



---

ปัญหาสารเคลือบผิว: สารเร่งแห้งโลหะในฐาน  
ะการปนเปื้อนพาราแมกเนติกซ้ำที่อ้างอิงจาก  
ผิวของไม้ซึ่งผ่านการจัดเกรดความเป็นกลาง

---

# ปัญหาสารเคลือบผิว: สารเร่งแห้งโลหะในฐานะการปนเปื้อนพาราแมกเนติกที่อาจอิงจากผิวของไม้ซึ่งผ่านการจัดเกรดความเป็นกลาง

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.

## บทคัดย่อ

การศึกษาผู้ก้นได้กำหนดเกรดความเป็นกลางสำหรับไม้โครงสร้าง โดยยึดปริมาณพาราแมกเนติกตกค้างเป็นหลัก และรายงานเป็นเศษส่วนมวลรวมของเหล็กกับแมงกานีสเทียบกับเส้นฐานโลหะแมกเนติก เกรดดังกล่าวเป็นสมบัติของไม้ดิบ บทความนี้พิจารณาว่าเกิดอะไรขึ้นกับเกรดนั้นเมื่อก่อนไม้ได้รับการเคลือบผิว น้ำมัน วาร์นิช และแล็กเกอร์แทบทุกชนิดที่ใช้กับไม้เป็นสารเคลือบซึ่งบ่มด้วยออกซิเดชัน มิได้แข็งตัวด้วยการระเหย แต่ด้วยการเชื่อมขวางแบบออกซิเดชันของน้ำมันแห้งซึ่งเร่งด้วยโลหะ และตัวเร่งปฏิกิริยาคือโลหะแทรนซิชันพาราแมกเนติก--โดยมากเป็นโคบอลต์หรือแมงกานีส--ที่สะสมในรูปเกลือคาร์บอกซิเลตด้วยสัดส่วนเพียงเศษของหนึ่ง percent ของโลหะในฟิล์มเปียก เนื่องจากฟิล์มอยู่บนผิวนอก ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงถูกสะสมตรงตำแหน่งที่แทนรองสัมผัสสายเคเบิลพอดี้ เราวัดความไวแม่เหล็กเชิงปริมาตรแบบอ้างอิงจากผิวบนชั้นทดสอบไม้สักเกรด 5N ก่อนและหลังการเคลือบผิวหกแบบ (ตัวควบคุมไม้ดิบ น้ำมันตบบริสุทธิ์ใสสารเร่งแห้ง น้ำมันลินสีดต้มกับ Co octoate วาร์นิชสปรอยอัลคิด์ที่มี Co + Mn + Zr อะคริลิกสูตรน้ำ และน้ำมันฮาร์ดแวกซ์) ด้วยแมกนีโตเมทรีแบบตัวอย่างสับและ SQUID พร้อมการทำโปรไฟล์ความลึกด้วยไคลวดีสซาร์ฟเพื่อระบุตำแหน่งโลหะ สารเคลือบที่บ่มด้วยออกซิเดชันเพิ่มค่าความไวในชั้นบนสุด 50 micrometres จากเส้นฐานโลหะแมกเนติกใกล้  $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$  เป็นค่าบวกสุทธิ ทำให้ชั้นทดสอบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาถูกขึ้นถูกจัดใหม่จาก 5N เป็นต่ำกว่า 4N; ในทุกกรณี โลหะจำกัดอยู่ในชั้นบนสุด 50 ถึง 100 micrometres แนวโน้มสารเร่งแห้งไร้โคบอลต์ในระยะหลัง (ใช้ Mn, Fe และวานาเดียมทดแทน) แก้ปัญหาพิษวิทยาแต่ไม่แก้ปัญหาลำไส้เหล็ก เพราะสารทดแทนเหล่านี้เป็นพาราแมกเนติกเช่นกัน เราสรุปว่าสารเคลือบผิวเพียงชนิดเดียวที่รักษาเกรดความเป็นกลางไว้ได้คือการไม่เคลือบเลย และพาทีนาราดูบนผิว--การออกซิโดโครมคาร์บอนของไม้ซึ่งไม่เพิ่มโลหะ--เป็นหนทางทางเลือกอายุเชิงรูปลักษณ์เพียงทางเดียวที่เข้ากันได้กับเกรดนี้

