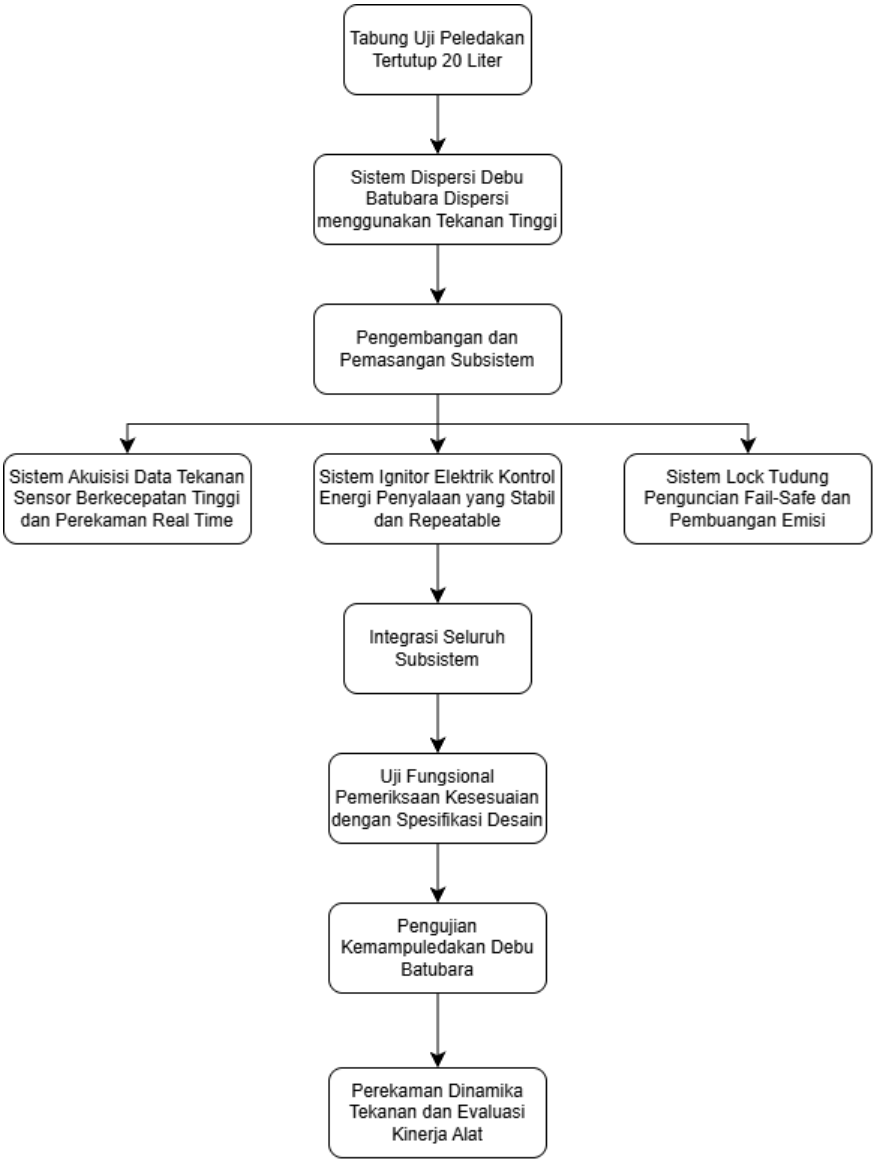
Pengembangan desain inovasi ini didasarkan pada beberapa keterbatasan yang masih ditemukan pada alat uji kemampuledakan debu batubara eksisting, terutama pada aspek presisi dan keandalan pengukuran tekanan, konsistensi energi penyalaan, serta keselamatan operasional. Oleh karena itu, inovasi difokuskan pada peningkatan tiga subsistem utama untuk menghasilkan alat uji yang lebih presisi, efisien, dan aman secara operasional. Aspek kebaruan dari inovasi ini terletak pada:

1. Sistem akuisisi data tekanan berpresisi tinggi yang mampu menangkap perubahan tekanan secara lebih akurat dan reliabel.
2. Penggunaan sistem ignitor elektrik yang memberikan energi penyalaan lebih konsisten dibandingkan piroteknik konvensional.
3. Desain sistem lock tudung yang diperkuat untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional.

Pengembangan desain tersebut ditujukan untuk memenuhi kebutuhan industri tambang batubara bawah tanah, lembaga riset, serta instansi pemerintah yang memerlukan pengujian kemampuledakan debu batubara sebagai bagian dari pengelolaan risiko keselamatan dan kepatuhan terhadap regulasi. Selain itu, ke depannya alat ini juga berpotensi untuk dikembangkan dalam pengujian sampel debu dari industri lain yang memiliki potensi ledakan, seperti industri makanan (tepung), industri perkebunan (pengolahan bubuk teh), industri metalurgi (rotary kiln) dan industri lainnya.

Keunggulan inovasi yang diajukan dalam riset ini diharapkan akan mendukung pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara yang lebih presisi, efisien dan aman secara operasional. Pemanfaatan teknologi sensor real time guna mengidentifikasi potensi ledakan debu batubara tentunya akan berkontribusi pada penerapan green mining technology di Indonesia. Selain itu, inovasi juga diharapkan akan meningkatkan TKT alat uji hingga nanti siap menuju hilirisasi.

3.2.3 Diagram & Jadwal Pelaksanaan



Gambar 4. Diagram Alur Kegiatan Penelitian

Tabel 2 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov
1	Persiapan tabung uji peledakan tertutup 20 liter	x	x								
2	Pengembangan system dispersi debu Batubara		x	x							
3	Pengembangan system akuisisi data tekanan		x	x	x						
4	Pengembangan system ignitor elektrik			x	x	x					
5	Pengembangan system lock tudung			x	x	x					

	dan pembuangan emisi										
6	Integrasi seluruh subsistem					x	x				
7	Uji fungsional prototipe						x	x			
8	Pengujian kemampuledakan debu Batubara							x	x	x	
9	Perekaman dinamika tekanan dan evaluasi kinerja alat								x	x	x

3.3 Dokumen Implementasi

3.3.1 Rencana Kegiatan

Pelaksanaan kegiatan pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara dilakukan secara bertahap dan terstruktur untuk meningkatkan keandalan, presisi, dan keselamatan alat tanpa mengubah prinsip dasar pengujian yang telah dikembangkan sebelumnya. Kegiatan implementasi mencakup analisis kebutuhan teknis dan keselamatan, perancangan ulang subsistem inovasi, pembuatan dan integrasi prototipe, pengujian dan validasi laboratorium, serta evaluasi capaian Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT). Tahapan implementasi beserta metode, alat dan sumber daya, serta target yang ingin dicapai dijelaskan sebagai berikut.

