

The Developed Trends in Powder Coatings Technology

Sahar Abdollahi Baghban^{1,2*}, Rahy Rad¹

1. Research and Development Department, Polyresin Co. Postal Code 1586716714, Tehran, Iran

2. Department of Polymer and Color Engineering, Amirkabir University of Technology,
P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 20 February 2023, Accepted: 7 July 2023

ABSTRACT

Today, reducing the use of volatile organic compounds is one of the most important issues for environmental protection. Since the 1950s, powder coatings have been widely considered in the surface coating field, especially pipelines, households, and office appliances, due to their environmental friendliness and excellent performance. These types of coatings are solid and they are applied to the surface in the form of powder using different methods such as electrostatic or fluidized bed and then they are cured by heat. In this study, a brief history of the development of powder coatings is described, and it is continued by full report on the types of powder coatings, their production methods and processes, and the research process, emphasizing the type and characteristics of the resins used in this industry. Considering the importance of powder resins in the formulation of powder coatings, the performance of various thermoplastic and thermosetting resins used in these powder coating systems, including polypropylene, polyethylene, poly(vinyl chloride), fluoropolyethylene, nylon, epoxy, polyester, polyurethane, acrylic, cellulose acetate butyrate, and recycled resins are compared. In addition, the method of application and film formation in electrostatic coatings and the factors affecting them are investigated comprehensively. Furthermore, some of the challenges and problems of this giant industry will be introduced in order to improve its quality and curing methods for to expand the applications. Finally, new technical approaches, aiming to save energy and produce more biocompatible powdered products, using infrared curing technology, curing by ultraviolet radiation, or the ability to coat sensitive-temperature surfaces by powder coating are described.

Keywords:

powder coating,
thermoset and
thermoplastic resins,
electrostatic spray,
polyester,
epoxy

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: Saharabdollahi34@aut.ac.ir

Please cite this article using:

Abdollahi Baghban S., Rad R., The Developed Trends in Powder Coatings Technology, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 23-46, 2023.

روند توسعه در فناوری پوشش‌های پودری

سحر عبدالهی باغبان^{۱*}، رهی راد^۲

۱- تهران، شرکت پلی‌رزین، واحد تحقیق و توسعه، کد پستی ۱۵۸۶۷۱۶۷۱۴

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۶

چکیده

امروزه کاهش استفاده از ترکیبات آلی فرار یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح برای حفاظت از محیط‌زیست است. پوشش‌های پودری از دهه ۱۹۵۰ میلادی با توجه به دوستداری محیط‌زیست و عملکرد عالی، به‌طور گسترده در حوزه پوشش‌دهی سطوح فلزی، به‌ویژه خطوط لوله و لوازم خانگی و اداری استفاده شده‌اند. این نوع پوشش‌ها، نوعی پوشش جامد و بدون حلال هستند که به‌حالت پودر با روش‌های مختلف مانند الکتروستاتیک یا بستر سیالی روی سطح اعمال شده و سپس با گرما پخت می‌شوند. در این مطالعه، ابتدا تاریخچه روند توسعه پوشش‌های پودری شرح داده شده است. سپس، انواع پوشش‌های پودری، روش‌ها و فرایند تولید آن‌ها بیان شده و در ادامه روند پژوهشی در حال انجام در زمینه این نوع از پوشش‌ها با تاکید بر نوع و مشخصات رزین‌های مصرفی در این صنعت، گزارش شده است. همچنین با توجه به اهمیت رزین‌های پودری در فرمول‌بندی رنگ پودری، عملکرد انواع رزین‌های گرمانرم و گرماسخت استفاده‌شده در این سامانه‌های پوششی پودری از جمله پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی(وینیل کلرید)، فلوئوروپلی‌اتیلن، نایلون، اپوکسی، پلی‌استر، پلی‌یورتان، آکریلی، سلولوز استات بوتیرات و رزین‌های بازیافتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. افزون بر این، نحوه اعمال و تشکیل فیلم در پوشش‌های الکتروستاتیک و عوامل اثرگذار بر آن‌ها به‌طور کامل بررسی شده است. برخی از چالش‌ها و معضلات این صنعت بزرگ نیز در راستای افزایش کیفیت و بهبود روش‌های اعمال و پخت معرفی شده‌اند. در نهایت، رویکردهای فنی نوین، با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و زیست‌سازگاری بیشتر محصولات پودری، مانند استفاده از فناوری پخت زیرقرمز، سامانه‌های تابش‌پز با پرتو فرابنفش یا قابلیت پوشش‌دهی سطوح حساس به دما با استفاده از پوشش پودری، بیان شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

پوشش پودری،

رزین‌های گرمانرم و گرماسخت،

افشانش الکتروستاتیک،

پلی‌استر،

اپوکسی

*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

Saharabdollahi34@aut.ac.ir

فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۲۵
۱-۱ تاریخچه استفاده و توسعه پوشش‌های پودری.....	۲۵
۲-۱ معرفی پوشش‌های پودری.....	۲۵
۳-۱ انواع پوشش‌های پودری.....	۲۶
۲- فرایند تولید و پوشش‌دهی پوشش‌های پودری.....	۲۷
۳- سازوکار اعمال و تشکیل فیلم در پوشش‌های پودری الکتروستاتیک.....	۳۰
۴- روند پژوهش در پوشش‌های پودری.....	۳۱
۴-۱ مطالعات درباره رزین‌های مصرفی در پوشش‌های پودری.....	۳۱
۴-۱-۱ رزین‌های گرمانرم استفاده‌شده در پوشش‌های پودری.....	۳۲
۴-۱-۱-۱ پوشش‌های پودری پلی‌پروپیلنی.....	۳۲
۴-۱-۱-۲ پوشش‌های پودری پلی‌اتیلنی.....	۳۲
۴-۱-۱-۳ پوشش‌های پودری پلی‌وینیل‌کلریدی.....	۳۲
۴-۱-۱-۴ پوشش‌های پودری فلوئوروپلی‌اتیلنی.....	۳۲
۴-۱-۱-۵ پوشش‌های پودری نایلونی.....	۳۲
۴-۱-۲ رزین‌های گرماسخت استفاده‌شده در پوشش‌های پودری.....	۳۳
۴-۱-۲-۱ رزین اپوکسی.....	۳۳
۴-۱-۲-۲ رزین پلی‌استر.....	۳۳
۴-۱-۲-۳ رزین پلی‌یورتانی.....	۳۵
۴-۱-۲-۴ رزین آکریلی.....	۳۷
۴-۱-۲-۵ پوشش‌های پودری سلولوز استات بوتیرات.....	۳۷
۴-۱-۳ رزین‌های بازیافتی.....	۳۷
۴-۲ مقایسه رزین‌های مصرفی در پوشش‌های پودری.....	۳۸
۴-۳ پژوهش‌ها درباره رنگ‌دانه‌ها و پرکننده‌ها.....	۴۰
۵- رویکردهای فنی نوین برای افزایش خواص پوشش‌های پودری.....	۴۱
۶- نتیجه‌گیری.....	۴۲
۷- مراجع.....	۴۳

۱- مقدمه

۱-۱ تاریخچه استفاده و توسعه پوشش‌های پودری

فرایند تولید و اعمال پوشش‌های آلی اغلب به حجم زیادی از ترکیبات آلی فرار (VOCs) مانند هیدروکربن‌ها، کتون‌ها، الکل‌ها و استرها نیاز دارد. قوانین بهداشتی، ایمنی و زیست‌محیطی مرتبط با پوشش‌ها طی سال‌های ۱۹۵۰ میلادی در کشورهای توسعه‌یافته صنعتی، به کاهش استفاده از VOCs و ظهور پوشش‌هایی نظیر پودری، پرجامد، آب‌پایه و تابش‌پز منجر شده است [۱-۳]. در این میان، پوشش‌های پودری بسیار مورد توجه قرار گرفتند. پوشش پودری، پوششی ۱۰۰٪ جامد است که به‌حالت پودر خشک اعمال شده و سپس با گرما و ذوب‌شدن به فیلمی یکنواخت تبدیل می‌شود [۴-۶، ۱۲]. پوشش

پودری برای اولین بار در ۱۹۴۳ میلادی بر پایه پلیمرهای گرمانرم پلی‌(وینیل کلرید) (PVC) و سپس در ۱۹۵۰ میلادی بر پایه اپوکسی گرماسخت در ایالات متحده آمریکا معرفی شد. روش افشانش شعله‌ای دری به سوی پوشش‌های پودری گشود که موجب شد، پلی‌اتیلن پودری را بتوان روی سطحی فلزی با موفقیت پوشش داد. در ۱۹۵۲ میلادی شرکت Gemmer فناوری پوشش‌دهی بستر سیالی را عرضه کرد. در ۱۹۶۱ میلادی، موسسه‌ای آلمانی از اکسترودر برای تولید پیوسته خمیر پوشش پودری بهره برد که جهش عظیمی در راستای افزایش سرعت و حجم تولید پودر به‌ویژه پوشش پودری به‌شمار می‌آمد. روش افشانش الکتروستاتیکی با استفاده از تفنگ افشانه‌ای الکتروستاتیک را نخستین بار شرکت Shell انگلستان در ۱۹۶۲ میلادی ابداع کرد. تا پیش از این اختراع، پوشش‌های پودری فقط با روش غوطه‌وری بستر سیالی اعمال می‌شدند که روش گرانی بود. تخمین‌ها نشان می‌دهد، حجمی از پوشش‌های پودری در ۱۹۷۴ میلادی به ارزش ۳۵ میلیون دلار مصرف شدند و این حجم از تولید و مصرف تا ۱۹۷۹ میلادی تقریباً به‌مقدار ۱۳۰ تا ۱۵۰ میلیون دلار در هر سال افزایش یافت. گفتنی است، این حجم از تولید و مصرف تا به امروز بسیار بیشتر شده است و انتظار می‌رود، مصرف پوشش‌های پودری در سال‌های آینده رشد بزرگی را تجربه کند. بر اساس آمارهای جهانی، ارزش بازار پوشش پودری در جهان در سال ۲۰۲۱ حدود ۱۴/۲ میلیارد دلار بود و تخمین زده شد که این مقدار با رشد ۴/۲٪ در ۲۰۲۹ میلادی به ۱۹/۷ میلیارد دلار برسد [۴-۷].