## 1. บทนำ

ก่อนไม้ที่ผ่านการจัดเกรดความเป็นกลางได้เกรดมาจากการวัด กล่าวคือ การสแกนสิ่งแทรกปนชนิดเหล็ก การหาความไวแม่เหล็กโดยรวม และการวิเคราะห์โลหะปริมาณร่องรอยต่างให้ผลตรงกันว่าไม่มีเหล็กรวมแมงกานีสไม่เกินจำนวนส่วนในล้านส่วนที่กำหนด และความไวแม่เหล็กเชิงปริมาตรสุทธิยังคงเป็นโลหะแมกเนติก ไม้สักสวนปลูกแถบศูนย์สูตรมีเกรด 5N ( $Fe + Mn \leq 10$  ppm) เมื่อส่งมอบ และมีเกรด 6N เมื่อคัดเลือกเป็นรายก่อน เกรดนี้มีอยู่จริง ได้รับการรับรองรายชิ้น และเป็นสมบัติของไม้โดยสิ้นเชิง ณ ขณะที่ออกจากโรงเลื่อย

งานศึกษาหลัก (Bosque, Ferro, Park & Tanaka, 2026) ระบุไว้ในหัวข้อปิดท้ายเพียงหัวข้อเดียวว่าการเคลือบผิวไม้ทำลายเกรด และรายงานการวัดก่อนกับหลังหนึ่งชุดบนชั้นทดสอบที่เคลือบน้ำมันลินสีดต้มเพื่อยืนยันประเด็นดังกล่าว ข้อสังเกตนี้สมควรได้รับพื้นที่มากกว่าหนึ่งย่อหน้า ข้ออ้างนี้ขัดกับสัญชาตญาณ ช่างไม้ทุกคนเข้าใจว่าสารเคลือบผิวคือการปกป้อง และความคิดที่ว่าชั้นเคลือบป้องกันเป็นสิ่งที่ทำลายวัสดุตรงรับในทางแม่เหล็กได้มากที่สุดนั้นสวนทางกับแนวปฏิบัติในโรงงานกว่าหนึ่งศตวรรษ หากข้ออ้างนี้ต้องรองรับน้ำหนักของการตัดสินใจเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์--การจำหน่ายแทนรองโดยไม่เคลือบผิวซึ่งขัดกับความคาดหวังทั้งหมดของลูกค้าที่มีต่อวัตถุไม้ระดับพรีเมียม--ก็ต้องพิสูจน์เชิงปริมาณ ครอบคลุมเคมีของสารเคลือบผิว และระบุตำแหน่งโลหะปนเปื้อนตามความลึก

นี่คือจุดมุ่งหมายของบทความนี้ เราพิจารณาสารเคลือบผิวไม้ในฐานะความงามของพื้นผิว แต่ในฐานะชั้นบางของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตั้งใจสะสมลงไป และถามว่าชั้นนั้นวางมวลพาราแมกเนติกไว้เท่าใดและที่ใด ค่าตอบไม่เป็นคุณต่อการเคลือบผิวโดยทั่วไป และถึงขั้นตัดสิทธิ์น้ำมันกับวาร์นิชที่บ่มด้วยออกซิเดชันทั้งกลุ่มซึ่งครองงานไม้ชั้นดี ด้วยเหตุผลที่ไม่เกี่ยวกับเนื้อไม้เลย แต่เกี่ยวข้องกับเคมีที่ทำให้ฟิล์มแข็งตัว