1. Analisis Kebutuhan Teknis dan Keselamatan

Tahap awal dilakukan melalui evaluasi performa sistem eksisting berdasarkan hasil pengujian sebelumnya. Evaluasi difokuskan pada identifikasi keterbatasan sistem akuisisi data tekanan, sistem penyalaan, serta mekanisme penguncian tudung. Hasil evaluasi digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan teknis dan keselamatan sebagai dasar pengembangan subsistem inovasi.

- Metode: Evaluasi kinerja alat eksisting dan identifikasi kebutuhan teknis menggunakan pendekatan requirement-based engineering.
- Alat yang digunakan: Tabung uji peledakan tertutup 20 liter dan sistem pengujian eksisting.
- Sumber daya: Tim peneliti bidang teknik pertambangan, keselamatan tambang, serta mitra yang memiliki keahlian otomasi dan sensor.
- Target: Teridentifikasinya kebutuhan teknis dan keselamatan serta keterbatasan utama pada sistem akuisisi data, ignitor, dan mekanisme lock tudung.

2. Perancangan Ulang Subsistem Inovasi

Perancangan dilakukan dengan mengembangkan tiga subsistem utama, yaitu sistem akuisisi data tekanan berkecepatan tinggi, sistem ignitor berbasis sumber elektrik, serta sistem lock tudung dan pembuangan emisi otomatis. Desain teknis dilakukan melalui pemodelan sistem, pemilihan komponen utama, serta perancangan integrasi antarsubsistem agar dapat bekerja secara sinergis.

- Metode: Pemodelan sistem, pemilihan komponen utama, dan perancangan integrasi antarsubsistem.
- Alat yang digunakan: Perangkat perancangan sistem, komponen sensor tekanan, sistem kontrol, serta komponen mekanik yang diperlukan.
- Sumber daya: Tim peneliti dan mitra dengan keahlian di bidang otomasi, sensor, perangkat lunak, dan rekayasa mekanik.

- Target: Tersusunnya desain teknis ketiga subsistem inovasi yang memenuhi kebutuhan presisi pengukuran, konsistensi energi penyalaan, dan keselamatan operasional.

3. Pembuatan dan Integrasi Prototipe

Pembuatan prototipe dilakukan dengan memodifikasi dan menambahkan subsistem inovatif pada tabung uji peledakan tertutup volume 20 liter yang telah tersedia. Kegiatan meliputi fabrikasi dan pemasangan sistem ignitor elektrik beserta unit kontrolnya, instalasi sensor tekanan berkecepatan tinggi dan sistem akuisisi data, serta penguatan mekanisme lock tudung dan sistem pembuangan emisi ledakan. Selanjutnya dilakukan integrasi subsistem dan penyesuaian antarmuka perangkat lunak.

- Metode: Fabrikasi, pemasangan komponen, modifikasi sistem eksisting, dan integrasi subsistem.
- Alat yang digunakan: Tabung uji peledakan tertutup 20 liter, sistem ignitor elektrik, sensor tekanan berkecepatan tinggi, sistem akuisisi data, sistem kontrol, serta komponen mekanik pengunci tudung dan pembuangan emisi.
- Sumber daya: Tim peneliti, teknisi, serta mitra riset dalam bidang otomasi, sensor, perangkat lunak, dan rekayasa mekanik.
- Target: Terbangunnya prototipe alat uji kemampuledakan debu batubara dengan tiga subsistem inovatif yang telah terintegrasi.

4. Pengujian dan Validasi Laboratorium

Pengujian dilakukan secara bertahap di lingkungan laboratorium dengan menggunakan sampel debu batubara yang diambil dari tambang bawah tanah. Tahapan pengujian meliputi uji fungsional setiap subsistem, uji pengoperasian terintegrasi, serta uji kemampuledakan debu batubara dengan variasi konsentrasi dan karakteristik sampel. Hasil pengujian selanjutnya dibandingkan dengan data referensi dan hasil riset terdahulu untuk mengevaluasi kinerja alat.

- Metode: Uji fungsional subsistem, uji pengoperasian terintegrasi, dan pengujian kemampuledakan debu batubara.
- Alat yang digunakan: Prototipe alat uji kemampuledakan debu batubara, sistem akuisisi data tekanan, sistem ignitor elektrik, serta sampel debu batubara.
- Sumber daya: Tim peneliti, teknisi laboratorium, dan mitra riset.
- Target: Terverifikasinya fungsi setiap subsistem, meningkatnya presisi dan keandalan data tekanan, tercapainya konsistensi energi penyalaan, serta berfungsinya sistem lock tudung secara aman selama pengujian.

5. Evaluasi Capaian TKT dan Kesiapan Hilirisasi

Tahap akhir dilakukan melalui evaluasi kinerja alat berdasarkan indikator keberhasilan yang telah ditetapkan. Evaluasi mencakup presisi dan keandalan data tekanan, konsistensi energi penyalaan, serta keandalan sistem penguncian tudung. Hasil evaluasi digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi pengembangan lanjutan menuju tingkat kesiapterapan teknologi berikutnya.

- Metode: Evaluasi kinerja teknis berdasarkan indikator keberhasilan dan penyusunan rekomendasi pengembangan lanjutan.
- Alat yang digunakan: Hasil pengujian laboratorium, data pengukuran tekanan, dan dokumentasi pengujian prototipe.
- Sumber daya: Tim peneliti dan mitra riset.
- Target: Tervalidasi prototipe di lingkungan laboratorium sebagai bukti pencapaian TKT 5 serta tersusunnya rekomendasi pengembangan menuju tahap hilirisasi.

3.3.2 Capaian Sementara

Capaian penting dalam pengembangan inovasi adalah terealisasinya pengembangan dan pengujian sistem ignitor elektrik. Pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dari konfigurasi dua kapasitor untuk verifikasi awal, kemudian dilanjutkan dengan konfigurasi bank sepuluh kapasitor sebagai sistem penuh.

Capaian tersebut menunjukkan adanya kemajuan pada pengembangan subsistem penyalaan elektrik, khususnya dalam aspek pengendalian energi, sistem keselamatan, dan kemampuan menghasilkan energi penyalaan yang terukur. Hasil pengujian ini menjadi salah satu bukti kemajuan implementasi inovasi dalam meningkatkan konsistensi sistem penyalaan pada alat uji kemampuledakan debu batubara.

1. Capaian Pengembangan Sistem Ignitor Elektrik

Sistem Exploding Wire Igniter dikembangkan sebagai sistem penghasil pulsa arus tinggi jangka pendek dengan memanfaatkan pelepasan muatan dari bank kapasitor melalui kawat tipis. Ketika arus pulsa melebihi kemampuan termal kawat, terjadi peledakan listrik (exploding wire) yang menghasilkan energi termal dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber penyalaan dalam lingkungan terkendali.

Pengembangan dilakukan secara bertahap. Pada tahap awal, sistem dibangun sesuai arsitektur akhir, tetapi diuji menggunakan dua kapasitor dengan batas tegangan 200 V. Setelah verifikasi awal, pengujian dilanjutkan menggunakan bank sepuluh kapasitor hingga setpoint 330 V.

