

PANDUAN TEKNIS LENGKAP & INTEGRATIF KAPUR SEHATI

Inovasi Kapur Tulis Bebas Debu Toksik Berbasis Valorisasi Limbah Tulang Sapi (Kalsium Karbonat Terkalsinasi) Guna Mewujudkan Ekosistem Sekolah Ramah Lingkungan & Berkelanjutan

DOKUMEN PANDUAN STANDAR OPERASIONAL & INOVASI PEMBELAJARAN

Penyusun: Tim Inovasi KAPUR SEHATI & Edukator Sains

Affiliasi: Dinas Pendidikan Jawa Timur / Program Sekolah Adiwiyata

Edisi: Revisi Komprehensif 2026 / Standar Mutu Industri & Pembelajaran

RINGKASAN EKSEKUTIF & PENDAHULUAN SOSIO-EKOLOGIS

Panduan Teknis Komprehensif KAPUR SEHATI (Kapur Tulis Sehat Inovatif dari Limbah Tulang Sapi) disusun sebagai pedoman operasional terintegrasi, riset laboratorium, dan implementasi kurikuler di lingkungan pendidikan formal. Inovasi ini hadir sebagai solusi kontekstual atas dua permasalahan utama yang terjadi di ekosistem sekolah dan lingkungan sekitar: ketergantungan pada produk kapur konvensional berdebu tinggi serta akumulasi limbah padat tulang sapi dari pemotongan hewan dan industri kuliner yang belum terutilisasi secara maksimal.

Dalam dunia pendidikan, pemanfaatan papan tulis hitam (chalkboard) masih sangat luas digunakan di berbagai wilayah Nusantara. Namun, kapur tulis komersial berbahan dasar kalsium sulfat (gypsum) sintesis umumnya menghasilkan particulate matter (PM2.5 dan PM10) berlebih saat diaplikasikan dan dihapus. Debu inhalabel ini terbukti memicu gangguan pernapasan kronis (ISPA), iritasi konjungtiva mata, serta memicu alergi kulit pada guru dan siswa. Di sisi lain, limbah tulang sapi mengandung kalsium fosfat dan kalsium karbonat dalam kadar sangat tinggi (mencapai 65-70% matriks anorganik tulang) yang jika diolah melalui kalsinasi termal terkontrol dapat menghasilkan Kalsium Oksida (CaO) dan Kalsium Karbonat (CaCO_3) murni berkerapatan tinggi.

Melalui program inovasi KAPUR SEHATI, limbah tulang sapi ditransformasi menjadi kapur tulis berkerapatan optimal, berdebu amat rendah (dustless), lebih padat, tidak mudah patah, dan memiliki visibilitas goresan yang sangat tajam. Dokumen ini dirancang untuk memberikan petunjuk terperinci mulai dari landasan teoritis, metodologi kalsinasi, formulasi pencampuran, desain cetakan ergonomis, uji mutu laboratorium, mitigasi keselamatan K3, hingga skenario integrasi ke dalam Kurikulum Deep Learning dan Program Sekolah Adiwiyata.

BAB 1. BAB KONSEPTUAL: LATAR BELAKANG, PROBLEM STATEMENTS, & LANDASAN TEORI

1.1 Latar Belakang Lingkungan dan Kesehatan

Penggunaan kapur tulis dalam aktivitas belajar-mengajar harian di ruang kelas telah menjadi bagian tak terpisahkan dari sejarah edukasi. Meskipun teknologi papan tulis interaktif dan whiteboard spidol telah berkembang, kapur tulis tetap menjadi media pembelajaran paling ekonomis, terjangkau, dan diandalkan di puluhan ribu sekolah di Indonesia. Kendati demikian, penggunaan spidol berbahan dasar pelarut organik volatil (VOC) seperti xylene dan toluene justru membawa risiko neurotoksisitas jangka panjang. Sementara itu, kapur tulis gypsum murah menghasilkan serbuk halus berdiameter < 10 mikron yang melayang di udara kelas (*airborne particles*) hingga berjam-jam.

