



MASALAH LAPISAN AKHIR: SIKATIF METALIK SEBAGAI REKONTAMINASI PARAMAGNETIK BERACUAN PERMUKAAN PADA KAYU BERKATEGORI NETRALITAS

Masalah Lapisan Akhir: Sikatif Metalik sebagai Rekontaminasi Paramagnetik Beracuan Permukaan pada Kayu Berkategori Netralitas

A. Bosque, M. Ferro, L. Solder, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Sebuah studi pendamping menetapkan kelas netralitas untuk kayu struktural, yang ditentukan berdasarkan kandungan paramagnetik residual dan dilaporkan sebagai fraksi massa gabungan besi-plus-mangan terhadap garis dasar diamagnetik. Kelas itu merupakan sifat balok mentah. Makalah ini membahas apa yang terjadi ketika balok tersebut diberi lapisan akhir. Hampir setiap minyak, pernis, dan lak yang digunakan pada kayu merupakan pelapis yang mengeras melalui reaksi oksidatif, bukan melalui penguapan melainkan melalui pengikatan silang autooksidatif minyak pengering yang dikatalisis logam, dan katalisnya adalah logam transisi paramagnetik -- paling sering kobalt atau mangan -- yang diendapkan sebagai garam karboksilat pada fraksi sekian persen logam dalam film basah. Karena film berada di permukaan luar, katalis diendapkan tepat di tempat penyangga bersentuhan dengan kabel. Kami mengukur suseptibilitas magnetik volume beracuan permukaan pada kupon jati 5N sebelum dan sesudah enam perlakuan lapisan akhir (kontrol mentah, minyak tung murni tanpa sikatif, minyak biji rami rebus dengan oktoat Co, pernis spar alkid dengan Co + Mn + Zr, akrilik berbasis air, dan minyak lilin keras) menggunakan magnetometri sampel bergetar dan SQUID, disertai pemprofilan kedalaman lucutan pijar untuk menentukan letak logam. Lapisan akhir yang mengeras secara oksidatif menaikkan suseptibilitas 50 mikrometre teratas dari garis dasar diamagnetik di sekitar $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ menjadi nilai positif bersih, sehingga setiap kupon berkatalis diklasifikasikan ulang dari 5N menjadi di bawah 4N; dalam setiap kasus, logam terbatas pada 50 hingga 100 mikrometre teratas. Tren sikatif bebas kobalt terbaru (pengganti Mn, Fe, dan vanadium) menghilangkan masalah toksikologi tetapi bukan masalah magnetik, karena bahan penggantinya sendiri bersifat paramagnetik. Kami menyimpulkan bahwa satu-satunya lapisan akhir yang mempertahankan kelas netralitas adalah tanpa lapisan akhir, dan bahwa patina permukaan elemental -- oksidasi kerangka karbon kayu, yang tidak menambahkan logam -- merupakan satu-satunya jalur penuaan kosmetik yang sesuai dengan kelas tersebut.

1. PENDAHULUAN

Sebuah balok berkategori netralitas memperoleh kelasnya melalui pengukuran: pemindaian inklusi ferus, penentuan suseptibilitas curah, dan pengujian logam renik bersepakat bahwa kayu mengandung tidak lebih dari jumlah bagian-per-juta besi plus mangan yang ditentukan, dan bahwa suseptibilitas volume bersihnya tetap diamagnetik. Jati perkebunan ekuatorial mencapai 5N ($\text{Fe} + \text{Mn} \leq 10$ ppm) saat diterima dan 6N melalui seleksi balok tunggal. Kelas tersebut nyata, disertifikasi per unit, dan sepenuhnya merupakan sifat kayu saat meninggalkan penggergajian.