۲-۱ معرفی پوشش‌های پودری

در سال‌های اخیر حجم استفاده از پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های مختلف افزایش یافته و الزامات مرتبط با آن‌ها نیز به‌تدریج بهبود یافته و تقویت شده است. پوشش‌های پودری طی سال‌های متمادی به‌دلیل برتری‌های بی‌شماری که دارند، کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. از مهم‌ترین کاربردهای این پوشش‌ها می‌توان به پوشش‌دهی خطوط لوله و ورقه‌های فلزی (قفسه‌ها و مبلمان‌های فلزی)، تولید قطعات الکتریکی، لوازم خانگی، صنایع خودرویی، ماشین‌آلات سنگین، کالاهای سیمی و معماری، پوشش اسباب‌بازی‌ها و کالسکه‌های کودک، قطعات تهویه و کلاف‌پوش‌ها اشاره کرد. به‌دلیل موفقیت تجاری و محبوبیت روزافزون پوشش‌های پودری، تقاضای زیادی برای کار پژوهشی و مطالعاتی به‌منظور بهبود خواص پوشش‌های پودری وجود دارد [۷-۱۱].

فرایند ساخت و کاربرد ساده، VOC کم، سازگاری با محیط زیست، مزایای اقتصادی و در دسترس بودن مواد اولیه به‌همراه

گرماسخت و گرمانرم تقسیم می‌شوند. هر یک از این پوشش‌ها مزایا و معایب ویژه‌ای دارند و در زمینه‌های مختلفی به‌کار گرفته می‌شوند. برخی از ضعف‌های سامانه‌های گرمانرم مانند مقاومت ضعیف در برابر حلال، چسبندگی ضعیف به سطوح فلزی، رنگ‌دانه و قابلیت پذیرش پراکنده کم، ضخامت حداقل $150 \mu\text{m}$ و دمای ذوب زیاد به توسعه سامانه‌های پوشش پودری گرماسخت منجر شده است [۱۶-۱۳].

پوشش پودری گرمانرم از رزین گرمانرم، رنگ‌دانه، پراکنده، نرم‌کننده و پایدارکننده تهیه می‌شود. پوشش‌های پودری گرماسخت دارای رزین گرماسخت، عامل پخت، رنگ‌دانه، پراکنده و مواد افزودنی هستند. افزودنی‌های پوشش‌های پودری به‌طور کلی شامل عوامل گاززدا، هم‌ترازکننده، افزودنی‌های کنترل بار، کاتالیزورها، پایدارکننده‌های UV و عوامل مات‌کننده هستند [۱۴-۷، ۹-۵]. تصویر برخی از رزین‌های پودری مصرفی در صنایع پوشش پودری از جمله رزین پلی‌استر کربوکسیل‌دار شده جامد ویژه سامانه‌های پخت‌شونده با تری‌گلیسیدیل ایزوسیانات (TGIC) و اپوکسی، پلی‌استر هیدروکسیل‌دار شده جامد پخت‌شونده با ایزوسیانات و رزین پودری اپوکسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

فرایند تشکیل فیلم با استفاده از پودرهای گرمانرم به‌طور فیزیکی با اعمال گرما انجام می‌شود و برگشت‌پذیر است، در حالی که فرایند تشکیل فیلم در سامانه‌های گرماسخت به‌صورت شیمیایی و با ایجاد ساختارهای شبکه‌ای انجام می‌شود. در پوشش‌های گرماسخت پودری معمولاً از رزین اپوکسی، رزین‌های پلی‌استر اسید پخت‌شده با پلی‌گلیسیدیل، رزین پلی‌استر کربوکسیل‌دار-اپوکسی، رزین پلی‌استر هیدروکسیل‌دار-ایزوسیانات (پلی‌یورتان‌ها) و رزین آکریلی با عوامل پخت مختلف استفاده می‌شود. پوشش‌های گرمانرم معمولاً بر پایه رزین‌های پلی‌اتیلن، پلی‌امید، پلی‌(وینیل کلرید) و پلی‌(وینیلیدن فلوئورید) تهیه می‌شوند. پلی‌(وینیل کلرید) مهم‌ترین رزین پودری برای تهیه پوشش پودری گرمانرم است و پس از آن پلی‌اتیلن و استات سلولوز بوتیرات قرار دارند. نایلون و پلی‌پروپیلن نیز به‌دلیل توسعه فرمول‌بندی‌های بدون آستر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۶].

سامانه‌های گرماسخت معمولاً با روش‌های افشانش الکتروستاتیکی اعمال می‌شوند، در حالی که پوشش‌های پودری گرمانرم معمولاً با روش غوطه‌وری بستر سیالی اعمال می‌شوند. گفتنی است، برای دستیابی به مقاومت مکانیکی و فیزیکی زیاد در پوشش‌های پودری گرمانرم، نیاز هست که این نوع از پوشش‌ها در ضخامت‌های بیشتری اعمال شوند که این موضوع با روش افشانش الکتروستاتیکی به‌دلیل کاهش مقدار جذب پودر روی سطح در اثر افزایش ضخامت، میسر نمی‌شود. برتری‌های پوشش‌های پودری گرماسخت نسبت به

خواص قابل قبول برای کاربردهای مختلف از جمله عواملی هستند که باعث شده است، کاربرد پوشش‌های پودری بیشتر شود. از سایر برتری‌های استفاده از پوشش‌های پودری می‌توان به امکان دستیابی به ضخامت‌های زیاد بدون شره و ریزش تنها با اعمال یک لایه، آماده‌سازی آسان و سریع سطح زیرآیند، نیاز به نیروی انسانی کم، نداشتن الزامات انبارداری سخت، کاهش نیاز به پاک‌سازی و کاهش خطرهای بهداشتی و خطرهای ناشی از آتش‌سوزی (به‌دلیل نبود حلال) اشاره کرد. همچنین، پوشش‌های پودری حمل، نگهداری و جابه‌جایی آسان‌تری نسبت به رنگ‌ها و رزین‌های حلال‌پایه دارند. به‌طور کلی، پوشش‌های پودری تک‌لایه استفاده می‌شوند. از این‌رو، مدت زمان لازم برای اعمال و پخت آن‌ها نسبت به پوشش‌های مایع بسیار کمتر است. در این نوع پوشش‌ها هزینه تجهیزات و مصرف انرژی نیز کمتر است و با توجه به امکان بازیافت پودرها، می‌توان به بازده ۹۵٪ تا ۹۸٪ دست یافت.

پوشش‌دهی در این نوع پوشش‌ها در داخل محفظه انجام می‌شود و فقط پودرهایی که در تماس مستقیم با بستر هستند، روی محصول باقی می‌مانند و بقیه تقریباً به‌طور کامل می‌توانند بازیابی و استفاده شوند. یکی دیگر از برتری‌های مهم پوشش‌های پودری، دستیابی به پوششی با ضخامت کم اما با مقاومت مکانیکی، جوی و خوردگی بسیار زیاد است. گفتنی است، پوشش‌های پودری برای قطعات کوچک و نیز قطعات بزرگ قابل اعمال و استفاده هستند [۱۲-۶].

شایان ذکر است، برای تولید و اعمال پوشش‌های پودری انرژی نسبتاً زیادی مصرف می‌شود، زیرا برای ذوب و پخت، باید گرمای نسبتاً زیادی به قطعات پوشش‌دهی‌شده اعمال شود. با وجود این، نسبت به پوشش‌های حلال‌پایه به انرژی کمتری نیاز است، زیرا انرژی لازم مربوط به تبخیر حلال، حذف شده است. پس از بررسی‌ها و ارزیابی‌های فراوان مشخص شد، پوشش‌های پودری نسبت به پوشش‌های آب‌پایه یا پرجامد، اقتصادی‌تر و نیز دوستدار محیط‌زیست هستند [۱۴-۱۲].

۳-۱ انواع پوشش‌های پودری

پیونده (binder) جامد (رزین پودری)، رنگ‌دانه‌ها و پراکنده‌ها از عمده‌ترین اجزای پوشش‌های پودری هستند. پودرهای حاصل با روش‌های مختلف روی سطح اعمال می‌شوند. پس از گرمادیدن، پیونده جامد شروع به ذوب شدن می‌کند، رنگ‌دانه‌ها و پراکنده‌ها را به هم می‌چسباند و پس از تشکیل فیلم به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی، پوشش دارای رنگ‌دانه را ایجاد می‌کند [۱۳-۷، ۱۰-۵].

پوشش‌های پودری با توجه به نوع رزین مصرفی به دو نوع



(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱- تصویر برخی از رزین‌های پودری استفاده‌شده در پوشش‌های پودری: (a) تری‌گلیسیدیل ایزوسیاناتورات (b) هیبریدی، (c) پلی‌یورتانی و (d) رزین پودری اپوکسی.