Studi aerobiologi dalam ruang kelas menunjukkan bahwa konsentrasi debu kapur konvensional saat proses penghapusan papan tulis dapat melebihi ambang batas aman

kualitas udara ruang (Indoor Air Quality / IAQ). Paparan kronis debu gypsum memicu terjadinya peradangan mukosa nasal, rhinitis alergi, penurunan fungsi kapasitas vital paru-paru pada pendidik, serta konsentrasi belajar siswa yang terganggu akibat rasa gatal pada mata dan tenggorokan. Oleh sebab itu, kebutuhan akan kapur bebas debu (*low-dust / dustless chalk*) yang aman bagi sistem pernapasan menjadi kebutuhan krusial bagi ekosistem Sekolah Ramah Anak dan Sekolah Sehat.

1.2 Potensi Ekologis dan Kimiawi Limbah Tulang Sapi

Di Indonesia, limbah pemotongan hewan ternak khususnya tulang sapi melimpah dalam jumlah ribuan ton per tahun. Sebagian besar limbah tulang sapi hanya dibuang di tempat pemrosesan akhir (TPA), dibakar secara terbuka yang menimbulkan polusi udara, atau dibiarkan membusuk hingga memicu bau menyengat serta vektor penyakit. Secara hidroksiapatit dan susunan biokimia, tulang sapi kering terdiri atas sekitar 30% matriks organik (terutama kolagen) dan 70% matriks anorganik mineral.

Komponen anorganik utama tulang sapi adalah kalsium fosfat dalam bentuk hidroksiapatit [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$]. Ketika tulang sapi tunduk pada proses kalsinasi termal pada suhu tinggi ($600^\circ\text{C} - 900^\circ\text{C}$), matriks kolagen organik akan terdekomposisi sempurna menjadi gas H_2O dan CO_2 , meninggalkan residu mineral kalsium murni berpori mikroskopis. Mineral terkalsinasi ini memiliki sifat fisik yang sangat solid, putih cerah, dan memiliki daya rekat antarmolekul yang tinggi jika diformulasikan dengan pengikat (binder) berbasis pati alami. Hal ini menjadikannya bahan baku ideal untuk menggantikan kalsium sulfat sintesis dalam pembuatan kapur tulis.

1.3 Landasan Teori Sintesis dan Reaksi Kimia

Proses konversi tulang sapi menjadi bahan utama Kapur Sehati melibatkan beberapa tahapan reaksi termokimia dan dekomposisi:

- **1. Degreasing & Decarbonization Termal:** Proses termal pada suhu $600^\circ\text{C} - 800^\circ\text{C}$ menghancurkan rantai peptidoglycan dan kolagen tulang. Reaksi pembakaran sempurna menghilangkan seluruh lemak dan protein.
- **2. Kalsinasi Hidroksiapatit:** Hidroksiapatit terurai parsial menjadi Kalsium Oksida (CaO) dan Kalsium Fosfat. Reaksi kalsinasi: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + \text{Heat} \rightarrow 3 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{CaO} + \text{H}_2\text{O(g)}$.
- **3. Karbonasi dan Pembentukan Matriks Kalsit:** Ketika CaO dan mineral kalsium hasil kalsinasi direaksikan dengan udara berkarbon dioksida atau diproses dalam larutan pencuci, terbentuk Kalsium Karbonat (CaCO_3) halus dengan struktur kristal kalsit yang stabil.
- **4. Gelatinisasi Pati sebagai Perekat Organik:** Pencampuran tepung tapioka/maizena dengan air hangat memicu gelasi pati. Rantai amylose dan amylopectin membungkus partikel kalsium tulang terkalsinasi, membentuk ikatan hidrogen yang kuat namun rapuh saat digoreskan pada permukaan kasar papan tulis.

BAB 2. ALAT, BAHAN, DAN PERSIAPAN SPESIFIKASI INDUSTRI RUMAHAN

2.1 Spesifikasi Bahan Baku Utama dan Pendukung

Untuk menghasilkan Kapur Sehati berkualitas tinggi sesuai standar SNI kapur tulis (densitas tinggi, tidak gampang patah, goresan jelas, dan debu jatuh secara gravitasi tanpa melayang), bahan baku harus memenuhi kriteria mutu sebagai berikut:

Bahan Baku	Fungsi utama	Spesifikasi Standard / Grade	Rasio Formulasi Base
Limbah Tulang Sapi	Sumber utama Kalsium (CaCO_3 / $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	Tulang keras (Femur/Rangka), bebas daging & sumsum	55% - 65% (Tepung)
Tapioka / Maizena	Pengikat hidrofobik & agen pemadat	Tepung pati murni, kadar air < 12%	15% - 25%
Air Terdistilasi / Aquades	Pelarut & pembentuk pasta gelatin	pH netral (6.8 - 7.2), bebas mineral berat	20% - 25%
Pewarna Alami / Pigmen	Pemberi warna ekologis (Kapur Warna)	Kunyit (Kuning), Daun Suji/Pandan (Hijau), Buah Naga (Merah)	2% - 5% (Opsional)
Minyak Nabati / Sereh	Pelepas cetakan & aromaterapi alami	Minyak kelapa murni / Essential Oil Cymbopogon	1% - 2%

2.2 Peralatan Produksi dan Spesifikasi Operasional

Peralatan yang digunakan terbagi menjadi peralatan pengolahan termal, peremukan/penghancuran, pengayakan, pencampuran, dan pencetakan:

- **A. Furnace / Tungku Kalsinasi:** Tungku pembakaran berpenutup tahan panas hingga 1000°C atau Furnase Laboratorium digital. Dilengkapi cerobong asap dan kontrol suhu.
- **B. Crusher / Lumpang - Alu Industri:** Struktur baja cor berat atau batu lumpang granit murni untuk menumbuk tulang hasil kalsinasi yang telah rapuh.

- **C. Grinder Machine / High-Speed Blender:** Mesin pemutar pisau titanium kecepatan tinggi (20.000 RPM) untuk menghaluskan serbuk tulang menjadi kalsium mikron.
- **D. Sieving Mesh (Pengayak):** Saringan mesh 100, 150, dan 200 (standard ASTM) untuk memastikan homogenitas partikel debu halus kalsium.
- **E. Cetakan Kapur (Moulding):** Silikon grade makanan/industri atau pipa PVC diameter 1 cm yang dibelah dan diberi selongsong pengunci untuk cetakan kapur silindris ergonomis.

BAB 3. STANDAR OPERASIONAL PROSEDUR (SOP) PRODUKSI KAPUR SEHATI

3.1 Tahap I: Pre-Treatment Limbah Tulang Sapi (Pembersihan & Degreasing)

Langkah awal yang sangat krusial adalah menghilangkan seluruh residu organik pembusuk (sisir daging, lemak, dan jaringan sumsum) dari limbah tulang sapi agar tidak menimbulkan bau busuk dan warna kehitaman pada hasil akhir.

- **Langkah 1 (Sortasi & Sortir):** Limbah tulang sapi dikumpulkan dari jagal/RPH. Tulang dipotong menjadi bagian berukuran 5 - 10 cm menggunakan gergaji tulang.
- **Langkah 2 (Perebusan Degreasing):** Rebus potongan tulang dalam air mendidih (100°C) selama 2 - 3 jam. Tambahkan 2% kapur sirih atau soda kue untuk melarutkan lapisan minyak dan jaringan lemak yang melekat kuat pada pori tulang.
- **Langkah 3 (Pembersihan Mekanis):** Kikis sisir daging yang melunak. Cuci bersih menggunakan air mengalir hingga air bilasan benar-benar jernih dan tidak berbusa.
- **Langkah 4 (Pengeringan Awal):** Jemur tulang yang telah bersih di bawah sinar matahari terik selama 2 - 3 hari hingga kadar air tulang turun di bawah 10%.

3.2 Tahap II: Proses Kalsinasi Termal (Thermal Calcination)

Kalsinasi bertujuan mendekomposisi matriks kolagen dan mensterilkan mineral kalsium tulang secara sempurna.

- **Langkah 1:** Masukkan potongan tulang kering ke dalam krusibel atau tungku kalsinasi.
- **Langkah 2:** Nyalakan tungku dan naikkan suhu secara bertahap (ramp rate 10°C/menit) hingga mencapai suhu target 750°C - 800°C.
- **Langkah 3:** Pertahankan suhu konstan (*holding time*) selama 3 hingga 4 jam. Pada fase ini, warna tulang akan berubah dari kecokelatan, kehitaman (karbonisasi), hingga akhirnya menjadi putih murni (kalsinasi sempurna).
- **Langkah 4:** Matikan pemanas dan biarkan tungku dingin secara alami hingga mencapai suhu kamar (*cooling down*) untuk mencegah thermal shock pada krusibel.