Beberapa capaian teknis dari pengembangan sistem ini meliputi:

- Terealisasinya sistem rangkaian daya dan rangkaian kontrol untuk mengatur proses pengisian, penyalaan, dan pengosongan bank kapasitor.
- Tersedianya sistem pengendalian berbasis ESP32 untuk mengatur urutan arm–charge–fire–dump.
- Tersedianya mekanisme keselamatan yang mengosongkan bank kapasitor melalui rangkaian dump ketika sistem berada pada kondisi disarm atau kehilangan daya kontrol.
- Terlaksananya pengujian menggunakan konfigurasi dua kapasitor dan dilanjutkan dengan konfigurasi sepuluh kapasitor.
- Tercapainya energi yang tersampaikan (delivered energy) hingga sekitar 1.348 J pada pengujian menggunakan bank sepuluh kapasitor.

2. Hasil Pengujian Sistem Ignitor Elektrik

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem telah melalui tahapan verifikasi menggunakan dua konfigurasi kapasitor. Pada konfigurasi dua kapasitor, pengujian dilakukan dengan batas tegangan maksimum 200 V dan energi tersimpan sekitar 140 J. Tahap ini bertujuan memverifikasi fungsi subsistem, termasuk rantai keselamatan, pengisian kapasitor, pemicu SCR, serta proses pelepasan energi melalui kawat.

Selanjutnya, pengujian dilakukan menggunakan bank sepuluh kapasitor dengan setpoint tegangan 330 V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi yang tersampaikan pada rentang target desain sebesar 1,0–1,5 kJ. Tiga pengujian pada konfigurasi sepuluh kapasitor berhasil mencapai rentang target tersebut.

Tabel 3 Hasil Pengujian Utama

Parameter	Target Design	Hasil Pengujian	Keterangan
Jumlah kapasitor sistem penuh	10 unit	10 unit	Tercapai
Setpoint tegangan sistem penuh	330 V	Hingga 331 V	Tercapai
Kapasitansi bank kapasitor	Sekitar 35 mF	31,075 mF	Hasil pengukuran aktual
Energi delivered	1,0–1,5 kJ	Maksimum sekitar 1,348 kJ	Tercapai pada beberapa tembakan
Fraksi energi delivered	-	Rata-rata sekitar 79%	Hasil pengujian
Fraksi energi delivered tertinggi	-	Sekitar 89%	Hasil pengujian
Keberhasilan mempertahankan busur pada konfigurasi 10 kapasitor	Terbentuknya busur yang stabil	Seluruh tembakan tercatat berhasil mempertahankan busur	Tercapai

Secara keseluruhan, terdapat sebelas baris pengujian, yaitu enam pengujian menggunakan dua kapasitor dan lima pengujian menggunakan sepuluh kapasitor. Pada konfigurasi sepuluh kapasitor, seluruh pengujian tercatat berhasil mempertahankan busur (arc held). Energi delivered tertinggi mencapai sekitar 1.348 J, sedangkan fraksi energi delivered tertinggi mencapai sekitar 89%. Rata-rata fraksi energi delivered pada konfigurasi sepuluh kapasitor adalah sekitar 79%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem ignitor elektrik telah mampu beroperasi pada konfigurasi penuh dan memenuhi target energi penyalaan yang dirancang.

Tabel 4 Perbandingan Capaian dengan Target Awal

No	Target Awal	Capaian Sementara	Status
1	Mengembangkan sistem ignitor elektrik dengan energi penyalaan yang stabil dan terkontrol	Sistem ignitor elektrik telah dibangun dan diuji menggunakan konfigurasi dua dan sepuluh kapasitor	Tercapai pada pengujian ignitor
2	Mencapai energi penyalaan yang konsisten pada setiap siklus pengujian	Pengujian konfigurasi sepuluh kapasitor menghasilkan energi delivered hingga sekitar 1,348 kJ, dengan rata-rata fraksi energi delivered sekitar 79%	Tercapai sebagian sesuai indikator energi
3	Mengembangkan sistem akuisisi data tekanan berpresisi tinggi	Alat dapat mendukung sistem akuisisi data	Siap dilaukan pengujian pada TKT selanjutnya (6)
4	Mengembangkan sistem lock tudung dan pembuangan emisi yang aman	Alat mampu dipasangkan dengan sistem *lock* tudung dan pembuangan emisi yang aman	Sudah siap dipasang dalam sistem *Lock* tudung.
5	Melakukan integrasi dan validasi prototipe alat uji kemampuledakan debu batubara di lingkungan laboratorium	Dokumen teknis menunjukkan capaian pengembangan dan pengujian sistem ignitor	Sudah dapat terbaca oleh perangkat lunak

6	Meningkatkan TKT dari 4 menjadi 5	Pengujian subsistem ignitor telah dilaksanakan	Pengujian TKT divalidasi oleh TKT meter

Luaran sementara dari kegiatan pengembangan inovasi ini mencakup hasil pengembangan prototipe, dokumentasi teknis, serta dokumentasi pengujian sistem ignitor elektrik. Capaian tersebut merupakan bagian dari proses pengembangan dan validasi subsistem penyalaan elektrik yang dilakukan secara bertahap, mulai dari konfigurasi awal hingga pengujian menggunakan bank kapasitor sepuluh unit. Adapun luaran sementara yang telah dihasilkan meliputi:

1. Prototipe sistem ignitor elektrik (Exploding Wire Igniter), yang telah dikembangkan dengan konfigurasi rangkaian daya dan kontrol serta diuji menggunakan bank dua dan sepuluh kapasitor.
2. Dokumentasi teknis sistem ignitor elektrik, yang mencakup prinsip kerja, arsitektur sistem, parameter desain, sistem pengendalian, dan aspek keselamatan.
3. Dokumentasi hasil pengujian, berupa data pengujian bank kapasitor dan hasil tembakan kawat, termasuk energi tersimpan, energi yang tersampaikan, fraksi energi, serta keberhasilan pembentukan busur.

Hasil pengembangan menunjukkan bahwa sistem ignitor elektrik telah mencapai kemajuan yang dapat dibuktikan melalui pengujian bertahap hingga konfigurasi sepuluh kapasitor. Capaian tersebut merupakan kemajuan pada salah satu subsistem utama inovasi, terutama dalam pengembangan sumber penyalaan yang terkontrol dan memiliki energi delivered sesuai target desain.