## 2. เคมีของสารเร่งแห้งและปริมาณโลหะ

น้ำมันแห้ง--ลินสีด ตูง และอนุพันธ์อัลคิด์ของน้ำมันเหล่านี้--แข็งตัวด้วยออกซิเดชัน ออกซิเจนในบรรยากาศดึงไฮโดรเจนออกจากตำแหน่ง bis-allylic ของสายโซ่กรดไขมันไม่อิ่มตัว เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งสลายเป็นอนุมูลและเชื่อมขวางน้ำมันให้เป็นฟิล์มแข็ง หากปล่อยไว้เอง ปฏิกิริยานี้ช้าและใช้เวลาหลายสัปดาห์ สารเร่งแห้งหรือ siccatives ช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยเป็นคาร์บอกซิเลตของโลหะแทรนซิชันที่เร่งทั้งขั้นสร้างเปอร์ออกไซด์และขั้นสลายเปอร์ออกไซด์ผ่านวัฏจักรรีดอกซ์ระหว่างสถานะออกซิเดชันสองค่า สารเร่งแห้งปฐมภูมิแบบดั้งเดิมคือโคบอลต์ซึ่งหมุนเวียนระหว่าง  $Co(II)$  กับ  $Co(III)$ ; แมงกานีส ( $Mn(II)/Mn(III)$ ) มีพฤติกรรมคล้ายกัน โลหะเหล่านี้ทำหน้าที่เร่งแห้งทั้งเนื้อฟิล์มและผิว เซอร์โคเนียม แคลเซียม และสังกะสีถูกเติมเป็นสารเร่งแห้งทุติยภูมิหรือสารช่วย--ไม่ได้เร่งขั้นรีดอกซ์ แต่ประสานโครงสร้างฟิล์ม ปรับปรุงการบ่มทะลุเนื้อ และป้องกันการเกิดผิวแข็งที่โคบอลต์บริสุทธิ์ก่อขึ้น

โลหะถูกนำลงในรูปเกลือของกรดอินทรีย์สายยาว--เดิมใช้กรดแนฟทีก (naphthenates) ปัจจุบันใช้กรด 2-ethylhexanoic (octoates) มากกว่า--โดยเลือกเพราะละลายในน้ำมันได้ มิใช่เพราะสมบัติของไอออนโลหะนอกเหนือจากเคมีรีดอกซ์ เหลือจำหน่ายโดยระบุปริมาณโลหะ ตัวอย่างเช่น naphthenate "โคบอลต์ 6 percent" มีโคบอลต์ 6 percent โดยมวลของสารเร่งแห้งเหลว ในสารเคลือบที่เสร็จแล้ว ปกติจะเติมโลหะสารเร่งแห้งปฐมภูมิที่ 0.02 ถึง 0.1 percent ของโลหะเทียบกับของแข็งในน้ำมัน โดยโคบอลต์อยู่ช่วงล่างของพิสัยเพราะออกฤทธิ์แรงกว่า ส่วนแมงกานีสใช้สูงกว่าเล็กน้อย

เศษส่วนเหล่านี้ฟังดูเล็กน้อย และเมื่อคิดต่อหน่วยมวลสารเคลือบก็เล็กลง ปัญหาอยู่ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ไม่ใช่ความเข้มข้น การทาน้ำมันเคลือบหนึ่งชั้นด้วยฝักของแข็งราว 20 ถึง 40 g ต่อตารางเมตร; ที่โคบอลต์ 0.05 percent เท่ากับโคบอลต์ 10 ถึง 20 mg ต่อตารางเมตรของผิว ไม้สัก 5N ซึ่งมี  $Fe + Mn$  10 ppm ในบล็อกตัวอย่างขนาด 200 x 60 x 45 mm ที่ความหนาแน่น 650 kg/m<sup>3</sup>

มีโลหะปนเปื้อนตามเกรดประมาณ 35 micrograms ในปริมาตรทั้งหมด สารเคลื่อนเฉพาะบนหน้าบนผาโลหะพาราแมกเนติกหลายร้อย micrograms--มากกว่าปริมาณปนเปื้อนที่ก่อนหน้านี้ได้รับอนุญาตให้มีหนึ่งลำดับขนาด--ไว้ในชั้นหนาเพียงไม่กี่ microns บนผิวที่สายเคเบิลวางอยู่ เกรดถูกกำหนดขึ้นเพื่อควบคุมพาราแมกเนติกในระดับส่วนในล้านส่วน; สารเคลื่อนทำลายเป้าหมายนั้นไม่ใช่เพียงไม่กี่ percent แต่หลายเท่าตัว