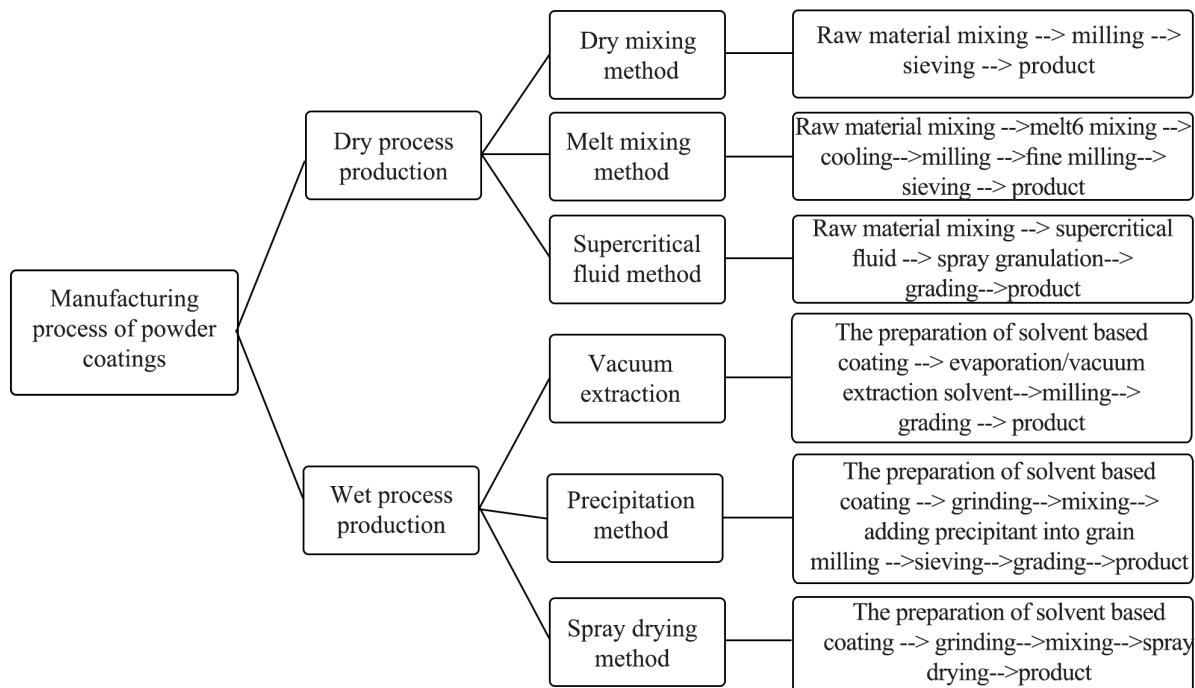
Fig. 1. The image of some powder resins used in powder coatings: (a) triglycidyl isocyanurate (TGIC), (b) hybrid, (c) polyurethane, (d) epoxy powder resin.

۲- فرایند تولید و پوشش‌دهی پوشش‌های پودری

فرایند تولید پوشش‌های پودری با تولید پوشش‌های مایع متفاوت است. پوشش‌های پودری سامانه پوششی بدون حلال هستند که در آن رنگ‌دانه‌ها و سایر اجزای فرایند تولید در رزین جامد با وزن مولکولی نسبتاً کم پخش می‌شوند. بدون توجه به نوع سامانه، دو روش اصلی فرایند تولید خشک و تر برای تولید پوشش‌های پودری وجود دارد که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند [۱۸-۲۰].

فرایند خشک شامل روش‌های اختلاط خشک، اختلاط مذاب و سیال ابربحرانی است. فرایند تر نیز شامل روش‌های استخراج در خلأ، رسوب‌دهی و خشک‌کردن افشانه‌ای است. هر یک از این روش‌ها، فرایندها و مراحل مختلفی دارند که همگی در نهایت به الک‌کردن و دانه‌بندی و تولید محصول ایده‌آل با اندازه مطلوب منجر می‌شود. از میان روش‌های تولید پودر برای پوشش پودری، روش اختلاط مذاب

سامانه‌های گرمانرم بررسی شده است. معمولاً سامانه‌های گرماسخت، مقاومت شیمیایی و حلالی بیشتر، انعطاف‌پذیری-سختی بهبودیافته‌تر و دمای پخت کمتری را نشان می‌دهند. یکی از تفاوت‌های مهم سامانه‌های پوششی پودری گرمانرم و گرماسخت در این است که گرانروی مذاب حین تشکیل فیلم در سامانه‌های گرماسخت، کمتر از سامانه‌ی گرمانرم است و همین موضوع موجب می‌شود که اعمال و پخت آن‌ها با ضخامت کمتر نیز ممکن باشد، زیرا در این حالت جریان‌پذیری بیشتر است و در نهایت سطحی صاف‌تر در ضخامت کمتر ایجاد می‌شود. در ضمن سامانه‌های گرماسخت، نسبت به پوشش‌های پودری گرمانرم مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند، زیرا به آستری نیاز ندارند [۱۷-۱۴]. از آنجا که در سامانه‌های گرماسخت به استفاده از رزین‌های با وزن مولکولی زیاد نیازی نیست، قابلیت ترشوندگی و ظرفیت این سامانه‌های پوشش پودری برای استفاده از پرکننده‌ها و رنگ‌دانه‌ها بسیار بیشتر از گرمانرم‌هاست [۱۸].



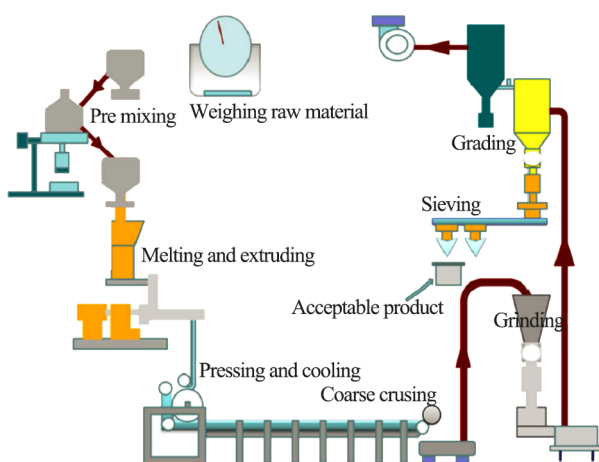
شکل ۲- انواع مختلف فرایند تولید پوشش‌های پودری.

Fig. 2. Different types of production process of powder coatings.

آب‌شویی سرد و آب‌شویی با آب بدون یون است [۲۰-۱۸]. پوشش پودری ممکن است، در فرایند بستر متحرک پودر سیال روی زیرآیندی از پیش‌گرم‌شده اعمال شود، به‌طوری که گرمای زیرآیند باعث ذوب‌شدن پودر، جاری‌شدن، جوش‌خوردن و پخت پوشش شود یا می‌توان پودر را به‌واسطه جذب الکتروستاتیک روی

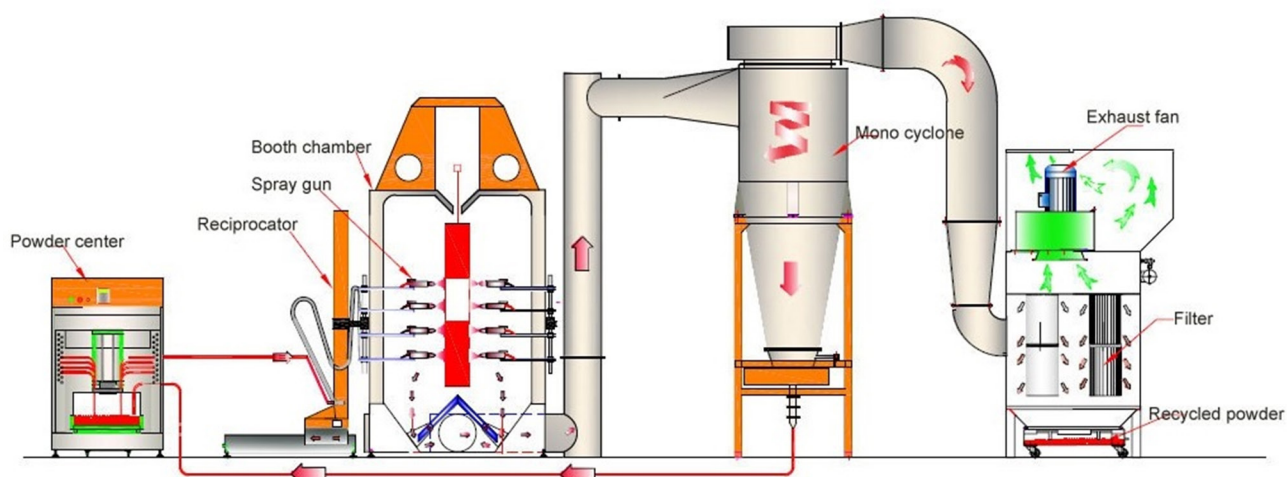
با اکستروژن رایج‌ترین روش است که به‌صورت طرح‌واره در شکل ۳ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۳، برای دستیابی به پودر مصرفی در پوشش‌های پودری، رزین، عوامل پخت، رنگ‌دانه، پرکننده و سایر مواد افزودنی وزن شده و در مخلوط‌کن دورانی با سرعت زیاد با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس تمام اجزای آن اکستروژن، خرد و الک می‌شوند. در واقع، تمام اجزا باید در دمایی کمتر از دمای پخت خود، اکستروژن شده و سپس به پودر تبدیل شوند. در ادامه، مواد روی کمر بند سرمایش سرد می‌شوند و با شیب ملایم و گاهی همراه با اعمال فشار شروع به سرد شدن می‌کنند. در نهایت، محصول خرد و پودر شده و پس از الک‌شدن بسته‌بندی می‌شود. اندازه ذرات پودر (دانه‌بندی) متناسب با کاربرد پوشش پودری تعیین می‌شود. اندازه متوسط ذرات حدود $5\text{ }\mu\text{m}$ تا $100\text{ }\mu\text{m}$ و ترجیحاً حدود $10\text{ }\mu\text{m}$ تا $50\text{ }\mu\text{m}$ است [۲۱-۱۶]. سامانه‌های اعمال رنگ پودری به‌طور معمول از بخش‌های شست‌وشو و آماده‌سازی، افشانش و رنگ‌آمیزی و پخت نهایی تشکیل شده‌اند. بهترین کیفیت پوشش‌دهی با رنگ پودری زمانی حاصل می‌شود که عملیات آماده‌سازی سطح به نحو صحیحی انجام شده باشد. تولیدکنندگان پوشش‌های پودری همگی بر این باورند که کارآمدترین روش آماده‌سازی برای دامنه گسترده از کاربردها، فرایندی پنج‌مرحله‌ای شامل شست‌وشو، آب‌شویی گرم، فسفات‌کاری،



شکل ۳- طرح‌واره تولید پودر مصرفی در پوشش‌های پودری با روش اختلاط مذاب [۲۱].

Fig. 3. Schematic diagram of powder production used in powder coatings by melt mixing method [21].



شکل ۴- نمودار اعمال و افشانش پودر در پوشش‌های پودری با روش الکتروستاتیک [۲۳].

Fig. 4. Diagram of application and spraying of powder in powder coatings by electrostatic method [23].