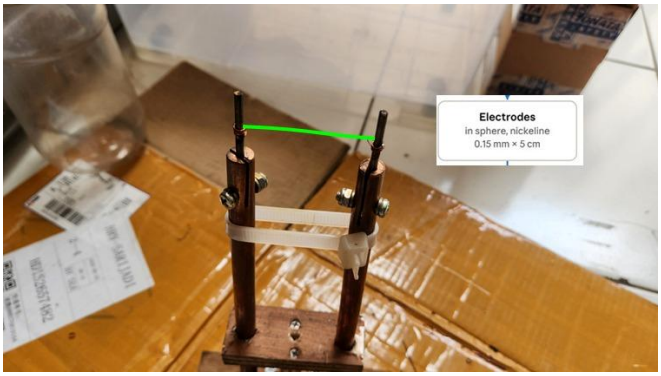
Namun, capaian tersebut sudah dapat digunakan untuk menyimpulkan bahwa seluruh target inovasi telah terpenuhi. Evaluasi terhadap sistem akuisisi data tekanan, mekanisme lock tudung, pembuangan emisi, serta pengujian kemampuledakan debu batubara secara terintegrasi masih memerlukan bukti hasil pengujian tersendiri. Oleh karena itu, pencapaian target TKT 5 perlu didasarkan pada validasi prototipe secara keseluruhan di lingkungan laboratorium.

3.3.3 Dokumentasi Kegiatan

Dokumentasi kegiatan disajikan untuk memberikan gambaran mengenai proses pengembangan dan pengujian subsistem inovasi yang telah dilaksanakan. Dokumentasi ini mencakup tahapan pengembangan Exploding Wire Igniter, konfigurasi sistem pengujian, serta hasil pengujian yang diperoleh. Selain dokumentasi visual, disajikan pula data hasil pengujian dan grafik performa untuk menggambarkan capaian teknis sistem ignitor elektrik.

A. Dokumentasi Pengembangan dan Pengujian

Dokumentasi prototipe Exploding Wire Igniter dapat ditampilkan melalui foto-foto berikut.



Gambar 5. Prototipe Exploding Wire Igniter Bagian C

B. Hasil Pengujian Bank Kapasitor

Pengujian awal dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik listrik bank kapasitor yang digunakan sebagai penyimpan energi pada sistem ignitor elektrik. Bank utama terdiri atas sepuluh unit kapasitor (C1–C10). Hasil skrining listrik bank kapasitor disajikan pada Tabel 3.

Tabel 5 Ringkasan hasil Skrining Bank Kapasitor Utama

Parameter	Hasil Pengujian
Jumlah kapasitor utama	10 unit
Total kapasitansi terukur	31,075 mF
ESR rata-rata	≈ 19,2 mΩ
Estimasi ESR bank	≈ 1,9 mΩ
Kebocoran tertinggi setelah 10 menit	1,61 mA
Batas kelulusan kebocoran	< 2 mA dan menurun
Status unit yang telah diuji	Lulus

Berdasarkan hasil pengujian, total kapasitansi terukur sebesar 31,075 mF sedikit lebih rendah dibandingkan nilai desain awal sekitar 35 mF. Sementara itu, unit kapasitor yang telah menjalani pengujian kebocoran memenuhi batas kelulusan yang ditetapkan. Namun, beberapa unit masih menunggu penyelesaian pengujian kebocoran secara lengkap.

C. Hasil Pengujian Tembakan Kawat

Pengujian sistem ignitor dilakukan secara bertahap menggunakan konfigurasi dua dan sepuluh kapasitor. Pada tahap awal, pengujian menggunakan dua kapasitor dengan batas tegangan 200 V. Selanjutnya, pengujian dilanjutkan menggunakan sepuluh kapasitor dengan setpoint tegangan hingga 330 V.

Tabel 6 Hasil Pengujian Tembakan Kawat

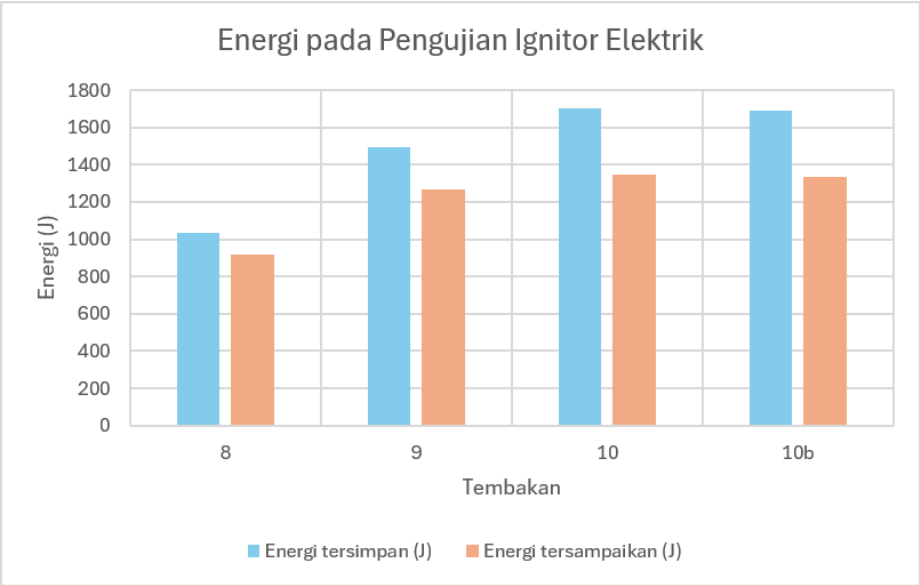
Tembakan	Tegangan sebelum (V)	Tegangan sesudah (V)	Energi tersimpan (J)	Energi tersampaikan (J)	Fraksi energi	Busur bertahan
8	258	86	1.034	919	89%	Ya
9	310	121	1.493	1.266	85%	Ya
10	331	151	1.702	1.348	79%	Ya
10b	330	152	1.692	1.333	79%	Ya

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh tembakan pada konfigurasi sepuluh kapasitor berhasil mempertahankan busur listrik (arc held). Energi tersampaikan tertinggi diperoleh pada Shot 10 sebesar sekitar 1.348 J. Selain itu, tiga pengujian, yaitu Shot 9, Shot 10, dan Shot 10b,

berhasil mencapai target energi tersampaikan sebesar 1,0–1,5 kJ. Rata-rata fraksi energi tersampaikan pada pengujian sepuluh kapasitor adalah sekitar 79%.

D. Hasil Pengujian Tembakan Kawat

Performa sistem ignitor elektrik dapat ditunjukkan melalui perbandingan energi tersimpan dan energi yang berhasil disampaikan pada setiap tembakan. Grafik berikut menggunakan data hasil pengujian Shot 8, Shot 9, Shot 10, dan Shot 10b.



Gambar 6. Perbandingan Energi Tersimpan dan Energi Tersampaikan Pada Pengujian Ignitor Elektrik

Berdasarkan grafik tersebut, energi tersampaikan meningkat seiring dengan peningkatan energi yang tersimpan pada bank kapasitor. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem ignitor elektrik telah mampu menyampaikan energi pada orde kilojoule dalam konfigurasi sepuluh kapasitor. Meskipun demikian, masih terdapat selisih antara energi tersimpan dan energi tersampaikan pada setiap pengujian.