### 3. การทดลอง: ความไวแบบอ้างอิงจากผิวก่อนและหลังการเคลื่อน

เราเตรียมชิ้นทดสอบ 36 ชิ้น (60 x 60 x 8 mm) จากก่อนไม้สักศูนย์สูตรเกรด 5N ก่อนเดียว ซึ่ง ICP-MS ยืนยันว่ามี Fe + Mn 7 ppm เพื่อให้ชิ้นทดสอบทั้งหมดใช้วัสดุฐานเดียวกัน และความแตกต่างหลังเคลื่อนใด ๆ จึงมาจากสารเคลื่อนเพียงอย่างเดียว แบ่งชิ้นทดสอบเป็นกลุ่มละหกสำหรับกระบวนการหกแบบ ได้แก่ (A) ตัวควบคุมไม้ดิบไม่เคลื่อน; (B) น้ำมันตุงบริสุทธิ์ไร้สารเร่งแห้ง บ่ม 21 วัน; (C) น้ำมันลินสีดต้มกับโคบอลต์ออกไซด์ (Co 0.05 percent); (D) วาร์นิชสปาร์อัลคิดพร้อมชุด Co + Mn + Zr (Co 0.04 percent, Mn 0.06 percent, Zr 0.20 percent); (E) อะคริลิกดีสเปอร์ชันสูตรน้ำ (ไม่มีสารเร่งแห้งแบบออกซิเดชัน); และ (F) น้ำมันฮาร์ดแว็กซ์เชิงพาณิชย์ (ลินสีดและคาร์นูบา เร่งปฏิกิริยาด้วยโคบอลต์) กระบวนการที่ก่อฟิล์มทั้งหมดทดสอบด้วยควบคุมที่ 30 g/m<sup>2</sup> ต่อชั้น และบ่มจนแข็งพอสำหรับการหยิบจับ

เนื่องจากการปนเปื้อนเป็นชั้นผิว ขณะที่ชิ้นทดสอบเป็นวัตถุมวลรวม การวัดความไวของตัวอย่างทั้งชิ้นจะเจือจางสัญญาณไปในไม้โดยไม่กระทบแมกเนติกหนา 8 mm และทำให้รายงานต่ำกว่าจริง เราจึงรายงานความไวแบบอ้างอิงจากผิวสองวิธี

วิธีแรกคือความไวแม่เหล็กเชิงปริมาตรสุทธิของชิ้นทดสอบทั้งชิ้นด้วยแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (Lake Shore 8600, 300 K) ซึ่งจัดการเปลี่ยนแปลงรวม วิธีที่สองคือค่าของชั้นผิวซึ่งได้จากการวัดแผ่นบางหนา 200 micrometres ที่ตัดขนานกับหน้าจากผิวเคลื่อนด้วยไมโครโทมแล้วติดตั้งใหม่ วัดด้วย SQUID magnetometer (Quantum Design MPMS3) เพื่อให้ได้ความไวที่แผ่นบางต้องการ ค่าที่อ้างอิงจากผิวคือปริมาณสำคัญ เพราะเป็นไม้ส่วนที่สายเคเบิลสัมผัสจริง

ผลลัพธ์ปราศจากความกำกวม ตัวควบคุมไม้ดิบ (A) คงเส้นฐานโลหะแมกเนติก โดยทั้งชิ้นมี  $\chi_{\text{H}} = -5.9 \times 10^{-6}$  และแผ่นผิวมี  $-6.1 \times 10^{-6}$  กระบวนการไร้สารเร่งแห้ง (B น้ำมันตุงบริสุทธิ์; E อะคริลิก) ไม่แตกต่างทางสถิติจากตัวควบคุมในทั้งสองมาตราส่วน--หากไม่นับสภาพยอมทางไฟฟ้า กระบวนการเหล่านี้ไม่เพิ่มโลหะพาราแมกเนติกและไม่ทำให้เกรดเคลื่อน สารเคลื่อนที่บ่มด้วยออกซิเดชันและมีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามแบบ (C, D, F) ล้วนพลิกแผ่นผิวเป็นค่าบวกสุทธิ: ลินสีดต้มเป็น  $+2.3 \times 10^{-6}$  น้ำมันฮาร์ดแว็กซ์เป็น  $+1.9 \times 10^{-6}$  และวาร์นิชสปาร์ Co + Mn + Zr สูงสุดที่  $+4.8 \times 10^{-6}$  เมื่ออ้างอิงถึงชั้นผิวที่สายเคเบิลสัมผัส ชิ้นทดสอบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชิ้นข้ามจากโลหะแมกเนติกเป็นพาราแมกเนติกและถูกจัดใหม่จาก 5N เป็นต่ำกว่า 4N ค่า VSM ของชิ้นทดสอบทั้งชิ้นเคลื่อนไปทิศเดียวกันแต่ถูกกลบด้วยผลการเจือจางในมวลรวม--ซึ่งเป็นเหตุผลพอตัวสำหรับการวัดมวลรวมของแผ่นรองที่เคลื่อนแล้วจึงทำให้สารเคลื่อนดูดีเกินจริง ขณะที่การวัดอ้างอิงจากผิวตัดสินตรงกันข้าม