Studi utama (Bosque, Ferro, Park & Tanaka, 2026) mencatat, dalam satu bagian penutup, bahwa pemberian lapisan akhir pada kayu menghancurkan kelas tersebut, lalu melaporkan satu pengukuran sebelum-dan-sesudah pada kupon minyak biji rami rebus untuk menegaskan hal itu. Pengamatan tersebut patut mendapat lebih dari satu paragraf. Klaimnya berlawanan dengan intuisi: setiap pekerja kayu memahami lapisan akhir sebagai perlindungan, dan gagasan bahwa lapisan pelindung merupakan tindakan yang paling merusak secara magnetik terhadap bahan penyangga bertentangan dengan praktik bengkel selama satu abad. Jika klaim itu hendak menopang keputusan produk -- memasok penyangga tanpa lapisan akhir, berlawanan dengan setiap harapan pelanggan terhadap benda kayu premium -- klaim tersebut perlu dibuktikan secara kuantitatif, di berbagai kimia lapisan akhir, dengan lokasi logam pencemar ditentukan menurut kedalaman.

Itulah tujuan makalah ini. Kami memperlakukan lapisan akhir bukan sebagai estetika permukaan, melainkan sebagai lapisan tipis logam katalis yang sengaja diendapkan, lalu menanyakan dengan tepat berapa banyak massa paramagnetik yang ditempatkannya, dan di mana. Jawabannya tidak menguntungkan pelapisan akhir secara umum dan mematikan bagi seluruh kelas minyak serta pernis yang mengeras secara oksidatif dan mendominasi pengerjaan kayu halus, karena alasan yang sama sekali tidak berkaitan dengan kayunya dan sepenuhnya berkaitan dengan kimia yang membuat film mengeras.

2. KIMIA SIKATIF DAN MUATAN LOGAM

Minyak pengering -- biji rami, tung, dan turunan alkidnya -- mengeras melalui autooksidasi: oksigen atmosfer menarik hidrogen dari posisi bis-alilik pada rantai asam lemak tak jenuh, membentuk hidroperoksida yang terurai menjadi radikal dan mengikat-silangkan minyak menjadi film padat. Jika dibiarkan sendiri, reaksi ini lambat dan memerlukan waktu berminggu-minggu. Reaksi dipercepat oleh sikatif, yang juga disebut bahan pengering: karboksilat logam transisi yang mengatalisis tahap pembentukan maupun penguraian peroksida melalui siklus redoks di antara dua tingkat oksidasi. Sikatif primer klasik adalah kobalt, yang bersiklus antara Co(II) dan Co(III) ; mangan (Mn(II)/Mn(III)) berperilaku serupa. Keduanya merupakan logam sikatif-dalam dan sikatif-permukaan. Zirkonium, kalsium, dan seng ditambahkan sebagai sikatif sekunder atau tambahan -- unsur-unsur ini tidak mengatalisis tahap redoks, tetapi mengoordinasikan film, memperbaiki pengerasan menyeluruh, dan mencegah pembentukan kulit permukaan yang disebabkan kobalt murni.

Logam disalurkan sebagai garam asam organik berantai panjang -- dahulu asam naftenat (naftenat), kini lebih lazim asam



2-etilheksanoat (oktoat) -- yang dipilih karena kelarutannya dalam minyak, bukan karena sifat ion logam selain kimia redoksnya. Garam dijual menurut kandungan logamnya: naftenat "kobalt 6 persen" mengandung 6 persen kobalt berdasarkan massa sikatif cair. Dalam pelapis jadi, logam sikatif primer biasanya didosiskan sebesar 0,02 hingga 0,1 persen logam relatif terhadap padatan minyak, dengan kobalt di ujung bawah rentang itu karena dayanya dan mangan agak lebih tinggi.

Fraksi-fraksi tersebut terdengar dapat diabaikan, dan memang demikian per satuan massa lapisan akhir. Masalahnya adalah kerapatan areal, bukan konsentrasi. Satu lapis minyak pelapis yang disapukan mengendapkan sekitar 20 hingga 40 g padatan per meter persegi; pada 0,05 persen kobalt, itu berarti 10 hingga 20 mg kobalt per meter persegi permukaan. Sebuah balok jati 5N dengan 10 ppm Fe + Mn, pada blok representatif berukuran 200 x 60 x 45 mm dan berdensitas 650 kg/m³, mengandung kira-kira 35 mikrogram logam pencemar yang dinilai dalam seluruh volumenya. Lapisan akhir pada sisi atas saja mengendapkan beberapa ratus mikrogram logam paramagnetik -- satu orde besaran lebih banyak daripada pencemar yang diizinkan dalam seluruh balok, ditempatkan dalam lapisan setebal beberapa mikron pada permukaan tempat kabel bertumpu. Kelas tersebut ditetapkan untuk mengendalikan bagian-per-juta paramagnetik; lapisan akhir menggagalkannya bukan beberapa persen, melainkan dengan suatu faktor pengali.