E. Dokumentasi Pendukung Lainya

Selain foto kegiatan dan data hasil pengujian, dokumentasi pendukung dapat dilengkapi dengan:

- Diagram rangkaian daya dan kontrol Exploding Wire Igniter.
- Dokumentasi sistem pengendalian dan pengukuran.
- Dokumentasi hasil pengukuran tegangan dan arus selama pengujian.
- Dokumentasi hasil pengujian keselamatan sistem, apabila tersedia.

Dokumentasi pada subbab ini terutama menunjukkan capaian pengembangan dan pengujian subsistem ignitor elektrik. Pengujian tersebut sudah dapat digunakan untuk menyimpulkan keberhasilan integrasi keseluruhan alat uji kemampuledakan debu batubara, karena hasil pengujian sistem akuisisi data tekanan, sistem lock tudung, dan sistem pembuangan emisi sudah tercakup dalam data yang digunakan.

3.4 Dokumen Evaluasi

Kegiatan pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara bertujuan meningkatkan kinerja alat melalui pengembangan sistem akuisisi data tekanan berpresisi tinggi, sistem ignitor elektrik yang terkontrol, serta mekanisme penguncian tudung dan pembuangan emisi yang lebih aman. Kegiatan ini diharapkan memberikan manfaat dalam meningkatkan keselamatan pekerja tambang, mendukung kemandirian teknologi pengujian di Indonesia, mengurangi ketergantungan terhadap fasilitas pengujian luar negeri, serta memperkuat kegiatan penelitian dan pengembangan teknologi pertambangan. Permasalahan yang masih perlu diperhatikan meliputi belum tuntasnya validasi seluruh subsistem secara terintegrasi, perlunya pengujian

lebih lanjut terhadap konsistensi energi penyalaan, keandalan sensor tekanan, mekanisme penguncian tudung, dan sistem pembuangan emisi. Oleh karena itu, disarankan agar dilakukan penyempurnaan komponen, pengujian berulang dalam kondisi terkontrol, peningkatan koordinasi antara tim peneliti dan mitra, serta pelengkapan dokumentasi teknis setiap tahapan pengujian. Rencana kelanjutan kegiatan diarahkan pada validasi terintegrasi seluruh subsistem, pengujian menggunakan berbagai karakteristik sampel debu batubara, peningkatan Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) menuju tahap demonstrasi di lingkungan operasional, serta pengembangan kerja sama dengan industri, lembaga penelitian, dan instansi pemerintah untuk mendukung hilirisasi dan pemanfaatan alat secara lebih luas.

Pasted text(3).txt

3.4.1 Evaluasi Teknis

Evaluasi teknis dilakukan dengan membandingkan target pengembangan pada setiap subsistem dengan hasil aktual yang telah diperoleh selama pelaksanaan kegiatan. Aspek yang dievaluasi meliputi sistem akuisisi data tekanan, sistem ignitor elektrik, sistem penguncian tudung, sistem pembuangan emisi, serta integrasi prototipe alat uji kemampuledakan debu batubara.

Tabel 7 Evaluasi Teknis Capaian Pengembangan Inovasi

Aspek	Target	Capaian	Status	Catatan
Sistem akuisisi data tekanan	Sensor berkecepatan tinggi dengan presisi dan keandalan pengukuran yang lebih baik	Sudah terdapat data hasil pengujian kuantitatif yang dapat digunakan untuk mengevaluasi performa sistem	Sudah dapat dievaluasi	Diperlukan hasil pengujian respons sensor, sampling rate, dan perbandingan hasil pengukuran
Sistem ignitor elektrik	Sistem penyalaan elektrik dengan energi tersampaikan sebesar 1,0–1,5 kJ	Energi tersampaikan tertinggi sekitar 1.348 J. Shot 9, 10, dan 10b mencapai rentang target 1,0–1,5 kJ	Tercapai sebagian	Tiga pengujian mencapai rentang energi target, dengan rata-rata fraksi energi tersampaikan sekitar 79% pada konfigurasi sepuluh kapasitor
Konsistensi penyalaan	Energi penyalaan yang lebih stabil dan dapat diulang	Seluruh lima tembakan menggunakan sepuluh kapasitor berhasil mempertahankan busur listrik	Tercapai pada pengujian ignitor	Konsistensi energi masih perlu dievaluasi melalui pengujian berulang dengan kondisi operasi yang lebih terkontrol
Sistem lock tudung	Mekanisme penguncian yang diperkuat dan memiliki fungsi fail-safe	Sudah terdapat data hasil pengujian yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem	Sudah dapat dievaluasi	Diperlukan pengujian fungsi penguncian dan keandalan mekanisme keselamatan

Sistem pembuangan emisi	Sistem pembuangan emisi ledakan yang lebih aman dan otomatis	Sudah terdapat data hasil pengujian yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem	Sudah dapat dievaluasi	Diperlukan pengujian fungsi dan keselamatan sistem pembuangan emisi
Integrasi prototipe	Seluruh subsistem terintegrasi dan berfungsi dalam lingkungan laboratorium	Hasil pengujian yang tersedia masih berfokus pada subsistem ignitor elektrik	Sudah dapat dievaluasi	Diperlukan pengujian terintegrasi pada alat uji kemampuledakan debu batubara
Peningkatan TKT	Peningkatan dari TKT 4 menjadi TKT 5	Telah diperoleh hasil pengembangan dan pengujian subsistem ignitor elektrik	Sudah dapat disimpulkan	Penetapan TKT 5 memerlukan bukti validasi komponen dan subsistem yang relevan secara lebih menyeluruh

Khusus pada sistem ignitor elektrik, hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi sepuluh kapasitor telah mampu menghasilkan energi tersampaikan pada rentang target desain. Dari lima pengujian menggunakan sepuluh kapasitor, seluruhnya berhasil mempertahankan busur listrik, sedangkan tiga pengujian mencapai energi tersampaikan sebesar 1,0–1,5 kJ. Total kapasitansi bank kapasitor utama yang terukur adalah 31,075 mF, dengan energi tersampaikan tertinggi sebesar sekitar 1.348 J. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengembangan subsistem ignitor elektrik telah mencapai kemajuan teknis yang terukur.

Secara keseluruhan, capaian teknis yang dapat dikonfirmasi saat ini terutama berada pada pengembangan dan pengujian subsistem ignitor elektrik. Sementara itu, evaluasi terhadap sistem akuisisi data tekanan, sistem lock tudung, sistem pembuangan emisi, dan integrasi keseluruhan prototipe masih memerlukan data pengujian pendukung. Oleh karena itu, pencapaian target peningkatan TKT dari 4 menjadi 5 perlu ditetapkan berdasarkan hasil validasi seluruh komponen dan subsistem yang menjadi ruang lingkup inovasi.