### 4. การทำโปรไฟล์ความลึก: โลหะอยู่ที่ใด

การเปลี่ยนแปลงความไวบอกเราว่ามีโลหะอยู่ แต่ไม่บอกว่ายู่ที่ใด สำหรับวัสดุรองรับ การกระจายตามความลึกไม่ใช่รายละเอียดประกอบ เพราะการคู่ควบกับสายเคเบิลลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะ และสิ่งปนเปื้อนที่ฝังลึก 2 mm มีความเกี่ยวข้องทางแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยกว่ามวลเท่ากันในช่วงไม่กี่ microns แรกมาก เราทำโปรไฟล์ชิ้นทดสอบที่เคลื่อนแล้วด้วยสเปกโทรเมตริกการเปล่งแสงแบบไกลวัดสสารความถี่วิทยุ (GD-OES, Horiba GD-Profilier 2) ซึ่งสเปกโตรมิเตอร์วัดด้วยอัตรา 2 ถึง 3 micrometres ต่อวินาที พร้อมติดตามการเปล่งแสงของ Co, Mn, Zr และ Fe และตรวจสอบไม้ชิ้นทดสอบที่เลือกด้วยการแบ่งความลึกโดย laser-ablation ICP-MS

ในชิ้นทดสอบที่บ่มด้วยออกซิเดชันทุกชิ้น โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจำกัดอยู่ในสารเคลื่อนและเนื้อไม้ที่อยู่ใต้ชั้นนั้นโดยตรง การเปล่งแสงของโคบอลต์และแมงกานีสสูงสุดที่ผิว คงอยู่ตลอดความหนาฟิล์ม 30 ถึง 70 micrometres แล้วลดลงมากกว่าหนึ่งลำดับขนาดในช่วง 20 ถึง 40 micrometres ถัดมาเมื่อโปรไฟล์เข้าสู่ไม้ที่ไม่ถูกแทรกซึม โดยถึงพื้นหลังวัสดุฐาน 7 ppm ที่ราว 100 micrometres ในกรณีเลวร้ายที่สุด (ลินสีดต้มความหนืดต่ำซึ่งซึมเข้าโพรงผิว) และที่ 60 micrometres สำหรับวาร์นิชที่หนืดกว่า เมื่อหาปริพันธ์ โลหะพาราแมกเนติกที่สะสมมากกว่า 90 percent อยู่ภายใน 100 micrometres บนสุด และส่วนใหญ่อยู่ภายใน 50 micrometres เซอร์โคเนียมมีโปรไฟล์ความลึกตามโคบอลต์และแมงกานีส แต่เนื่องจากแถบไม้เป็นพาราแมกเนติกในการประสานเช่นนี้ จึงมีมวลในโปรไฟล์โดยไม่มีส่วนในค่าความไว--เป็นการตรวจสอบภายในที่มีประโยชน์ว่าสัญญาณแม่เหล็กติดตาม Co และ Mn มิใช่โลหะรวม

นี่คือการกระจายที่เลวร้ายที่สุดในเชิงเรขาคณิตสำหรับแผ่นรองสายเคเบิล เกรดความเป็นกลางตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าไม้ซึ่งสัมผัสตัวนำเป็นโลหะแมกเนติก; สารเคลื่อนกลับด้านสมมติฐานนั้นด้วยการบรรจุโลหะพาราแมกเนติกลงในเปลือกผิว 50 ถึง 100 micrometres ที่ก่ออินเทอร์เฟซสัมผัสพอดี ขณะที่ปล่อยแกนหลักของบล็อกซึ่งไม่เกี่ยวข้องทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สะอาดเท่าเดิม ในเชิงแม่เหล็ก แผ่นรองที่เคลื่อนผิวคือแผ่นพาราแมกเนติกบางซึ่งห่อหุ้มไม้เป็นกลาง แล้วหันด้านโลหะเข้าหาสายเคเบิล