3.3 Tahap III: Grinding, Sieving, dan Pembuatan Tepung Kalsium Tulang

Tulang hasil kalsinasi sempurna akan bersifat sangat rapuh dan mudah dihancurkan menjadi tepung mikron halus.

- **Langkah 1:** Tumbuk tulang terkalsinasi menggunakan lumpang/crusher hingga menjadi butiran kecil.
- **Langkah 2:** Proses butiran tersebut dalam High-Speed Micro Mill / Ball Mill selama 5 - 10 menit.
- **Langkah 3:** Ayak tepung menggunakan pengayak Mesh 200 (ukuran partikel ± 74 mikrometer). Partikel yang tidak lolos ayakan dikembalikan ke proses grinding.
- **Langkah 4:** Simpan tepung kalsium murni berwarna putih bersih ini di dalam wadah kedap udara (desikator/kontainer tertutup) agar tidak menyerap kelembapan udara.

3.4 Tahap IV: Formulasi Matriks Pasta Kapur Sehati

Pencampuran bahan dilakukan dengan presisi tinggi untuk menghasilkan tekstur kapur yang padat namun mudah menggosok:

- **1. Penimbangan:** Timbang 60 gram Tepung Kalsium Tulang Mesh 200.
- **2. Binders:** Timbang 20 gram Tepung Tapioka kualitas tinggi.
- **3. Gelatinisasi:** Larutkan tepung tapioka dalam 30 ml air dingin, lalu tuangkan 50 ml air mendidih sambil diaduk cepat hingga membentuk gel bening yang lengket (pasta kanji).
- **4. Pencampuran Akhir:** Campurkan tepung kalsium tulang ke dalam gel tapioka panas secara bertahap. Aduk hingga membentuk adonan homogen elastis (seperti plastisin soft). Tambahkan 3-5 tetes essential oil sereh sebagai aromaterapi anti-bakteri dan pengusir serangga.

3.5 Tahap V: Pencetakan, Kompaksi, dan Curing (Pengeringan)

- **1. Preparasi Mold:** Olesi bagian dalam cetakan silikon/PVC dengan sedikit minyak kelapa tipis-tipis.
- **2. Injeksi & Densifikasi:** Injeksi atau tekan adonan pasta Kapur Sehati ke dalam cetakan silindris. Lakukan penekanan/kompaksi manual dengan pendorong baja agar tidak ada rongga udara (air bubble) terjebak di dalam cetakan.
- **3. Setting Awal:** Biarkan adonan memadat di dalam cetakan selama 2 - 4 jam pada suhu ruang.
- **4. Demoulding:** Keluarkan batang kapur basah dari cetakan dengan hati-hati.
- **5. Curing & Oven:** Keringkan batang kapur di dalam oven pengering (dehydrator) pada suhu 60°C selama 12 jam, atau jemur di tempat teduh berangin (air drying) selama 2 - 3 hari hingga kadar air kapur berkurang menjadi $< 3\%$.

BAB 4. KONTROL KUALITAS (QC), UJI MUTU, DAN APLIKASI LABORATORIUM

Setiap batch produksi KAPUR SEHATI wajib melalui serangkaian pengujian mutu untuk memastikan produk memenuhi parameter kualitatif dan kuantitatif standar industri edukasi.

Parameter Uji	Metode Pengujian	Standar Mutu Target	Hasil Evaluasi Kapur Sehati
Uji Densitas & Keretakan	Pengukuran massa vs volume & uji tekan	Densitas 1.4 - 1.8 g/cm ³ , Bebas retak mikro	1.62 g/cm ³ (Sangat Padat & Kokoh)
Uji Residu Debu (Dust Level)	Penghapusan papan tulis dalam chamber tertutup	Penurunan emisi debu terbang > 75%	Debu jatuh ke bawah (Dustless Pattern)
Visibilitas Goresan	Pengukuran kontras optik pada papan hitam	Goresan putih tegas, kontras > 85%	Goresan pekat, putih bersih, sangat jelas
Kekerasan Mekanis (Drop Test)	Jatuhkan kapur dari ketinggian 1.5 meter	Kapur tidak patah menjadi > 3 bagian	Tetap utuh / hanya terbelah 2
Uji Keasaman (pH Test)	Pelarutan serbuk kapur dalam aquades (1:10)	pH aman bagi kulit manusia (6.5 - 8.5)	pH 7.4 (Aman, tidak iritasi kulit)
Uji Aromaterapi & IAQ	Panelis organoleptik & sensor particulate	Aroma segar sereh, VOC 0 ppm	Aroma menyegarkan, mereduksi bau apek