3.4.2 Evaluasi Manajerial

Pelaksanaan kegiatan inovasi melibatkan tim riset dari Institut Teknologi Bandung (ITB) dengan keahlian yang mencakup mine explosion, mine safety, dan organic geochemistry, serta dukungan tenaga peneliti dan mahasiswa. Kegiatan ini juga melibatkan CV Marnov Engineering sebagai mitra riset yang memiliki kompetensi di bidang otomasi, sensor, dan perangkat lunak. Selain itu, pengembangan inovasi memanfaatkan kolaborasi keahlian dari bidang Teknik Pertambangan serta Teknik Pangan dan Kemurgi ITB.

Dari aspek pengelolaan tim, keterlibatan berbagai bidang keahlian menjadi salah satu faktor pendukung dalam pengembangan alat uji yang melibatkan komponen mekanik, elektrikal, instrumentasi, dan sistem pengendalian. Pembagian lingkup pengembangan ke dalam beberapa subsistem memungkinkan pekerjaan teknis dilakukan secara lebih terarah, mulai dari pengembangan sistem ignitor elektrik, sistem akuisisi data tekanan, hingga penguatan sistem penguncian tudung dan pembuangan emisi.

Dari aspek koordinasi dan kontribusi mitra, keterlibatan CV Marnov Engineering mendukung kebutuhan pengembangan pada bidang otomasi, sensor, dan perangkat lunak. Kolaborasi

multidisiplin juga diperlukan untuk memastikan bahwa pengembangan subsistem tidak hanya memenuhi kebutuhan teknis, tetapi tetap memperhatikan aspek keselamatan dan penerapannya pada pengujian kemampuledakan debu batubara.

Adapun evaluasi realisasi anggaran perlu mengacu pada kesesuaian antara penggunaan dana dengan kebutuhan pengembangan, pengadaan komponen, fabrikasi, integrasi, dan pengujian prototipe. Berdasarkan dokumen yang tersedia, nominal pendanaan kegiatan sebesar Rp200.000.000 dengan rincian sebagai berikut.

REKAPITULASI PERTANGGUNGJAWABAN PENGGUNAAN DANA

JUDUL	BOPTN - Enhancing the Effectiveness of Smart Early Warning Systems in Underground Mine Ventilation through Hybrid Communication Technologies
KODE FILE	DRI.PN-14-90-2026
NO KONTRAK	4069/IT1.B07.1/TA.00/2025 & 169/C3/DT.05.00/PL-BARU/2026
NAMA PENELITI/ KETUA PELAKSANA	Prof. Dr. Eng. Ir. Nuhindro Priagung Widodo, M.T.
NIDN	0020077510
PERIODE KONTRAK	13 April - 16 Desember 2026
PROGRAM	DIKTI - PENELITIAN BARU TAHUN ANGGARAN 2026
SKEMA	Penelitian Terapan - Luaran Prototipe

I REKAPITULASI (VERSI ITB)

Kelompok	Nilai Penerimaan	Penggunaan Dana	Sisa Dana
I. BELANJA PERSONIL	**95.400.000**	**91.800.000**	**3.600.000**
I.A. Belanja Pegawai	64.800.000	64.800.000	-
I.B. Belanja Jasa Perorangan (Honor KJP)	9.000.000	9.000.000	-
I.C. Belanja Jasa Penelitian (Honor Mahasiswa)	21.600.000	18.000.000	3.600.000
II. BELANJA BARANG/JASA	**321.850.000**	**321.850.000**	**0**
I.A. Belanja Barang Habis	26.950.000	26.950.000	-
I.B. Belanja Modal/Aset	-	-	-
I.C. Belanja Jasa	294.900.000	294.900.000	0
Total	**417.250.000**	**413.650.000**	**3.600.000**

Ii REKAPITULASI SESUAI KELOMPOK PERUNTUKAN BIAYA

Kelompok	Dana yang diperoleh	Penggunaan Dana	Sisa Dana
Honorrium Tim Pelaksana	95.400.000	91.800.000	3.600.000
Bahan	55.650.000	26.950.000	28.700.000
Pengumpulan Data	19.200.000	35.000.000	- 15.800.000
Sewa Peralatan	161.000.000	228.000.000	- 67.000.000
Analisis Data	60.000.000	31.900.000	28.100.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	26.000.000	-	26.000.000
Total	**417.250.000**	**413.650.000**	**3.600.000**

Ketua Peneliti



Prof. Dr. Eng. Ir. Nuhindro Priagung Widodo, M.T.
NIP. 197507202006041001

Secara umum, beberapa hal yang perlu menjadi perhatian dalam pengelolaan kegiatan selanjutnya meliputi:

1. Koordinasi pengembangan subsistem. Diperlukan koordinasi yang berkelanjutan antara tim riset dan mitra agar pengembangan masing-masing subsistem dapat berjalan sesuai spesifikasi dan jadwal yang telah direncanakan.
2. Integrasi komponen. Pengembangan subsistem secara terpisah perlu diikuti dengan pengujian integrasi untuk memastikan seluruh komponen dapat bekerja secara terpadu.
3. Dokumentasi kegiatan. Setiap tahapan pengembangan dan pengujian perlu didukung dokumentasi teknis, data hasil pengujian, serta catatan evaluasi untuk memudahkan penelusuran capaian.

Strategi perbaikan tersebut diharapkan dapat meningkatkan efektivitas koordinasi, memperkuat pengendalian pelaksanaan kegiatan, dan memastikan bahwa setiap tahapan pengembangan dapat menghasilkan luaran yang sesuai dengan target inovasi.

3.4.3 Analisis Dampak

Pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara diharapkan memberikan dampak pada peningkatan keselamatan pertambangan, kemandirian teknologi pengujian, serta pengembangan penelitian di Indonesia.

1. Dampak Sosial

Inovasi ini diharapkan dapat mendukung pencegahan kecelakaan akibat ledakan debu batubara di tambang bawah tanah. Hasil pengujian yang lebih presisi dan andal dapat memberikan informasi mengenai karakteristik kemampuledakan debu sebagai dasar pengelolaan risiko keselamatan tambang.

2. Dampak Ekonomi

Pengembangan alat uji di dalam negeri berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap fasilitas pengujian dari luar negeri. Selain itu, alat ini dapat dimanfaatkan oleh industri pertambangan, lembaga riset, dan instansi pemerintah yang membutuhkan pengujian kemampuledakan debu batubara.

3. Dampak Ilmiah dan Akademik

Inovasi ini merupakan kelanjutan dari pengembangan alat uji peledakan tertutup 20 liter yang telah digunakan untuk menguji sampel debu batubara dari Sumatra dan Kalimantan. Penelitian sebelumnya juga telah dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi dan menjadi salah satu dasar penyusunan SNI 9240:2023. Pengembangan sistem pengukuran, ignitor elektrik, dan keselamatan diharapkan dapat meningkatkan keandalan pengujian serta mendukung penelitian selanjutnya.