### 5. แนวโน้มสารเร่งแห้งไร้โคบอลต์ไม่ช่วยแก้ปัญหา

โคบอลต์ออกไซด์กำลังเผชิญแรงกดดันด้านกฎระเบียบ เหลือโคบอลต์ของกรด 2-ethylhexanoic ถูกจัดประเภทแบบสอดคล้องกันว่าเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ และอุตสาหกรรมสารเคลื่อนได้ลงทุนอย่างมากในสารเร่งแห้งไร้โคบอลต์ตลอดทศวรรษที่ผ่านมา สารทดแทนแบ่งเป็นสามตระกูล ได้แก่ สารเชิงซ้อนแมงกานีส (มักมีลิแกนด์ bipyridine หรือ aminomethyl ที่เพิ่มกิจกรรมของ Mn ให้เทียบเท่าโคบอลต์) สารเชิงซ้อนเหล็ก (เหล็กกับลิแกนด์ที่ให้ในโตรเจนเฉพาะทาง วางตลาดเป็นสารเร่งแห้งปฏิกิริยาสูงที่ใช้แทนได้ทันที) และระบบฐานวานาเดียม ทั้งสามกลุ่มได้รับการส่งเสริมว่าปลอดภัยกว่า และสำหรับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้--แทนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษด้วยชนิดไม่เป็นพิษโดยมีความเร็วแห้งเท่ากัน--หลายชนิดก็ทำสำเร็จจริง

สำหรับวัตถุประสงค์ของเรา สารเหล่านี้ไม่สำเร็จอะไรเลย แมงกานีส เหล็ก และวานาเดียมล้วนเป็นพาราแมกเนติก; เหล็กกับแมงกานีสคือธาตุสองชนิดที่เกรดความเป็นกลางกำหนดให้ต้องตัดออกโดยเฉพาะ การเปลี่ยนจากโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารเร่งแห้งเหล็กหรือแ



เมกานีสไม่ได้จัดโลหะพาราแมกเนติกจากฟิล์มผิว--เป็นเพียงการแทนโลหะพาราแมกเนติกชนิดหนึ่งด้วยอีกชนิดหนึ่ง และในกรณีเหล็กคือการแทนด้วยสิ่งปนเปื้อนที่ถูกลองโทษหนักที่สุดเพียงชนิดเดียวบนมาตราส่วนเกรด เราเคลือบชิ้นทดสอบไม้สักอีกชุดด้วยสารเร่งแห้ง iron-bipyridine เชิงพาณิชย์ตามปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ และวัดแผ่นผิวได้  $+3.1 \times 10^{-6}$  ซึ่งเทียบได้กับผลลิสต์เดิมโคบอลต์ และเพราะโลหะเป็นเหล็กแทนโคบอลต์ จึงอาจแย่งชิงกว่าสำหรับเกรดที่มีปริมาณเหล็กเป็นแกนหลัก สารเร่งแห้ง manganese-neodecanoate ให้ค่า  $+2.6 \times 10^{-6}$

บทเรียนคือแนวโน้มโคบอลต์ปรับเหมาะเป้าหมายทางพิษวิทยาซึ่งตั้งฉากกับเป้าหมายทางแม่เหล็ก ไม่มีเคมีสารเร่งแห้งแบบบ่มด้วยออกซิเดชันทั้งที่มีอยู่หรือคาดการณ์ได้ ซึ่งทำให้น้ำมันแห้งแข็งตัวโดยปราศจากโลหะแทนที่ที่ทำรีดอกซ์ และโลหะแทนที่ที่ทำรีดอกซ์ทุกชนิดซึ่งราคาถูกและมีมากพอจะใช้เป็นสารเร่งแห้งล้วนเป็นพาราแมกเนติก อุตสาหกรรมสารเคลือบจะไม่แก้ปัญหานี้ เพราะในมุมมองของอุตสาหกรรมไม่มีปัญหาให้แก่ สารเร่งแห้งที่เป็นกลางทางแม่เหล็กจะเป็นคำตอบที่ออกตามหาตลาดซึ่งในปัจจุบันประกอบด้วยเราเพียงรายเดียว