3. EKSPERIMEN: SUSEPTIBILITAS BERACUAN PERMUKAAN SEBELUM DAN SESUDAH

Kami menyiapkan 36 kupon (60 x 60 x 8 mm) dari satu balok jati ekuatorial 5N, yang diverifikasi ICP-MS pada 7 ppm Fe + Mn, agar semua kupon berbagi substrat yang sama dan setiap perbedaan pascapelapisan hanya dapat dikaitkan dengan pelapis. Kupon dibagi dalam kelompok berisi enam untuk enam perlakuan: (A) kontrol mentah tanpa lapisan akhir; (B) minyak tung murni, bebas sikatif, mengeras selama 21 hari; (C) minyak biji rami rebus dengan oktoat kobalt (0,05 persen Co); (D) pernis spar alkid dengan paket Co + Mn + Zr (0,04 persen Co, 0,06 persen Mn, 0,20 persen Zr); (E) dispersi akrilik berbasis air (tanpa sikatif oksidatif); dan (F) minyak lilin keras komersial (biji rami dan karnauba, dikatalisis kobalt). Semua perlakuan pembentuk film diaplikasikan sebanyak dua lapis dengan kendali 30 g/m² per lapis dan dibiarkan mengeras hingga cukup keras untuk ditangani.

Karena kontaminasi merupakan lapisan permukaan dan kupon merupakan benda curah, pengukuran suseptibilitas seluruh sampel mengencerkan sinyal sepanjang 8 mm kayu diamagnetik dan mengecilkan nilainya. Karena itu, kami melaporkan suseptibilitas beracuan permukaan dengan dua cara. Pertama, suseptibilitas volume bersih seluruh kupon menggunakan magnetometer sampel bergetar (Lake Shore 8600, 300 K), yang menangkap perubahan terintegrasi. Kedua, angka lapisan permukaan yang diperoleh dengan mengukur irisan sejajar sisi setebal 200 mikrometre yang dipotong menggunakan mikrotom dari permukaan berlapis dan dipasang kembali, kemudian diukur pada magnetometer SQUID (Quantum Design MPMS3) demi sensitivitas yang diperlukan irisan tipis tersebut. Nilai beracuan permukaanlah yang penting, karena kayu itulah yang benar-benar disentuh kabel.

Hasilnya tidak ambigu. Kontrol mentah (A) mempertahankan garis dasar diamagnetik, χ_v seluruh kupon = -5.9×10^{-6} , irisan permukaan -6.1×10^{-6} . Perlakuan bebas sikatif (B, tung murni; E, akrilik) secara statistik tidak dapat dibedakan dari kontrol pada kedua skala -- dengan mengesampingkan permitivitas, keduanya tidak menambahkan logam paramagnetik dan tidak mengubah kelas. Ketiga lapisan akhir berkatalis yang mengeras secara oksidatif (C, D, F) semuanya mendorong irisan permukaan menjadi positif bersih: minyak biji rami rebus menjadi $+2.3 \times 10^{-6}$, minyak lilin keras menjadi $+1.9 \times 10^{-6}$, dan pernis spar Co + Mn + Zr paling jauh, menjadi $+4.8 \times 10^{-6}$. Jika dirujuk pada lapisan permukaan yang disentuh kabel, setiap kupon berkatalis beralih dari diamagnetik menjadi paramagnetik dan diklasifikasikan ulang dari 5N menjadi di bawah 4N. Nilai VSM seluruh kupon bergerak ke arah yang sama, tetapi diredam oleh pengenceran curah -- tepat karena itulah pengukuran curah pada penyangga berlapis menyanjung lapisan akhir, sedangkan pengukuran beracuan permukaan mengecamnya.