یکدیگر را دفع می‌کنند و به‌طور یکنواخت روی جسمی جذب می‌شوند که بار مخالف دارد. جاذبه الکتروستاتیکی میان ذرات پودر و جسم به پودر اجازه می‌دهد تا به سطح بچسبند و پوشش یکنواخت را تشکیل دهند [۲۲]. شکل ۶ نحوه انتقال ذرات پودری باردار از تفنگ افشانه‌ای به سمت صفحه فلزی باردار را تحت میدان الکتریکی نشان می‌دهد.

در روش پلاسما از تفنگ افشانه‌ای پلاسما استفاده می‌شود که این روش امکان اعمال پودرها روی انواع زیرآیندها از جمله زیرآیندهای فلزی و حتی غیررسانا مانند سطوح پلاستیکی، سرامیکی، شیشه‌ای، چوبی، کاغذی، سیمانی و سایر را فراهم می‌کند. رزین‌هایی که می‌توان آن‌ها را به‌صورت پوشش پودری با فناوری پودر پلاسما اعمال کرد، شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، نایلون، پلی‌استر، وینیلی‌ها، سلولوز استات بوتیرات و رزین‌های اپوکسی هستند. اساس فناوری پلاسما، یونش نیتروژن به‌عنوان گازی بی‌اثر و ارزان، بین مجموعه‌ای از الکترودهاست. سپس گاز یونیده از راه افشانک پاششی، جریان

زیرآیند سرد اعمال کرد و سپس گرما داد تا پودر ذوب شود، جریان یابد و پخت شود. بدین ترتیب، پوشش‌های پودری اغلب با روش‌های مختلفی مانند افشانش الکتروستاتیکی، غوطه‌وری بستر سیالی، بسترهای سیال الکتروستاتیکی یا روش پلاسما روی سطح اعمال می‌شوند. روش افشانش الکتروستاتیکی معمولاً برای پوشش‌های پودری گرماسخت و روش غوطه‌وری بستر سیالی برای پوشش‌های پودری گرمانرم به‌کار گرفته می‌شوند [۲۱-۱۸، ۱۳، ۶-۴]. به‌طور کلی، بازده انتقال پودر در فرایند پوشش پودری الکتروستاتیکی بیشتر از پوشش بستر سیالی است [۲۲]. نحوه اعمال و افشانش پوشش پودری با روش الکتروستاتیکی به‌صورت طرح‌واره در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین تصاویر واقعی از نحوه اعمال پوشش پودری روی سطوح فلزی با روش الکتروستاتیکی در شکل ۵ نشان داده شده است.

فرایند اعمال پوشش الکتروستاتیک با باردارسازی الکتروستاتیکی پودر شروع می‌شود. ذرات باردار در خروجی تفنگ افشانه‌ای،



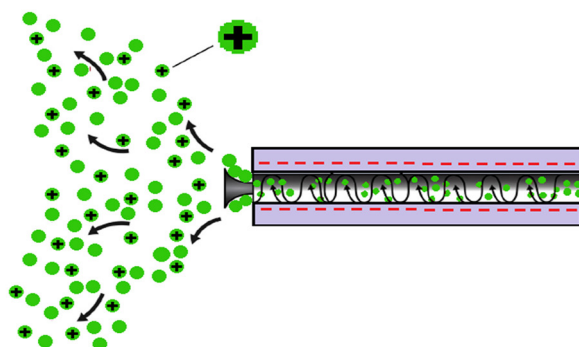
شکل ۵- نحوه اعمال پوشش پودری الکتروستاتیک [۲۳].

Fig. 5. Applying electrostatic powder coating [23].

هاله برای پوشش پودری الکتروستاتیک استفاده می‌شود [۲۶-۲۴، ۲۲]. در روش هاله ذرات را می‌توان با دو سازوکار در مجاورت یون‌های آزاد باردار کرد: (۱) بارداری میدانی و (۲) بارداری انتشار. وارد شدن یک ذره به میدان الکتریکی، میدان را تغییر می‌دهد و در نتیجه یون‌های آزاد به سمت ذره هدایت شده و به وسیله آن جذب می‌شوند. طرح‌واره تفنگ هاله‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است که این تفنگ ولتاژ زیادی را به الکترودها اعمال می‌کند تا تخلیه هاله و میدان الکتریکی ایجاد شود و سپس ذرات در میدان الکتریکی انحراف پیدا کرده و یون آزاد جذب کنند [۲۲].

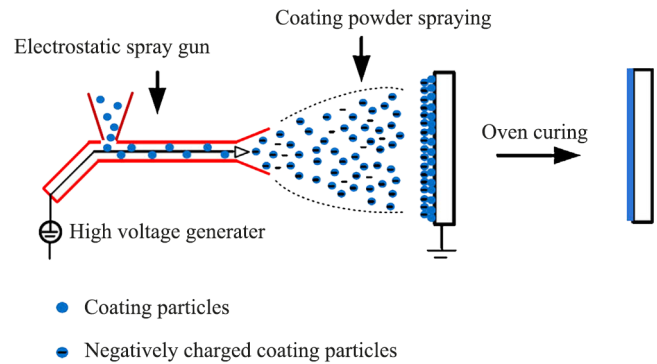
قابلیت باردار کردن و تخلیه بار الکتریکی پودرهای پلیمری برای اعمال به روش افشانش الکتروستاتیک بسیار مهم است. به عبارتی ویژگی پذیرش و نگهداری بار الکتریکی ماده پودری عامل کلیدی برای تغییر رفتار آن در تجهیزات افشانش الکتروستاتیک خواهد بود. این ویژگی‌ها را می‌توان با روش‌های اصلاح مناسب مواد پودری بهبود بخشید تا خواص الکتریکی سطح آن را نیز تغییر داد که این خواص تحت کنترل مواد افزودنی استفاده‌شده در پلیمر است. بر این اساس، استفاده از افزودنی‌هایی که بهترین خواص الکتریکی را به ذره می‌دهند، بسیار مهم است [۲۹-۲۴].

زوال بار الکتروستاتیک پودرهای باردار در اثر دما و رطوبت نسبی با استفاده از پودرهای آکریلی، اپوکسی، پلی‌استری و وینیلی مطالعه و مشخص شد، روند زوال بار به دو صورت سریع و آهسته وجود دارد. نتایج نشان داد، تغییرات فصلی در دما و رطوبت نسبی اثر شایان توجهی بر لایه‌نشانی ذرات نخواهد داشت. مقام دوم جایزه



شکل ۷- طرح‌واره تفنگ با الکتریسته مالشی (ایجاد الکتریسته در اثر اصطکاک) برای آسانی برخورد ذرات به دیوار تفنگ و ایجاد بار الکتریکی حداکثری.

Fig. 7. Schematic of the triboelectric gun to facilitate the collision of particles on the wall of the gun to induce the maximum electric charge.



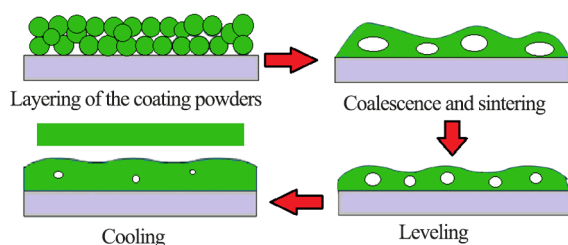
شکل ۶- نحوه انتقال ذرات پودری باردار از تفنگ افشانه‌ای به سمت صفحه فلزی باردار تحت میدان الکتریکی [۱۹].

Fig. 6. Transfer of charged powder particles from the spray gun to the charged metal plate under an electric field [19].

می‌باید که از درون آن با سرعت زیاد و دمای نسبتاً زیاد خارج می‌شود. Nagasaka در سال ۱۹۷۴ میلادی روش افشانش شعله‌ای پوشش پودری را توصیف کرد [۲۲، ۲۱، ۸-۶].

۳- سازوکار اعمال و تشکیل فیلم در پوشش‌های پودری الکتروستاتیک

در روش افشانش الکتروستاتیک، پودرها معمولاً با تفنگ افشانه‌ای به روش هاله‌ای (corona) یا مالشی (tribo) باردار می‌شوند. هنگام بارداری هاله‌ای، ذرات پودر از منطقه غنی از یون عبور می‌کنند و بر اساس ضریب گذردهی (permittivity) خود، باردار می‌شوند. بارداری مالشی بر پایه بار اصطکاکی پودر است که در این حالت ذرات پودر از درون لوله‌ای از جنس ماده‌ای ویژه مانند پلی‌(تترافلورواتیلن) (PTFE) یا فلز منتقل شده و باردار می‌شوند یا در اثر اصطکاک میان ذرات، الکترون‌ها از سطحی جدا شده و به سطح دیگر منتقل می‌شوند و روی سطح ذرات بار ایجاد می‌شود [۲۲]. طرح‌واره تفنگ با الکتریسته مالشی (ایجاد الکتریسته در اثر اصطکاک) و دیواره‌ای از جنس PTFE که برای آسانی برخورد ذرات به دیوار تفنگ و ذرات با یکدیگر به منظور ایجاد بار الکتریکی حداکثری طراحی شده، در شکل ۷ نشان داده شده است. ایجاد بار الکتریکی با روش مالشی تحت تاثیر پارامترهایی نظیر شرایط محیطی (رطوبت نسبی و دما)، تعدد برخوردها، مدت زمان تماس، خواص الکتریکی ذرات و زبری سطح آن‌هاست [۲۴]. هرچه قدر بار ذرات پودر بیشتر شود، بهتر پخش می‌شوند و بازده انتقال بیشتری دارند. از آنجا که در روش اصطکاکی بار کمتری روی ذرات پودری ایجاد می‌شود، معمولاً از روش



شکل ۹- سازوکار تشکیل فیلم در پوشش‌های پودری.

Fig. 9. Mechanism of film formation in powder coatings.