## 6. อภิปราย: ทางเลือกที่ยังเหลืออยู่

หากตัดสารเคลือบที่บ่มด้วยออกซิเดชันออกด้วยเหตุผลทางแม่เหล็ก สารเคลือบที่ปราศจากโลหะอย่างเป็นทางการยังเหลือสามประเภท ได้แก่ น้ำมันแห้งไร้สารเร่งแห้ง ฟิล์มสูตรน้ำที่แห้งทางกายภาพและรวมตัว และแล็กเกอร์ที่แห้งด้วยการระเหยอย่างแท้จริง น้ำมันตุงไร้สารเร่งแห้งของเรา (กระบวนการ B) และอะคริลิกดีสเพอร์ชัน (กระบวนการ E) ยืนยันว่าไม่เพิ่มโลหะพาราแมกเนติกและรักษาเกรดไว้ อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้เป็นสารเคลือบที่ไม่เหมาะสำหรับวัตถุประสงค์เหล่านี้ น้ำมันไร้สารเร่งแห้งบนแผ่นรองซึ่งต้องบ่มเต็มที่ก่อนรับสายเคเบิลใช้เวลาหลายสัปดาห์จึงแข็ง และยังคงนิ่มถาวรพอจะเก็บโลหะบนผิวจากคลิปลายเคเบิลและการหยิบจับทั่วไป--เปลี่ยนแผ่นรองให้เป็นตัวสะสมแบบพาสซีฟของสิ่งปนเปื้อนชนิดที่เกรดห้ามไว้พอ ดี อะคริลิกสูตรน้ำนั้นไม่ แต่เพิ่มสภาพยอมทางไฟฟ้าและแทนเจนต์การสูญเสียของผิวสูงกว่าไม้สักเปลือยมาก เป็นการแลกเปลี่ยนทางแม่เหล็กที่เกรดห้ามกับปัญหาไดอิเล็กทริกที่งานศึกษาผู้กลั่นกรองโทษเช่นกัน

กล่าวอีกอย่างคือ สารเคลือบทุกชนิดย่อมเพิ่มโลหะพาราแมกเนติก (น้ำมันและวาร์นิชที่บ่มด้วยออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกลุ่มดั้งเดิมทั้งหมด) ก็ทำให้ผิวไดอิเล็กทริกเสื่อม (ฟิล์มสูตรน้ำ) หรือบ่มได้ไม่แข็งพอจะต้านการปนเปื้อนชำระล้างใช้งาน (น้ำมันไร้สารเร่งแห้ง) ไม่มีชนิดใดปรับปรุงผิวที่ผ่านการจัดเกรด และทุกชนิดเป็นขั้นตอนที่ทำหลังจากไม้ผ่านการทดสอบทั้งหมดตามที่เกรดกำหนดแล้ว สารเคลือบทำได้เพียงหักออกจากเกรดที่ก่อนไม้ดิบมีอยู่แล้ว; ไม่มีสารเคลือบใดเพิ่มให้เกรดได้ เพราะปริมาณที่กำลังจัดเกรดคือการไม่มีบางสิ่ง และโดยนิยาม สารเคลือบคือการเพิ่มบางสิ่ง

กรอบคิดนี้เปลี่ยนแผ่นรองไม่เคลือบผิวจากการประหยัลดต้นทุนหรือความแรงขรุขระทางสุนทรียะ ให้เป็นทางเลือกเพียงทางเดียวที่สอดคล้องกับการวัดก่อนไม้ถูกคัดเลือก สแกน เจาะแกน ย่อย วิเคราะห์ และรับรองด้วยตัวเลขพาราแมกเนติกในระดับส่วนในล้านส่วน; การทาน้ำมันที่เร่งด้วยโคบอลต์ลงบนหน้าทำงานหลังจากนั้นจึงเท่ากับลงกุนในกระบวนการทั้งหมด แล้วลบล้างในขั้นสุดท้าย ณ ตำแหน่งที่ไวต่อแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด เพื่อแลกกับฟิล์มเพื่อรูปลักษณ์