4. PEMROFILAN KEDALAMAN: LETAK LOGAM

Perubahan suseptibilitas memberi tahu kita bahwa logam hadir; perubahan itu tidak memberi tahu kita di mana letaknya. Bagi bahan penyangga, distribusi kedalaman bukanlah hal sampingan, karena kopling terhadap kabel menurun tajam seiring jarak dan pencemar yang terkubur 2 mm di bawah permukaan secara elektromagnetik jauh kurang relevan daripada massa yang sama dalam beberapa mikron pertama. Kami memetakan profil kupon berlapis menggunakan spektrometri emisi optik lucutan pijar frekuensi radio (GD-OES, Horiba GD-Profilier 2), yang mengikis permukaan dengan laju kira-kira 2 hingga 3 mikrometre per detik sambil melacak emisi Co, Mn, Zr, dan Fe, kemudian melakukan pemeriksaan silang pada kupon terpilih dengan penampang kedalaman ICP-MS ablasi laser.

Pada setiap kupon yang mengeras secara oksidatif, logam katalis terbatas pada lapisan dan kayu tepat di bawahnya. Emisi kobalt dan mangan memuncak di permukaan, bertahan sepanjang ketebalan film 30 hingga 70 mikrometre, lalu turun lebih dari satu orde besaran pada 20 hingga 40 mikrometre berikutnya ketika profil memasuki kayu yang belum terpenetrasi, mencapai latar substrat 7 ppm sekitar 100 mikrometre dalam kasus terburuk (minyak biji rami rebus berviskositas rendah, yang meresap ke porositas permukaan) dan sekitar 60 mikrometre untuk pernis yang lebih kental. Jika diintegrasikan, lebih dari 90 persen logam paramagnetik yang diendapkan terletak dalam 100 mikrometre teratas, dan mayoritas dalam 50 mikrometre teratas. Kedalaman zirkonium mengikuti kobalt dan mangan, tetapi karena secara efektif nonparamagnetik dalam koordinasi ini, zirkonium berkontribusi pada profil tanpa berkontribusi pada suseptibilitas -- suatu pemeriksaan internal yang berguna bahwa sinyal magnetik mengikuti Co dan Mn, bukan logam total.



Ini merupakan distribusi yang secara geometris paling buruk bagi penyangga kabel. Kelas netralitas dibangun di atas premis bahwa kayu yang bersentuhan dengan konduktor bersifat diamagnetik; lapisan akhir membalikkan premis itu dengan memuat logam paramagnetik ke dalam kulit 50 hingga 100 mikrometre yang tepat membentuk antarmuka kontak, sementara inti dalam blok yang tidak relevan secara elektromagnetik tetap sebersih semula. Secara magnetik, penyangga berlapis adalah lembaran paramagnetik tipis yang membungkus balok netral dan disajikan kepada kabel dengan sisi logam menghadap keluar.

5. TREN SIKATIF BEBAS KOBALT TIDAK MEMBANTU

Oktoat kobalt berada di bawah tekanan regulasi. Garam kobalt dari asam 2-etilheksanoat memiliki klasifikasi harmonis sebagai karsinogen yang dicurigai dan racun reproduksi, dan industri pelapis telah berinvestasi besar-besaran pada sikatif bebas kobalt selama satu dekade terakhir. Bahan penggantinya terbagi menjadi tiga keluarga: kompleks mangan (sering kali dengan ligan bipiridina atau aminometil yang meningkatkan aktivitas Mn hingga setara kobalt), kompleks besi (besi dengan ligan donor-nitrogen khusus, dipasarkan sebagai sikatif primer pengganti langsung berkinerja tinggi), dan sistem berbasis vanadium. Ketiganya dipromosikan sebagai lebih aman, dan untuk tujuan yang dimaksudkan -- mengganti katalis beracun dengan yang jinak pada kecepatan pengeringan yang sama -- beberapa memang berhasil.