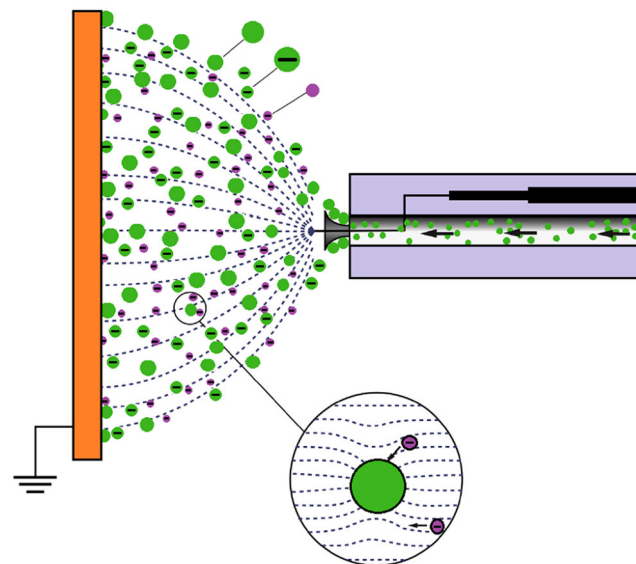
داخل فیلم کمتر می‌شود و ضخامت کاهش می‌یابد. بدین ترتیب قطعه پوشش‌یافته در داخل کوره قرار می‌گیرد و گرم می‌شود تا اجزای پوشش ذوب و شبکه‌ای شوند و فیلمی پیوسته با وزن مولکولی بیشتر با هدف تزئینی یا حفاظت در برابر خوردگی روی سطح فلز را تشکیل دهند [۱۲، ۲۲]. دما و رطوبت ذرات و شکل بدنه قطعه غوطه‌ور شده در یکنواختی و ضخامت لایه نهایی مؤثرند. یکی از موارد بسیار مهم در کیفیت سطح پوشش پودری، خروج تمام حباب‌ها و هوا از زیر پوشش است. از آنجا که گرما از بیرون به پوشش اعمال می‌شود، سطح رنگ زودتر ذوب و پخت می‌شود که این موضوع خروج هوا را دشوار می‌کند. بر این اساس، حباب هوا گاهی در پوشش باقی می‌ماند. نکته حائز اهمیت دیگر شکل‌شناسی و اندازه پودرهاست. سرعت تشکیل فیلم در پوشش‌های پودری به شدت تحت تاثیر اندازه و شکل‌شناسی ذرات پودر است، به طوری که استفاده از اندازه ذرات کوچک‌تر به سرعت بیشتر منجر می‌شود. در این نوع از پوشش‌ها ضخامت پوشش نهایی ترجیحاً حدود ۲ mil تا ۵ mil است و نیاز است که ترجیحاً به مدت ۵ min تا ۲۰ min پخت شوند [۲۲، ۲۵-۲۷، ۳۲].

۴- روند پژوهش در پوشش‌های پودری

از دهه ۱۹۵۰ میلادی تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای رفع برخی از مشکلات پوشش‌های پودری، در حوزه فرمول‌بندی یا فرایند تولید و اعمال، انجام شده است. در ادامه، برخی از مطالعات انجام‌شده درباره رزین‌ها، رنگ‌دانه‌ها و پرکننده‌های مصرفی در پوشش‌های پودری بیان شده‌اند.

۴-۱ مطالعات درباره رزین‌های مصرفی در پوشش‌های پودری

همان‌طور که بیان شد، پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های گرماترم و به‌طور عمده گرماسخت هستند. به‌طور کلی، رزین پودری مصرفی در پوشش پودری باید بدون استفاده از لایه آستری، چسبندگی مناسبی را در سطح فلز ایجاد کند. باید گرانروی مذاب کمی نیز



شکل ۸- طرح‌واره تغنگ هاله‌ای و انحراف ذره در میدان الکتریکی و جذب یون آزاد.

Fig. 8. Schematic of corona gun and particle deflection in electric field and free ion absorption.

Roos در اجلاس سالانه فدراسیون انجمن‌های فناوری پوشش‌ها در ۱۹۴۷ میلادی، به Hardy به دلیل مطالعه او درباره ضخامت پوشش بحرانی در پوشش‌های پودری الکترواستاتیک تعلق گرفت. در این مطالعه، ضخامت پوشش بحرانی زمانی به دست آمد که پتانسیل سطح ناشی از لایه‌نشانی پودر باردار، دقیقاً برابر با مقاومت دی الکتریک لایه ایجاد شده شود. پس از این نقطه، ذرات پودر افشانه‌شده به محض فرود تخلیه می‌شوند و نمی‌توانند به افزایش ضخامت لایه کمک کنند. Hardy نحوه محاسبه ضخامت بحرانی فیلم را نیز بیان کرد. همچنین مشخص شد، قدرت دی الکتریک یک لایه از پودر معمولی برابر با ولتاژ شکست در یک شکاف هوایی کوچک بوده که عرض آن با ضخامت لایه برابر است. ضخامت بحرانی با افزایش قطر ذرات، افزایش و کاهش چگالی، ثابت دی الکتریک و بار ذرات پودر، افزایش می‌یابد. چسبندگی پوشش پودری الکترواستاتیک نیز تحت تاثیر همین عوامل است، اگرچه در بیشتر موارد چسبندگی در اکثر مواقع کافی خواهد بود [۲۲، ۲۴، ۲۶-۳۱].

پس از جذب ذرات باردار روی سطح زیرآیند با بار مخالف، برای تشکیل سطحی صاف، ذرات پودر باید در محدوده دمایی خاص ذوب شوند تا جریان به‌موقع و کافی مواد پلیمری پیش از اتصال عرضی فراهم شود. تشکیل فیلم و ایجاد لایه‌ای صاف در پوشش‌های پودری مطابق شکل ۹ با به‌هم‌پیوستگی ذرات پودر و هم‌ترازی این ذرات انجام می‌شود. با به‌هم‌پیوستگی هرچه بیشتر ذرات، فضاهای آزاد در

با وزن مولکولی زیاد و روش بستر سیالی می‌توان به پوشش‌های پودری پلی‌پروپیلنی ضخیم خودآستری‌شونده (self-priming) دست یافت [۴،۳۵،۳۶].

۴-۱-۱-۲ پوشش‌های پودری پلی‌اتیلنی

پوشش‌های پودری پلی‌اتیلنی (PE) مقاومت به خوردگی، خاصیت عایق الکتریکی و مقاومت به پرتو فرابنفش عالی دارند [۲۱].

۴-۱-۱-۳ پوشش‌های پودری پلی‌وینیل کلریدی

پوشش پودری پلی‌وینیل کلریدی (PVC) دارای مقاومت حلالی عالی، مقاومت به خوردگی مناسب و نیز مقاومت ضربه‌ای و افشانش مه نمکی خوب است. به‌طور عمده از رزین‌های PVC حاصل از فرایند پلیمرشدن توده‌ای یا تعلیقی در پوشش‌های پودری استفاده می‌شود، زیرا طی این فرایندها رزین‌های متخلخلی ایجاد می‌شوند که قابلیت جذب مقدار زیادی نرم‌کننده‌ها را دارند. پوشش‌های پودری PVC روی کابل‌های سیمی، مبلمان، تجهیزات شیمیایی، لوله‌های زیرزمینی، صفحه‌های فلزی ساختمان و سخت‌افزار استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها معمولاً به آستری‌هایی بر پایه رزین فنولی اصلاح‌شده نیاز دارند [۲۱،۳۵].

۴-۱-۱-۴ پوشش‌های پودری فلوئوروپلی‌اتیلنی

پوشش‌های پودری فلوئوروپلیمری مانند پوشش‌های پودری پلی‌وینیلیدن فلوئورید) برای محافظت از سطوح فلزی مانند آلومینیم بسیار کارآمد هستند. پوشش پودری بر پایه کوپلیمر پلی‌اتیلن تترافلوئورواتیلن دارای استحکام مکانیکی، چقرمگی و مقاومت شیمیایی و الکتریکی زیادی است و به هر دو شکل بستر سیالی و افشانش الکتروستاتیکی اعمال می‌شود. پلی‌تری‌فلوئورو وینیل کلرید) نیز مقاومت به خوردگی زیاد و مقاومت مناسبی در برابر هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید رقیق و هیدروژن کلرید دارد. کاربردهای پیشنهادی این نوع پوشش شامل پوشش‌های محافظ در محیط‌های شیمیایی خورنده، پوشش ظروف حمل‌ونقل، مخازن ذخیره‌سازی، شیرها، لوله‌ها و واکنشگاه‌هاست [۳۶،۳۷].

۴-۱-۱-۵ پوشش‌های پودری نایلونی

پوشش‌های پودری پلی‌آمیدی استحکام مکانیکی زیاد، مقاومت ضربه‌ای و سختی زیادی دارند. استفاده از پوشش‌های نایلونی یکی از بهترین روش‌ها برای کاهش رسانندگی سطوح و ایجاد استحکام مکانیکی زیاد است. کاربرد جالب دیگر آن ایجاد پوشش الکتروستاتیکی روی

در سرعت‌های برش کم داشته باشد. به‌عبارت دیگر، رزین‌های با گران‌روی مذاب کمتر مطلوب هستند، زیرا جریان‌پذیری بیشتری دارند و اجزا بهتر با هم ترکیب شده و به ظاهری صاف‌تر و یکنواخت‌تر منجر می‌شوند. معمولاً جرم مولکولی رزین‌های گران‌مرد حدود $15000-20000$ g/mol و در رزین‌های گرماسخت حدود $4000-2000$ g/mol است [۴،۱۰-۱۳،۲۲،۲۵-۲۹]. رابطه میان گران‌روی مذاب رزین‌های پوشش پودری با براقیت و صافی سطح توسط انجمن Houston مطالعه شده است [۳۳].

همچنین این رزین نباید در معرض رطوبت قرار گیرد و باید حداقل به مدت ۶ ماه قابلیت انبارداری عالی داشته باشد، به‌طوری که با داشتن دمای گذار شیشه‌ای (T_g) بیش از 50°C کلوخه‌ای نشوند. به‌عبارت دیگر، T_g حاصل از این رزین‌ها باید از دمای محیط نگهداری آن‌ها بیشتر باشد. هنگامی که دمای محیط به T_g رزین می‌رسد یا از آن فراتر می‌رود، به جریان سرد رزین‌های بی‌شکل منجر شده که سبب تجمع ذرات ریز می‌شود و پودر را برای کاربرد نامناسب می‌کند. بنابراین، T_g و گران‌روی مذاب، ملاحظات مهمی برای رزین‌های پوشش پودری هستند. همچنین، می‌توان با افزودن گروه‌های عاملی قطبی روی زنجیر رزین‌های گرماسخت بر قابلیت چسبندگی به زیرآیند آن‌ها در مقایسه با سامانه‌های گران‌مرد افزود [۴،۱۰-۱۳،۳۴].