## 7. ข้อเสนอ

การเคลือบผิวไม้ทำให้ไม้ปนเปื้อนเข้าทางแม่เหล็ก และเกิดขึ้นที่ผิว เพราะเคมีซึ่งทำให้สารเคลือบดั้งเดิมแข็งตัวคือออกซิเดชันที่เร่งด้วยโลหะ และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะแทนที่ชั้นพาราแมกเนติกที่สะสมในฟิล์ม เราวัดผลโดยตรง บนวัสดุฐานไม้สัก 5N ก่อนเดียว สารเคลือบที่บ่มด้วยออกซิเดชันทุกชนิด--ลิสต์เดิมโคบอลต์ วาร์นิชสปาร์  $\text{Co} + \text{Mn} + \text{Zr}$  และน้ำมันฮาร์ดแว็กซ์โคบอลต์--ผลึกความไวแม่เหล็กเชิงปริมาตรแบบอ้างอิงจากผิวจากเส้นฐานไดอะแมกเนติกใกล้เคียง  $-6 \times 10^{-6}$  เป็นค่าบวกสุทธิตั้งถึง  $+4.8 \times 10^{-6}$  ทำให้ผิวที่ผ่านการจัดเกรดถูกจัดใหม่จาก 5N เป็นต่ำกว่า 4N โดยโลหะพาราแมกเนติกที่สะสมมากกว่า 90 percent จำกัดอยู่ภายใน 100 micrometres บนสุดซึ่งสัมผัสสายเคเบิลโดยตรง น้ำมันไร้สารเร่งแห้งและฟิล์มสูตรน้ำไม่เพิ่มโลหะ แต่ไม่เหมาะกับวัตถุประสงค์ด้วยเหตุผลอื่น; แนวโน้มสารเร่งแห้งไร้โคบอลต์แทนที่ด้วยเหล็ก เมกานีส หรือวานาเดียม จึงจัดสารพิษโดยไม่ลดการปนเปื้อนพาราแมกเนติกแม้แต่นิ่งหน่วย

ข้อสรุปมีขอบเขตแคบและหนักแน่น สารเคลือบผิวเพียงชนิดเดียวที่รักษาเกรดความเป็นกลางของไม้ไว้ได้คือการไม่เคลือบเลย ผิวไม่เคลือบเกิดออกซิเดชันและเปลี่ยนเป็นสีเทาตามอายุ แต่พาทินานี้คือการออกซิไดซ์ธาตุของโครงสร้างคาร์บอนในไม้และไม่เพิ่มโลหะ; เป็นการเปลี่ยนแปลงทางรูปลักษณ์และไม่ใช้เหตุการณ์ทางแม่เหล็ก ดังนั้น Equatorial Elevation Blocks จึงจำหน่ายโดยไม่เคลือบผิว และจะยังคงเป็นเช่นนั้น--มีใช้เพราะละขั้นตอนเคลือบเพื่อประหยัดงาน แต่เพราะการเคลือบจะใช้เกรดทั้งหมดแลกกับความเงา

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Soucek, M. D., Khattab, T., Wu, J. (2012). การทนของออกซิเดชันและสารเร่งแห้ง. Progress in Organic Coatings, 73(4), 435-454.
- [2] Erich, S. J. F., Laven, J., Pel, L., Huinink, H. P., Kopinga, K. (2006). การกระจายตัวของสปีโลหะและการทำให้สารเคลือบอัลคีดแห้งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาด้วยการสร้างภาพ NMR. Progress in Organic Coatings, 55(2), 105-113.
- [3] Micciche, F., van Haveren, J., Oostveen, E., Ming, W., van der Linde, R. (2006). สารเคลือบฐานน้ำมันและการแทนสารเร่งแห้งโคบอลต์ด้วยสารเชิงซ้อนเมกานีสและเหล็ก. Applied Catalysis A: General, 297(2), 174-181.
- [4] van Gorkum, R., Bouwman, E. (2005). การแห้งด้วยออกซิเดชันของอัลคีดที่เร่งด้วยสารเชิงซ้อนโลหะ. Coordination Chemistry Reviews, 249(17-18), 1709-1728.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). การจัดเกรดความเป็นกลางทางแม่เหล็กของไม้โครงสร้าง: การจำแนกความบริสุทธิ์แบบ N-grade สำหรับวัสดุทองเหลือง. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Solder, L., Bosque, A. (2026). การทำโปรไฟล์ความลึกด้วยโวลต์มิเตอร์ของการปนเปื้อนพาราแมกเนติกแบบอ้างอิงจากผิวในชิ้นทดสอบไม้เนื้อแข็งที่เคลือบแล้ว. Journal of Equatorial Audio Science, 7(3), 88-104.