BAB 5. PETUNJUK KESELAMATAN KERJA (K3) DAN MITIGASI RISIKO OPERASIONAL

Meskipun KAPUR SEHATI menggunakan bahan ramah lingkungan, proses manufaktur yang melibatkan suhu tinggi dan serbuk halus membutuhkan penerapannya Standar K3 yang ketat:

- **1. Perlindungan Pernapasan:** Wajib menggunakan masker respirator minimal standar N95/FFP2 saat menangani proses pengayakan tepung kalsium tulang guna mencegah paparan debu inhalabel ke saluran pernapasan.
- **2. APD Pembakaran Termal:** Pengoperasian tungku kalsinasi pada suhu 800°C wajib menggunakan Sarung Tangan Tahan Panas (Heat Resistant Gloves hingga 1000°C), kacamata pelindung (Safety Goggles), dan apron pelindung industri.
- **3. Ventilasi Ruangan:** Ruangan kalsinasi dan ekstraksi perebusan tulang harus dilengkapi exhaust fan bertingkat tinggi untuk mengalirkan uap panas dan gas sisa pembakaran keluar dari area kerja.
- **4. Ergonomi & Penanganan Panas:** Penanganan larutan panas dan proses pencampuran pasta memerlukan kehati-hatian agar tidak menimbulkan luka bakar termal.

BAB 6. INTEGRASI KURIKULUM PEMBELAJARAN SEKOLAH (P5 & STEAM)

Proyek Pembuatan Kapur Sehati dirancang bukan hanya sebagai kegiatan produksi barang baku, melainkan sebagai modul proyek terpadu dalam Kurikulum Deep Learning, khususnya Proyek Penguatan Profil Pelajar Pancasila (P5) serta Pembelajaran Berbasis STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics).

6.1 Pemetaan Pembelajaran Interdisipliner (STEAM Matrix)

- **Science (Sains):** Siswa mempelajari Reaksi Kalsinasi Termal, Sintesis Kalsium Karbonat, Reaksi Gelatinisasi Pati, Perubahan Wujud Zat, dan Analisis pH Tanah/Air.
- **Technology (Teknologi):** Siswa memanfaatkan Furnase Kalsinasi, Mesin Grinding Mikron, Alat Ayakan Mesh Standard, serta Pembuat Cetakan 3D/Silikon.
- **Engineering (Teknik):** Siswa merancang proporsi rasio pengikat (binder-to-calcium ratio), mendesain mekanisme cetakan presisi, dan menguji ketahanan mekanis produk.
- **Arts (Seni):** Siswa mendesain kemasan ramah lingkungan (eco-packaging), membuat pewarnaan alami berbasis pigmen ekstrak tumbuhan lokal, dan estetika warna kapur.
- **Mathematics (Matematika):** Siswa menghitung neraca massa bahan baku, kalkulasi HPP (Harga Pokok Produksi), analisis efisiensi biaya, dan analisis data grafik penurunan kadar debu.

6.2 Integrasi Dimensi Profil Pelajar Pancasila

- **1. Beriman, Bertakwa kepada Tuhan YME, & Berakhlak Mulia (Aplikasi Akhlak kepada Alam):** Siswa diajak menyadari krisis limbah lingkungan di sekitar sekolah dan bertindak nyata melalui pembuatan produk bermanfaat.
- **2. Gotong Royong:** Proses pembersihan tulang, pencelupan, hingga pencetakan dilakukan secara bergotong royong dalam tim kerja pembagi tugas.
- **3. Bernalar Kritis & Kreatif:** Siswa melakukan uji coba eksperimental variasi konsentrasi tapioka untuk menemukan formulasi kapur paling ideal.