۴-۱-۱-۱ رزین‌های گران‌مرد استفاده‌شده در پوشش‌های پودری

عمده‌ترین رزین‌های گران‌مرد استفاده‌شده در پوشش پودری، رزین‌های وینیلی و پلی‌آمیدها هستند. به‌طور کلی، پوشش‌های پودری وینیلی دارای پایداری جوی، مقاومت به خوردگی و سایش عالی، مقاومت دی‌الکتریک زیاد و مقاومت شیمیایی زیاد در برابر اسیدها و قلیاها هستند [۳۵،۳۶].

۴-۱-۱-۲ پوشش‌های پودری پلی‌پروپیلنی

کاربرد پوشش‌های پودری پلی‌پروپیلنی (PP) با توسعه آستری‌های مناسب برای بهبود چسبندگی، افزایش چشمگیری یافته است. چگالی کم، دمای ذوب زیاد، استحکام کششی، مقاومت شیمیایی و سایشی زیاد و خواص دی‌الکتریک عالی از جمله برتری‌های پلی‌پروپیلن به‌عنوان پوشش پودری است. این در حالی است که مقاومت به پرتو فرابنفش این نوع پوشش ضعیف و براقیت آن متوسط است. این نوع از پوشش‌ها به‌صورت پوشش دارای رنگ‌دانه و نیز شفاف‌پوش موجود هستند و الزامات FDA و USDA را برآورده می‌کنند. پودرهای پلی‌پروپیلن می‌توانند با هر دو روش افشانش الکتروستاتیکی یا بستر سیالی اعمال شوند. مطالعات نشان داده‌اند، با استفاده از پلی‌پروپیلن

در برخی از کاربردهای ویژه حدود $1000-5500 \text{ g/eq}$ است. بدین ترتیب گرانروی مذاب رزین اپوکسی مصرفی در پوشش مایع خیلی کمتر از گرانروی مذاب رزین اپوکسی استفاده‌شده در پوشش پودری است. گفتنی است، در پوشش‌های مایع به‌طور عمده از رزین اپوکسی با ساختار بیس فنول A استفاده می‌شود، در حالی که رزین اپوکسی استفاده‌شده در پوشش پودری، به‌طور کلی مخلوطی از ساختارهای بیس فنول A و F هستند. عوامل سخت‌کننده رزین‌های اپوکسی برای فرمول‌بندی پوشش پودری می‌تواند شامل دی‌سیانیدها، دی‌آمین‌های آروماتیک و ترکیبات حاصل از واکنش آن‌ها با مونوگلیسیدیل اترها، هیدرازیدها، انیدرید اسیدها به‌ویژه تری‌ملیتیک انیدرید و کمپلکس‌های بور تری‌فلوئورید-آمین باشند. پوشش‌های پودری اپوکسی-فنولی به‌دلیل مقاومت زیاد در برابر محیط‌های شیمیایی تهاجمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرگروه‌های پوشش‌های پودری اپوکسی و گرماسخت نسل سوم معرفی شده‌اند که برای پوشش‌دهی خطوط لوله از آن‌ها استفاده می‌شود و امروزه جای آبکاری را گرفته‌اند. پخت رزین‌های اپوکسی با تری‌ملیتیک انیدرید به‌منظور تولید پوشش‌های پودری مقرون‌به‌صرفه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دمای پخت این سامانه‌ها در 5 min از 175°C تا 225°C متغیر است [۴۶-۴۴].

Vasil'ev و همکاران [۴۷] به‌منظور بهبود خواص آب‌گریزی پوشش‌های پودری، مجموعه‌ای از اولیگومرهای اپوکسی جدید را طی مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی با قطعات پرفلوئورینه C_8F_{17} تهیه کردند. نتایج نشان داد، محصولات به‌دست‌آمده به‌عنوان اصلاح‌کننده در ترکیب با پودر اپوکسی برای تولید پوشش‌های پودری آب‌گریز قابل استفاده هستند. Jia و همکاران [۴۴] پیش‌پلیمرهای پلی‌(بوتادی-ان-co-آکریلونیتریل) با انتهای کربوکسیل (CTBN)-رزین اپوکسی را با مقدارهای مختلف CTBN برای پوشش‌های اپوکسی اتصال ذوبی (FBE) مطالعه کردند. نتایج نشان داد، پیش‌پلیمرهای حاصل چقرمگی، انعطاف‌پذیری و مقاومت ضربه‌ای پوشش‌ها را بدون تضعیف کردن سایر خواص کلیدی مانند حفاظت از خوردگی، به‌طور چشمگیری افزایش دادند.

۴-۲-۱-۲ رزین پلی‌استر

پوشش‌های پودری بر پایه پلی‌استر برای اولین بار در ۱۹۶۹ میلادی به بازار عرضه شد که پخت آن‌ها در کوره‌ای با دمای 300°C به مدت 20 min انجام می‌شد. اولین پوشش‌های پودری پلی‌استری با پخت سریع در ۱۹۷۴ میلادی به بازار عرضه شد و از ۱۹۷۶ میلادی مصرف آن‌ها گسترش یافت. در ۱۹۸۳ میلادی اولین پوشش پودری پلی‌استری عاری از تری‌ملیتیک انیدرید به بازار عرضه شد [۱۷،۲۱].

ظروف پلی‌اولفینی است که در ساخت کامپوزیت‌های پلاستیکی برای مخازن بنزین خودرو، وان ماشین لباس‌شویی و مخازن ذخیره‌سازی کوچک استفاده می‌شوند. پوشش‌های نایلونی را می‌توان با بخار سترون کرده و با آن سطح صاف گرم را ایجاد کرد. این پوشش‌ها دارای تأییدیه سازمان غذا و دارو (FDA) هستند و محلی برای رشد باکتری‌ها نخواهند بود.

پوشش‌های پودری بر پایه نایلون، جایگاه خاصی را در اروپا کسب کرده‌اند. به‌عنوان مثال، نایلون ۱۱ تنها بخش کوچکی از کل بازار پوشش پودری در اروپا را به خود اختصاص داده اما تولید آن در حال افزایش است. ۴۰٪ پوشش پودری نایلون ۱۱ در تهیه لوازم الکتریکی، ۲۷/۵٪ برای پوشش مبلمان، ۱۰/۵٪ در ساختمان، ۶٪ در صنایع خودرویی و حمل‌ونقل، ۵٪ در صنعت قطعات مکانیکی، ۴٪ برای چاپ، ۶/۵٪ برای تجهیزات غذایی و مابقی برای مصارف متفرقه استفاده می‌شود [۱۷،۲۱].

۴-۱-۲ رزین‌های گرماسخت استفاده‌شده در پوشش‌های پودری

حین تشکیل فیلم پودری حاصل از رزین‌های گرماسخت، واکنش‌های پخت متفاوتی متناسب با نوع رزین مانند واکنش اسید-اپوکسی، انیدرید اسید-اپوکسی، اپوکسی-آمین، پلی‌فنول-اپوکسی، پلی‌اتری‌شدن، ایزوسیانات-هیدروکسیل، رزین آمینو، استری‌شدن، متقاطع‌کاتالیزشده با هسته‌دوست اپوکسی و پخت پرتویی ممکن است، رخ دهد. شرح کامل شیمی و سازوکار واکنش‌ها خارج از بحث این مقاله است و می‌توان آن‌ها را در مقالات مرتبط دنبال کرد [۴۳-۳۸].

۴-۱-۲-۱ رزین اپوکسی

پوشش‌های پودری بر پایه رزین اپوکسی دارای سرعت پخت زیاد (از 5 min تا 15 min در دمای 450°F تا 400°F)، مقاومت ضربه‌ای عالی، مقاومت شیمیایی و حلالی بسیار زیاد، مقاومت به خوردگی عالی، سختی مناسب و انعطاف‌پذیری خوبی هستند. از این رزین‌ها می‌توان در پوشش‌دهی خطوط لوله، مخازن گاز، مخازن ذخیره مواد شیمیایی، ابزارهای برقی، باتری و تجهیزات کشاورزی استفاده کرد. در پوشش‌های پودری بر پایه رزین اپوکسی، دمای ذوب رزین باید بین $100-65^\circ\text{C}$ و اندازه ذرات بین $30 \mu\text{m}$ تا $80 \mu\text{m}$ باشد.

مهم‌ترین تفاوت میان رزین اپوکسی مصرفی در پوشش‌های مایع و پودری، اختلاف آن‌ها در جرم مولکولی و به‌عبارت دیگر وزن هم‌ارز اپوکسی (EEW) است، به‌طوری که EEW در رزین‌های اپوکسی مصرفی در پوشش‌های مایع حدود $350-100 \text{ g/eq}$ ، در رزین‌های اپوکسی استفاده‌شده در پوشش‌های پودری حدود $1000-400 \text{ g/eq}$ و