4. Potensi Hilirisasi dan Keberlanjutan Riset

Alat ini berpotensi dimanfaatkan oleh industri tambang batubara bawah tanah, lembaga riset, dan instansi pemerintah. Pengembangannya juga dapat diperluas untuk pengujian debu pada industri lain, seperti industri tepung, pengolahan bubuk teh, dan metalurgi (rotary kiln).
Keberlanjutan riset dapat dilakukan melalui penyempurnaan dan validasi seluruh subsistem, pengujian berbagai sampel debu batubara, serta peningkatan kesiapan teknologi menuju tahap pemanfaatan oleh industri.

5. Peluang Kolaborasi Selanjutnya

Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan melalui kerja sama antara ITB, CV Marnov Engineering, lembaga penelitian, dan pihak industri. Kolaborasi difokuskan pada penyempurnaan teknologi, validasi prototipe, serta pengembangan dan pemanfaatan alat uji secara lebih luas di Indonesia.

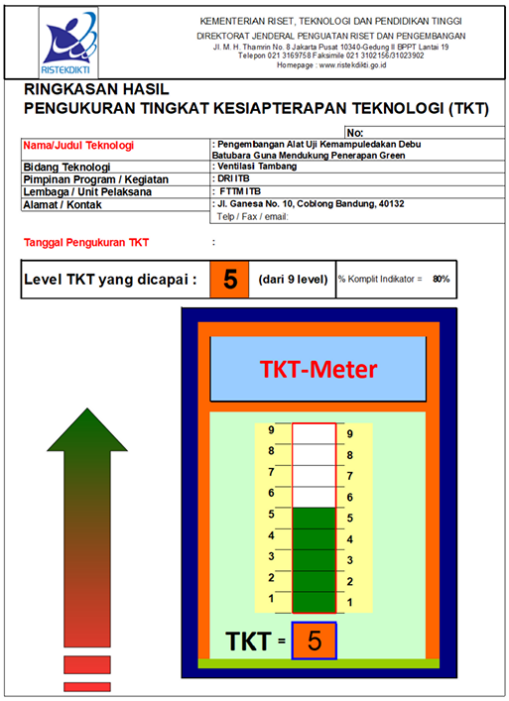
3.5 Dokumen Penilaian TKT

3.5.1 Penilaian TKT

Penilaian Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) dilakukan untuk mengetahui tingkat kesiapan teknologi hasil pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara. Berdasarkan hasil pengukuran TKT, inovasi ini telah mencapai Level 5 dari 9 level, dengan persentase kelengkapan indikator sebesar 80%.

Tabel 8 Penilaian Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT)

Level TKT	Deskripsi	Bukti Capaian
3 - 4	Validasi prototipe di laboratorium	Pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara berbasis tabung peledakan tertutup 20 liter yang telah digunakan dalam pengujian sampel debu batubara.
4 - 5	Validasi dalam lingkungan simulasi	Pengembangan prototipe sistem ignitor elektrik, termasuk rangkaian daya dan kontrol, serta pengujian menggunakan konfigurasi dua dan sepuluh kapasitor. Hasil pengukuran TKT menunjukkan Level 5 dengan kelengkapan indikator sebesar 80%.
5 - 6	Demonstrasi sistem di lingkungan nyata	sudah terdapat bukti demonstrasi sistem secara keseluruhan di lingkungan operasional nyata. Tahap selanjutnya diarahkan pada penyempurnaan dan pengujian terintegrasi prototipe.



Gambar 7. Hasil Pengukuran Tingkat kesiapan Teknologi (TKT)

3.5.2 Ringkasan Hasil Penilaian

Berdasarkan hasil pengukuran, pengembangan alat uji kemampuledakan debu batubara telah mencapai TKT Level 5 dengan kelengkapan indikator sebesar 80%. Capaian ini didukung oleh

pengembangan prototipe dan pengujian subsistem ignitor elektrik di lingkungan laboratorium. Selain itu, luaran wajib berupa prototipe dan HAKI masing-masing telah mencapai 100%.

Pengembangan selanjutnya diarahkan pada penyempurnaan dan validasi seluruh subsistem, meliputi sistem akuisisi data tekanan, ignitor elektrik, sistem penguncian tudung, dan pembuangan emisi. Pengujian terintegrasi juga diperlukan untuk memastikan seluruh komponen dapat beroperasi dengan baik sebelum dilanjutkan menuju tahap demonstrasi dan pemanfaatan oleh pengguna.

Dari sisi hilirisasi, alat ini berpotensi dimanfaatkan oleh industri pertambangan batubara bawah tanah, lembaga penelitian, dan instansi pemerintah. Pengembangan lebih lanjut juga membuka peluang pemanfaatan teknologi pengujian pada industri lain yang memiliki potensi ledakan debu.

Lampiran



Lampiran 1 Foto kegiatan dan prototipe

Exploding-wire test shots

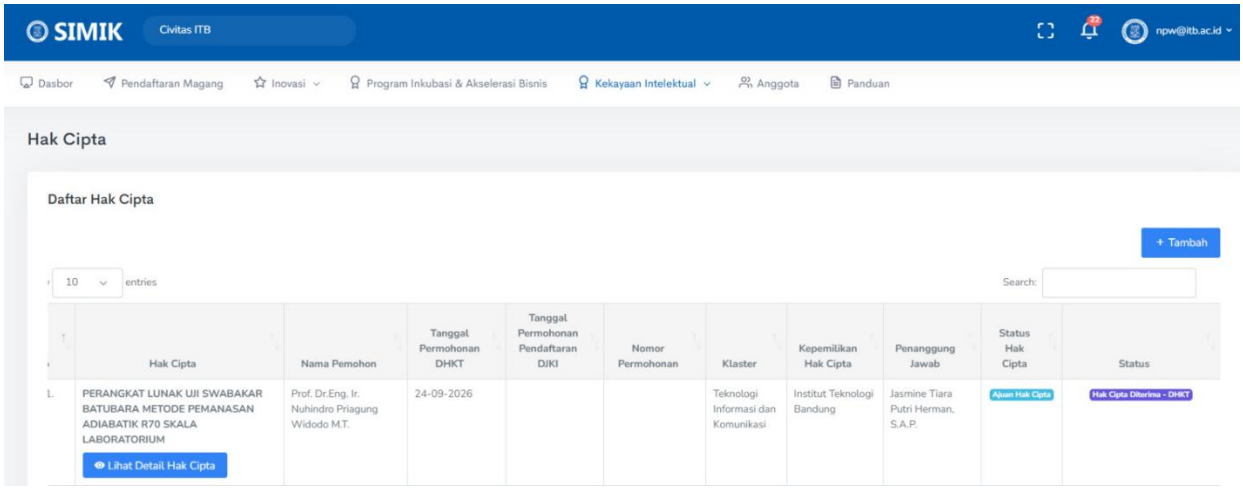
One row per shot. Blue = measured/entered, black = calculated. Energy = ½ C V²; delivered = stored before − left after; charge lost = C × (V before − V after); peak current = shunt mV × 1000 A / 75 mV.