BAB 7. PANDUAN PENGEMBANGAN SEKOLAH ADIWIYATA & NILAI EKONOMI SIRKULAR

7.1 Kontribusi terhadap Program Sekolah Adiwiyata

Inovasi Kapur Sehati menjadi portofolio unggulan dalam penilaian Sekolah Adiwiyata (Tingkat Kabupaten, Provinsi, Nasional, hingga Mandiri). Komponen kontribusi meliputi:

- **A. Pengelolaan Sampah & Limbah Terpadu:** Mengubah limbah tulang sapi yang berpotensi mencemari lingkungan menjadi barang berdaya guna tinggi.
- **B. Inovasi Kualitas Lingkungan Sekolah:** Menciptakan produk kapur bebas debu toksik yang meningkatkan kualitas udara dan kesehatan warga sekolah secara langsung.
- **C. Kemitraan Lingkungan (Community Engagement):** Melibatkan kantin sekolah, warga sekitar, dan RPH lokal dalam jejaring pengumpulan limbah tulang.

7.2 Analisis Kelayakan Ekonomi Sirkular dan Bisnis

Tabel proyeksi biaya dan analisis Harga Pokok Produksi (HPP) untuk skala produksi sekolah (1.000 batang kapur):

Komponen Biaya	Kuantitas / Satuan	Harga Satuan (IDR)	Total Biaya (IDR)
Limbah Tulang Sapi	10 kg	Rp 2.000 / kg (Ongkos Angkut)	Rp 20.000
Tepung Tapioka Super	3 kg	Rp 12.000 / kg	Rp 36.000
Essential Oil Sereh	30 ml	Rp 1.000 / ml	Rp 30.000
Biaya Listrik / Gas Kalsinasi	1 Paket Produksi	Rp 50.000	Rp 50.000
Kemasan Dus Eco-Paper (Isi 50)	20 Box	Rp 2.500 / box	Rp 50.000
TOTAL BIAYA PRODUKSI (1000 Batang)	-	-	Rp 186.000
HPP per Batang	1000 Batang	-	Rp 186 / batang

Kapur

Harga Jual Komersial Pasar	1 Box (50 Batang)	-	Rp 25.000 (Rp 500/btg)
PROFIT MARGIN SEKOLAH	20 Box	Rp 500.000 Total Omset	Rp 314.000 (Margin > 160%)

BAB 8. STRATEGI IMPLEMENTASI, PUBLIKASI, DAN BRANDING EDUKASI

Agar inovasi KAPUR SEHATI memberikan dampak luas, sekolah dipandu untuk melakukan tahapan publikasi dan penguatan merek:

- **1. Branding Visual & Logo:** Merancang logo KAPUR SEHATI yang mencerminkan nuansa hijau ekologis, daun alami, dan simbol tulang terulang bersih.
- **2. Eco-Packaging Design:** Mengemas kapur dalam kotak berbahan kertas daur ulang (recycled kraft paper) yang ramah lingkungan tanpa selotip plastik.
- **3. Digital Dissemination:** Menyusun buku saku elektronik (e-book) dan video tutorial langkah demi langkah yang dapat diakses publik melalui QR-code di kemasan produk.
- **4. Perlindungan HKI:** Mengajukan Hak Cipta Buku Panduan dan Paten Sederhana Formulasi Kapur Bebas Debu ke Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual (DJKI).

BAB 9. PENUTUP DAN REKOMENDASI KEBIJAKAN SEKOLAH

Inovasi KAPUR SEHATI membuktikan bahwa limbah organik yang dianggap tidak bernilai dapat ditransformasikan menjadi produk inovatif bernilai tinggi, sehat, dan berdampak sosial-lingkungan yang nyata. Keberhasilan program ini membutuhkan komitmen penuh dari kepala sekolah, dewan guru, komite sekolah, serta partisipasi aktif para siswa.

Direkomendasikan agar setiap sekolah berbasis lingkungan memasukkan pembuatan Kapur Sehati ke dalam Kalender Akademik Projek P5 tahunan, serta mengganti penggunaan kapur komersial secara bertahap menuju 100% Kapur Sehati mandiri.