رزین‌های پلی‌استر جامد اشباع مختلف اعم از هیدروکسیل‌دار یا کربوکسیل‌دار می‌توانند در سامانه‌های پلی‌استر-ایزوسیانات (پلی‌یورتانی)، پلی‌استر-اپوکسی (هیبریدی) و پلی‌استر-تری‌گلیسیدیل ایزوسیاناترات (TGIC) و نیز پلی‌استر-β-هیدروکسی آلکیل آمیدها (HAA) به کار گرفته شوند. به عنوان مثال، رزین‌های پلی‌استر کربوکسیل‌دار می‌توانند با رزین‌های اپوکسی به عنوان عوامل پخت با نسبت وزنی جزء رزین پلی‌استر به رزین اپوکسی بین ۲۰:۸۰ تا ۸۰:۲۰ مخلوط شده تا پوشش‌های پودری هیبرید تشکیل شوند. نسبت وزن ترجیحی جزء رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر به ساختار رزین‌ها و وزن معادل آن‌ها در هر گروه عاملی بستگی دارد. ترجیحاً نسبت وزنی جزء رزین پلی‌استر به رزین اپوکسی بین ۵۰/۵۰ تا ۳۰/۷۰ است. رزین‌های پلی‌استر اشباع پودری هیدروکسیل‌دار می‌توانند با ایزوسیانات‌های مسدودشده با کاپرولاکتام‌ها نیز مخلوط شوند و پوشش پودری پلی‌یورتانی گرماسختی را ایجاد کنند. پلی‌استرها می‌توانند در پوشش‌های پودری با رزین‌های ملامین فرمالدهید و با متوکسی‌متیل ایزوسیانات شبکه‌ای شوند. بسته به مقدار واکنش‌پذیری اجزای واکنش‌دهنده، شبکه‌ای شدن بازگشت‌ناپذیر در دماهای بین ۱۲۰-۲۳۰°C رخ می‌دهد. برای سامانه‌های بسیار واکنش‌پذیرتر، شبکه‌ای شدن ممکن است، سریع‌تر نیز انجام شود تا حدی که حتی ذوب شدن و شبکه‌ای شدن اجزا با یکدیگر هم‌پوشانی پیدا کنند [۶-۹، ۱۶، ۱۷، ۴۸-۵۰]. برای بهبود واکنش میان اجزا، فرمول‌بندی پوشش‌های پودری ترجیحاً دارای یک کاتالیزگر است. به عنوان مثال، در سامانه هیبرید از کاتالیزگرهای پخت مانند آمین‌ها و نمک‌های آمونیوم، فسفین‌ها و نمک‌های فسفونیوم و ایمیدازول‌ها مانند متیل ۱-ایمیدازول استفاده می‌شود [۶-۹، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۳۱].

پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های پلی‌استر، انعطاف‌پذیری و مقاومت ضربه‌ای خوب (مقاوم به ضربه معکوس بیش از ۸۰ پوند) و مقاومت جوی مطلوب، ظاهر عالی، خواص دفع آلودگی عالی، مقاومت در برابر پخت بیش از حد خوب، براقت زیاد و جریان‌پذیری خوب حین پخت دارند. عملکرد نهایی پوشش پخت‌شده به ساختار رزین پلی‌استر بستگی دارد. دوام جوی این نوع رزین‌ها بهتر از رزین‌های اپوکسی است و حتی امروزه نوعی رزین بسیار مقاوم به شرایط آب‌وهوایی و بدون خاصیت گچی‌شوندگی نیز طراحی و تولید شده است [۶-۹، ۱۲، ۳۱، ۵۰].

اکثر رزین‌های پلی‌استر استفاده‌شده در پوشش‌های پودری، جامداتی بی‌شکل هستند. امروزه بیشتر پلی‌استرهای استفاده‌شده در تولید پوشش‌های پودری بر پایه ترفتالیک اسید و نئوپتیل گلیکول و تری‌ملیتیک انیدرید تولید می‌شوند. نوع دیگری از پلی‌استرهای

گرماسخت از واکنش ایزوفتالیک اسید با اتیلن‌گلیکول یا سایر الکل‌های چندعاملی به دست می‌آیند. از مونومرهای دی‌اسید یا دی‌الکل مختلفی نیز می‌توان برای بهبود و ارتقای خواص رزین پلی‌استر استفاده کرد. به عنوان مثال، پیروملیتیک انیدرید در مواقعی که نیاز است تا مقاومت حلالی، مقاومت در برابر شربه و پایداری گرمایی پلی‌استر افزایش یابد، در فرمول‌بندی سنتز استفاده می‌شود. بدین ترتیب گرانروی مذاب رزین‌های پلی‌استر در شرایط پخت تنظیم‌پذیر است، اما این رزین‌ها معمولاً گرانروی مذاب نسبتاً زیادی دارند (معمولاً بیش از ۲۰ poise در دمای ۲۰۰°C). نداشتن قابلیت ایجاد پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های پلی‌استر در ایجاد سطح صاف به‌طور کلی نتیجه گرانروی نسبتاً زیاد آن‌هاست. گرانروی رزین پلی‌استر تحت تأثیر عوامل متضاد زیادی است. به عنوان مثال، اگر وزن مولکولی رزین کمتر شود، گرانروی آن کاهش می‌یابد، در حالی که عدد اسیدی رزین خیلی زیاد خواهد شد. گفتنی است، رزین‌های پلی‌استر طی یک واکنش تراکمی استری شدن میان دی‌اسیدها و دی‌ال‌ها حاصل می‌شوند که با افزایش پیشرفت واکنش، تعداد گروه‌های اسیدی در مخلوط کاهش و گرانروی افزایش می‌یابد. از این رو، در عدد اسیدی بیشتر، طول زنجیرها کوتاه‌تر و گرانروی کمتر خواهد بود. گرانروی رزین نیز در صورت حذف یا کاهش شاخه‌های جانبی آن کمتر می‌شود، در حالی که افزایش تعداد شاخه‌ها، واکنش‌پذیری رزین پلی‌استر را بهبود می‌بخشد. رزین‌های با زنجیر اصلی انعطاف‌پذیر گرانروی کمتری دارند، در حالی که زنجیر اصلی رزین باید به اندازه کافی سخت باشد تا T_g به حد کفایت زیاد شود. بدین ترتیب، بهینه‌سازی اجزا سازنده رزین پلی‌استر و جرم مولکولی آن در دستیابی به تعادل T_g ، عدد اسیدی، عدد هیدروکسیل و گرانروی، بسیار مهم است [۶-۹، ۱۶، ۱۷، ۴۸-۵۰]. Dogan و همکاران [۳۶] نشان دادند، T_g اولیگومرهای پلی‌استر با انتهای گروه کربوکسیل با افزایش وزن مولکولی افزایش می‌یابد، اما کاهش غلظت گروه‌های واکنشی کربوکسیل اثری بر خواص نهایی ندارد. این رویکرد، موضوع بسیار مهمی است، زیرا عدد اسیدی و T_g در طراحی رزین‌های پلی‌استر کربوکسیلاتی برای پوشش‌های پودری کنترل می‌شوند. یکی از پیشرفت‌هایی که در حوزه پوشش‌های پودری پلی‌استری انجام شده تولید رزین‌هایی برای ساخت لاک‌هایی با کشش عمیق و برای کاربردهای با دمای زیاد در کلاف‌پوش‌ها و پوشش‌های قوطی است [۵۱].

در ۱۹۷۴ میلادی رزین پلی‌استر و پلی‌استر-سیلیکون برای تهیه سامانه‌های پودری آب‌گریز معرفی شدند که امروزه پوشش‌های مناسبی از این نوع رزین‌ها در حال تولید هستند [۱۷]. در مطالعه

اپوکسی-پلی‌استر و دو پوشش پودری پلی‌استر با بافت‌های سطحی ناصاف و صاف در محیط‌های مختلف تهاجمی، یعنی در محلول ۴٪ وزنی سدیم کلرید با روش امپدانس الکتروشیمیایی و نیز در محیط مرطوب و جو گرم با آزمون محفظه رطوبت و در محیط دریایی با آزمون مه نمکی ارزیابی شد. ساختار، شکل‌شناسی و یکنواختی پوشش‌های پودری با آزمون‌های SEM و EDX بررسی شد. تصاویر سطح مقطع این دو نوع پوشش (هیبریدی و TGIC) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داد، به دلیل چسبندگی بسیار بیشتر رزین اپوکسی به سطح فسفاتی‌شده، مقاومت به خوردگی این نوع از پوشش‌ها نسبت به TGIC بسیار بیشتر بوده است [۵۳، ۵۲، ۱۲].

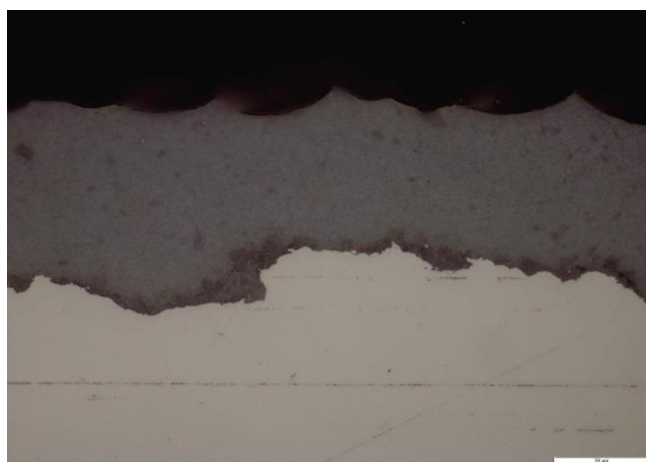
گفتنی است، افزون بر پلی‌استرهای گرماسخت، از پلی‌استرهای پودری گرمانرم نیز به‌عنوان پوشش پودری استفاده می‌شود. این رزین‌ها معمولاً پلی‌استرهای گرمانرم از انواع داکرون یا پلی‌(اتیلن ترفتالات) با وزن مولکولی زیاد بوده و بسیار انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر حلال هستند. زمانی که پلی‌(اتیلن ترفتالات) با استفاده از یک گلیکول و یک الکل سه‌عاملی الکل‌کافت شود، پلی‌استری گرماسخت ایجاد می‌شود. در این حالت وزن مولکولی کاهش می‌یابد و گروه‌های عاملی کافی با الکل‌کافت روی زنجیر به‌وجود می‌آیند که برای شبکه‌ای شدن و پخت نیاز هستند. در نهایت، این محصولات دارای مقاومت اسیدی و قلیایی عالی خواهند بود [۵۴].