Untuk tujuan kami, bahan-bahan itu tidak berhasil sama sekali. Mangan, besi, dan vanadium semuanya bersifat paramagnetik; besi dan mangan adalah dua unsur yang secara khusus hendak dikecualikan oleh kelas netralitas. Mengganti oktoat kobalt dengan sikatif besi atau mangan tidak menyingkirkan logam paramagnetik dari film permukaan -- itu mengganti satu logam paramagnetik dengan logam paramagnetik lain, dan dalam kasus besi, memasukkan pencemar tunggal yang paling berat hukumannya pada skala kelas. Kami melapisi satu set kupon jati tambahan dengan sikatif besi-bipiridina komersial pada muatan yang direkomendasikan produsen dan mengukur irisan permukaan pada $+3.1 \times 10^{-6}$, sebanding dengan hasil biji rami rebus berkobalt dan, karena logamnya adalah besi alih-alih kobalt, boleh dibilang lebih buruk terhadap kelas yang sumbu utamanya adalah kandungan besi. Sikatif mangan-neodekanoat menghasilkan $+2.6 \times 10^{-6}$.

Pelajarannya adalah bahwa tren bebas kobalt mengoptimalkan sasaran toksikologis yang ortogonal terhadap sasaran magnetik. Tidak ada kimia sikatif pengerasan oksidatif, baik sekarang maupun yang dapat diperkirakan, yang mengeraskan minyak pengering tanpa logam transisi aktif-redoks, dan setiap logam transisi aktif-redoks yang cukup murah dan melimpah untuk menjadi sikatif bersifat paramagnetik. Industri pelapisan akhir tidak akan memecahkan masalah ini, karena dari sudut pandangnya tidak ada masalah yang perlu dipecahkan: sikatif yang netral secara magnetik akan menjadi solusi yang mencari pasar yang, saat ini, seluruhnya hanya terdiri dari kami.

6. PEMBAHASAN: PILIHAN YANG TERSISA

Jika lapisan akhir yang mengeras secara oksidatif dikecualikan atas dasar magnetik, secara formal tersisa tiga kategori pelapis bebas logam: minyak pengering bebas sikatif, film berbasis air yang mengering secara fisik dan berkoalesensi, serta lak evaporatif sejati. Minyak tung bebas sikatif kami (perlakuan B) dan dispersi akrilik (perlakuan E) mengonfirmasi bahwa keduanya tidak menambahkan logam paramagnetik dan mempertahankan kelas. Namun, keduanya merupakan lapisan akhir yang buruk bagi benda khusus ini. Minyak bebas sikatif pada penyangga yang harus mengeras sepenuhnya sebelum dapat menanggung kabel memerlukan waktu berminggu-minggu untuk mengeras dan selamanya tetap cukup lunak untuk menangkap logam permukaan dari klip kabel dan penanganan biasa -- ia mengubah penyangga menjadi pengumpul pasif bagi kontaminasi yang justru dikecualikan kelas. Akrilik berbasis air menyegel kayu, tetapi menaikkan permitivitas permukaan dan tangen rugi jauh di atas jati telanjang, menukar masalah magnetik yang dilarang kelas dengan masalah dielektrik yang juga dikenai penalti oleh studi pendamping.

Dengan kata lain, setiap lapisan akhir menambahkan logam paramagnetik (minyak dan pernis yang mengeras secara oksidatif, yaitu seluruh kelas tradisional), atau menurunkan mutu permukaan dielektrik (film berbasis air), atau gagal mengeras cukup kuat untuk menahan rekontaminasi saat digunakan (minyak bebas sikatif). Tidak satu pun memperbaiki permukaan berkategori, dan masing-masing merupakan langkah yang diambil setelah kayu melewati setiap pengujian yang diwajibkan kelas. Lapisan akhir hanya dapat mengurangi kelas yang sudah dimiliki balok mentah; tidak ada pelapis yang dapat menambahnya, karena besaran yang dinilai adalah ketiadaan sesuatu, sedangkan pelapis menurut definisinya merupakan penambahan.