Shot	Cans	Target (V)	Variac secondary AC (V)	Wire	Wire Ø (mm)	Expected peak current (A)	Expected shunt peak (mV)	Predicted bank after if no arc (V)	Bank before (V)	Bank after (V)	Bank C (mF)	Stored before (J)	Left after (J)	Delivered (J)	Delivered (% of stored)	Charge lost (C)	Shunt peak measured (mV)	Peak current measured (A)	Arc held?	Notes
1	2	150	118	NiCu	0,2	160	12	135	156	128	7,00	85	57	28	33%	0,20			Short arc	Blue-white flash, dense shower of molten droplets (≈ 0.4 s).
2	2	150	118	NiCu	0,3	300	23	110	155	100	7,00	84	35	49	58%	0,39			Short arc	Brightest flash, large molten blobs.
3	2	150	118	Cu	0,2	470	35	115	156	93	7,00	85	30	55	64%	0,44			Short arc	Very short, intense flash; fine sparks, few blobs.
4	2	200	157	NiCu	0,2	210	16	190	208	189	7,00	151	125	26	17%	0,13			No	No arc (matches prediction). Blue-white flash, dense droplet shower (≈ 0.5 s).
5	2	200	157	NiCu	0,3	400	30	170	208	168	7,00	151	99	53	35%	0,28			No	No arc (matches prediction). Long warm glow and crackle (≈ 0.2–0.4 s) from molten blobs cooling.
6	2	200	157	Cu	0,2	550	41	170	208	109	7,00	151	42	110	73%	0,69			Yes	Arc held after the burst (≈ 60 J). Green flash (copper plasma), loudest bang, fine sparks, almost no blobs. Best 2-can result.
7	10	200	157	Cu	0,4	1.400	105	160	204	126	31,08	647	247	400	62%	2,42			Yes	Arc held (no-arc prediction ≈ 160 V). Green-white flash, fine sparks.
8	10	250	197	Cu	0,6	2.400	180	135	258	86	31,08	1.034	115	919	89%	5,34			Yes	Arc held, highest share of the bank. Wire broke at the right-hand wrap only; a 3–4 cm piece stayed on the left tip and glowed ≈ 2 s (late-ignition risk). Fixed by gentler enamel stripping and even, tight wraps.
9	10	300	237	Cu	0,6	2.700	200	195	310	121	31,08	1.493	227	1.266	85%	5,87			Yes	Arc held. Copper plated onto the tungsten afterwards.
10	10	330	249	Cu	0,6	2.800	210	230	331	151	31,08	1.702	354	1.348	79%	5,59			Yes	Arc held. Within the design target. Copper deposit on the tungsten afterwards.
10b	10	330	249	Cu	0,6	2.800	210	230	330	152	31,08	1.692	359	1.333	79%	5,53	109	1.453	Yes	Repeat of shot 10 with cleaned tungsten and new, even wraps. Whole wire burst; only short stubs at both wraps. Scope Vpp 109 mV includes noise; smooth peak ≈ 100 mV (≈ 1.35 kA). Pulse ≈ 6 ms (charge check); scope showed ≈ 4 ms because the start was off-screen.

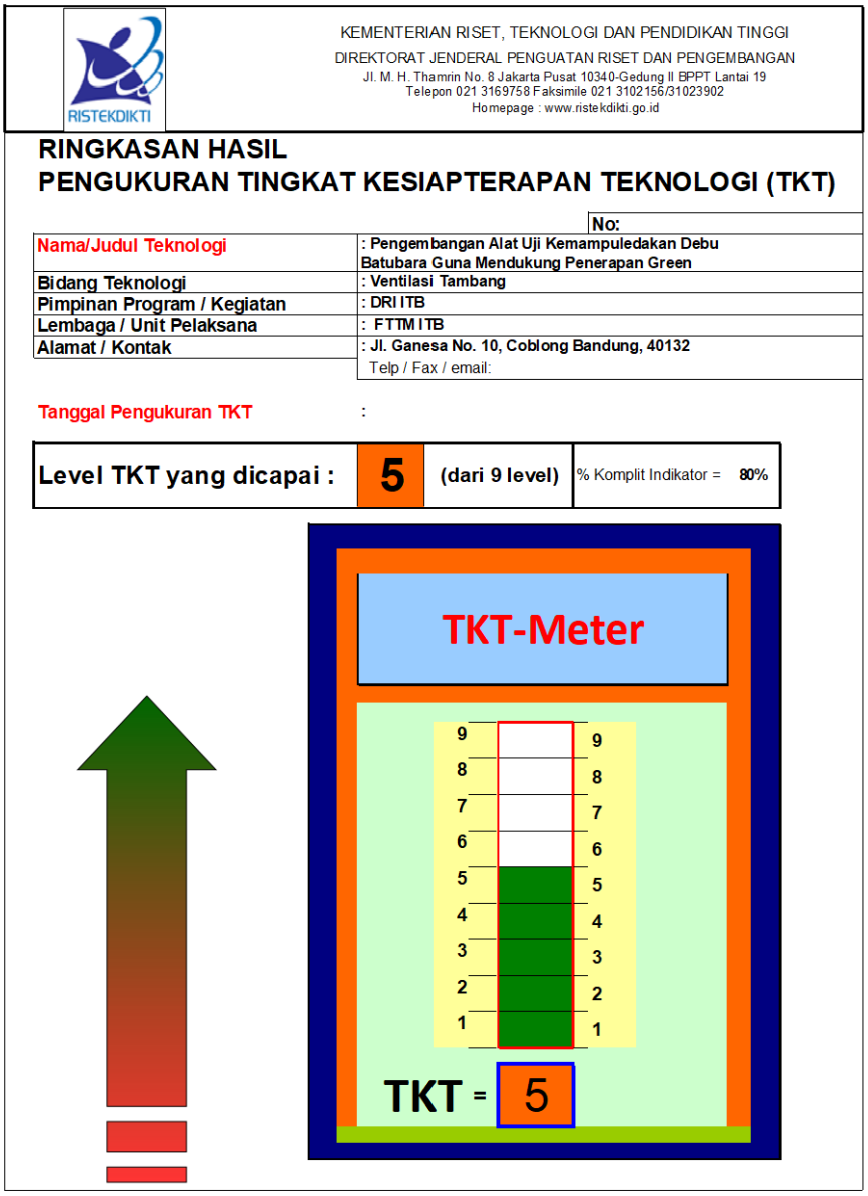
Summary

Highest delivered energy (J)	1.348
Highest delivered share	89%
10-can shots in 1.0–1.5 kJ target	3
Mean delivered share, 10-can shots	79%

Lampiran 2 Hasil Uji Laboratorium



Lampiran 3 Bukti Pendaftaran HKI



Lampiran 4 Hasil Pengukuran Tingkat Kesiapterapan Teknologi