Hal ini mengubah kerangka penyangga tanpa lapisan akhir dari penghematan biaya atau asketisme estetis menjadi satu-satunya pilihan yang sesuai dengan pengukuran. Balok dipilih, dipindai, diambil intinya, dicerna, diuji, dan disertifikasi pada angka bagian-per-juta paramagnetik; kemudian menyapukan minyak berkatalis kobalt pada sisi kerjanya berarti menjalani seluruh proses itu lalu membatalkannya pada langkah terakhir, di lokasi yang paling aktif secara elektromagnetik, demi sebuah film penampilan.

7. KESIMPULAN

Memberi lapisan akhir pada kayu merekontaminasinya secara magnetik, dan melakukannya di permukaan, karena kimia yang mengeraskan lapisan akhir tradisional adalah autooksidasi berkatalis logam dan katalis tersebut merupakan logam transisi paramagnetik yang diendapkan dalam film. Kami mengukur efek itu secara langsung: pada satu substrat jati 5N, setiap lapisan akhir yang mengeras secara oksidatif -- biji rami rebus berkobalt, pernis spar Co + Mn + Zr, dan minyak lilin keras berkobalt -- mendorong suseptibilitas volume beracuan permukaan dari garis dasar diamagnetik di sekitar -6×10^{-6} menjadi nilai positif bersih



setinggi $+4.8 \times 10^{-6}$, mengklasifikasikan ulang permukaan berkategori dari 5N menjadi di bawah 4N, dengan lebih dari 90 persen logam paramagnetik yang diendapkan terbatas pada 100 mikrometre teratas yang bersentuhan langsung dengan kabel. Minyak bebas sikatif dan film berbasis air tidak menambahkan logam, tetapi menggagalkan benda ini atas dasar lain; tren sikatif bebas kobalt mengganti dengan besi, mangan, atau vanadium sehingga menghilangkan racun tanpa menghilangkan satu unit pun kontaminasi paramagnetik.

Kesimpulannya sempit dan tegas. Satu-satunya lapisan akhir yang mempertahankan kelas netralitas kayu adalah tanpa lapisan akhir. Permukaan tanpa lapisan akhir teroksidasi dan mengabu seiring usia, tetapi patina itu merupakan oksidasi elemental pada kerangka karbon kayu dan tidak menambahkan logam; secara kosmetik ia merupakan perubahan dan secara magnetik bukan peristiwa. Karena itu, Blok Elevasi Ekuatorial dikirim, dan akan terus dikirim, tanpa lapisan akhir -- bukan karena lapisan akhir ditiadakan untuk menghemat satu langkah, melainkan karena menerapkannya akan menghabiskan seluruh kelas demi membeli kilau.

REFERENSI

- [1] Soucek, M. D., Khatlab, T., Wu, J. (2012). Tinjauan autooksidasi dan sikatif. *Progress in Organic Coatings*, 73(4), 435-454.
- [2] Erich, S. J. F., Laven, J., Pel, L., Huinink, H. P., Kopinga, K. (2006). Distribusi sabun logam dan pengeringan katalitik pelapis alkid yang diteliti dengan pencitraan NMR. *Progress in Organic Coatings*, 55(2), 105-113.
- [3] Micciche, F., van Haveren, J., Oostveen, E., Ming, W., van der Linde, R. (2006). Pelapis berbasis minyak dan penggantian sikatif kobalt dengan kompleks mangan dan besi. *Applied Catalysis A: General*, 297(2), 174-181.
- [4] van Gorkum, R., Bouwman, E. (2005). Pengeringan oksidatif cat alkid yang dikatalisis kompleks logam. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17-18), 1709-1728.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Penilaian netralitas magnetik kayu struktural: klasifikasi kemurnian kelas-N untuk bahan penyangga audio. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(2), 44-71.
- [6] Solder, L., Bosque, A. (2026). Pemrofilan kedalaman lucutan pijar untuk kontaminasi paramagnetik beracuan permukaan pada kupon kayu keras berlapis akhir. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 88-104.