۴-۲-۳-۱-۴ رزین پلی‌یورتانی

یک دهه پس از آغاز تولید پوشش‌های پودری، در دهه ۱۹۷۰ میلادی پوشش پودری پلی‌یورتانی توجه زیادی را به خود جلب کرد. در

دیگری پلی‌استری با پایداری جوی عالی برای کاربردهای بیرونی بر پایه کوپلیمر پلی-۴،۱-سیکلوهاگزیلن دی‌متیلن ترفتالات ایزوفتالات معرفی شد [۲۱]. همچنین پوشش‌های پودری جدیدی بر پایه پلی‌استری خودشبه‌کای‌شونده و پخت‌پذیر در دمای 190°C – 180°C با کاربرد بیرونی عرضه شد. در این نوع پوشش‌ها، از پلی‌استر با انتهای گروه هیدروکسیل و اسید استفاده شد که در این دما با یکدیگر واکنش دادند. این پلی‌استرهای خاص انعطاف‌پذیری، چسبندگی و جریان‌پذیری خوبی داشتند، اما برای دستیابی به خواص مکانیکی عالی، نیاز بود پخت در دمای بیش از 200°C انجام شود. دمای پخت زمانی که از آمینوپلاست‌ها استفاده می‌شود، کمتر از اپوکسی‌هاست، در حالی که دمای پخت در نوع پلی‌استر خودتراکم، معمولاً بیشتر از سامانه‌های اپوکسی است [۲۱، ۱۷].

مافی و همکاران [۵۲] رفتار محافظتی پوشش‌های پودری بر پایه پلی‌استر و اپوکسی را در محیط خورنده در محلول ۳/۵٪ وزنی سدیم کلرید با استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز، گرماسنجی پویشی تفاضلی و تجزیه گرمایی مکانیکی دینامیکی (DMTA) بررسی کردند. Bhardu و همکاران [۵۳] نیز خواص دو پوشش پودری مشابه را با طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، آزمون مه نمکی و میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) مطالعه کردند. نتایج هر دو مقاله نشان داد، خواص محافظتی پوشش پودری اپوکسی-پلی‌استر (هیبرید) در مقایسه با پوشش پودری پلی‌استر TGIC بیشتر است که این موضوع به چگالی شبکه‌ای شدن بیشتر پوشش بر پایه اپوکسی نسبت داده شد [۵۳، ۵۲، ۱۲]. در مطالعه دیگری خواص حفاظتی دو پوشش



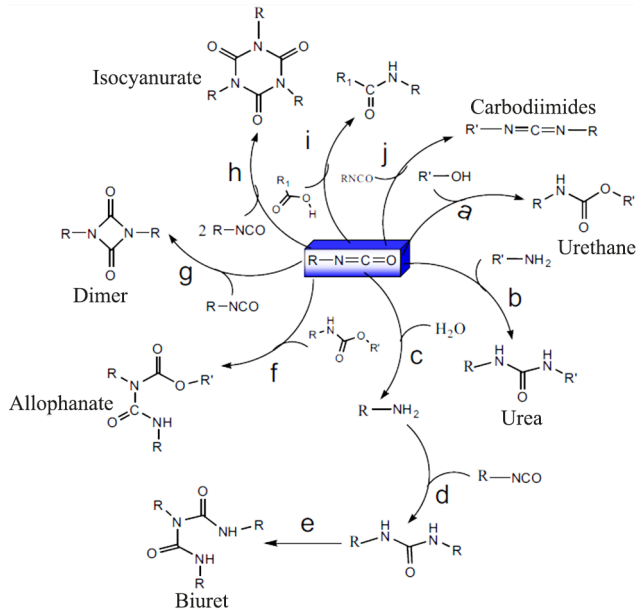
(a)



(b)

شکل ۱۰- تصاویر سطح مقطع دو نوع پوشش پودری پلی‌استری: (a) هیبریدی و (b) تری‌گلیسیدیل ایزوسیاناتورات [۱۲].

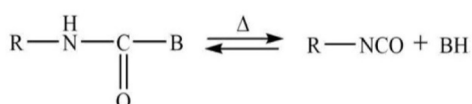
Fig. 10. the cross section image of two types of polyester powder coatings: (a) hybrid and (b) triglycidyl isocyanurate (TGIC) [12].



شکل ۱۱- ترکیبات مختلف حاصل از واکنش ایزوسیانات با هسته‌دوست‌های مختلف [۶۵].

Fig. 11. Different compounds resulting from the reaction of isocyanate with different nucleophiles [65].

هنگام انبارداری نامطلوب است و برای جلوگیری از آن، پلی‌استر بی‌شکل، باید بیش از $50^{\circ}C$ باشد که این موضوع انعطاف‌پذیری پوشش را محدود می‌کند. از سوی دیگر، پلی‌استرهای نیمه‌بلوری، انبارداری را در نتیجه بلورینگی، بهبود می‌دهند، اما می‌توانند کمتر از $55^{\circ}C$ نیز داشته باشند. بدین ترتیب در این ثبت اختراع از ۸۰-۱۰٪ وزنی پلی‌استر هیدروکسیل‌دار بی‌شکل، ۸۰-۱۰٪ وزنی پلی‌استر هیدروکسیل‌دار نیمه‌بلوری و ۳۰-۵٪ وزنی ایزوسیانات استفاده شد. آن‌ها پیشنهاد کردند، از ایزوسیانات‌های مسدودشده تجاری مانند ایزوفورن دی‌ایزوسیانات مسدودشده با ϵ -کاپرولاکتام یا تولوئن دی‌ایزوسیانات مسدودشده با ϵ -کاپرولاکتام استفاده شود. دمای پخت برای نمونه‌هایی از این نوع پوشش پودری تا $350^{\circ}C$ با زمان پخت حدود ۲۰ min بود. انعطاف‌پذیری مناسب، گرانروی مذاب کم در دمای پخت، جریان‌پذیری خوب و چسبندگی خوب از برتری‌های این نوع پوشش است [۷۰].



شکل ۱۲- مسدودزدایی ایزوسیانات‌های مسدودشده.

Fig. 12. Deblocking of deblocked isocyanates.

میان پوشش‌های پودری گرماسخت، پوشش‌های پودری پلی‌یورتانی خواص برجسته‌ای مانند پایداری جوی زیاد، مقاومت زیاد در برابر پرتو فرابنفش، جریان‌پذیری بی‌نظیر، سختی سطحی زیاد همراه با انعطاف‌پذیری عالی، مقاومت حلالی و شیمیایی خوب و انطباق‌پذیری زیاد فرمول‌بندی دارند و بهترین انتخاب برای کاربردهای خارجی هستند. پوشش‌های پودری پلی‌یورتانی کاربردهای خارجی و داخلی متعددی دارند و برای پوشش‌دهی قطعات خودروهای سبک و سنگین، اتصالات، قاب دوچرخه، مبلمان و تجهیزات فضای باز، ماشین‌آلات کشاورزی، لوازم خانگی و باجه‌های تلفن استفاده می‌شوند [۶۰-۱۶،۵۵]. برای تهیه پوشش‌های پلی‌یورتانی از رزین‌های پلی‌استر یا آکریلی پودری هیدروکسیل‌دار و ایزوسیانات به‌عنوان عامل پخت استفاده می‌شود که گروه‌های ایزوسیانات با گروه هیدروکسیل در رزین واکنش می‌دهند و ساختارهای شبکه‌ای را ایجاد می‌کنند. با توجه به واکنش‌پذیری گروه ایزوسیانات نسبت به هسته‌دوست‌ها در دمای محیط و دماهای بیشتر، مطابق شکل ۱۱ ترکیبات مختلفی تشکیل می‌شوند [۶۵-۶۱].

برای جلوگیری از واکنش زود هنگام ایزوسیانات‌ها طی فرایند تولید پودر، باید آن‌ها را مسدود کرد. در دمای پخت مناسب، عامل مسدودکننده، جدا شده و گروه‌های ایزوسیانات آزاد تولید می‌شوند تا با گروه‌های هیدروکسیل واکنش دهند. واکنش مسدودزدایی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. دمای فرایند اکستروژن پوشش پودری پلی‌یورتانی باید از دمای مسدودزدایی ایزوسیانات مسدودشده کمتر و بیش از دمای ذوب رزین هیدروکسیل‌دار باشد. نتایج نشان داد، مسدودزدایی برای چنین سامانه‌هایی در محدوده دمایی $200-180^{\circ}C$ است [۶۷-۶۵].

اولین گزارش استفاده از پوشش پودری پلی‌یورتانی در ثبت اختراع ایالات متحده با شماره ۳۸۵۷۸۱۸ در ۱۹۷۴ میلادی گزارش شده است که از پیش‌پلیمر ایزوسیاناتی مسدودشده با کتوکسیم (ketoxime) و یک رزین پلی‌استر هیدروکسیل‌دار استفاده شده بود [۶۸،۶۹]. Frizelle و همکاران [۶۹] استفاده از یک مول متیل اتیل کتوکسیم به‌عنوان عامل مسدودکننده به‌ازای هر مول گروه ایزوسیانات را در تهیه پیش‌پلیمر جامد ایزوسیاناتی پیشنهاد کردند. بر اساس اختراع آن‌ها، برای دستیابی به محصول جامد با دمای ذوب زیاد برای افشانش الکتروستاتیکی لازم است که حتماً از یک آمین در فرمول‌بندی استفاده شود. دمای معمولی پخت این سامانه‌ها $230-190^{\circ}C$ و زمان پخت حدود ۳۰-۱۵ min بود. ۱۵ سال بعد، پوشش پودری پلی‌یورتانی دیگری در ثبت اختراع ایالات متحده با شماره ۴۸۵۹۷۶۰ پیشنهاد شد که متشکل از یک پلی‌استر بی‌شکل، یک پلی‌استر نیمه‌بلوری و یک پلی‌ایزوسیانات مسدودشده بود که افزودن بر قابلیت انبارداری خوب پودر، فیلم‌هایی با سختی و انعطاف‌پذیری زیاد را نیز ارائه می‌کرد. گفتنی است، تجمع ذرات پودر

مشکلاتی که در تنظیم جریان‌پذیری سطحی و انبارداری آن‌ها وجود دارد، دشوار است، زیرا با افزایش T_g برای بهبود خواص انبارداری، جریان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و چسبندگی آن کاهش می‌یابد [۷۵]. سازوکارهای مختلفی برای ایجاد اتصال عرضی پودرهای آکریلی گرماسخت از جمله استفاده از پلیمر استیرن آکریلات اصلاح‌شده با آکریل‌آمید و N-متوکسی متاکریل‌آمید وجود دارد. همچنین در گزارش‌ها بیان شده که از یک آلکوکسی متیل ایزوسیانات نیز برای واکنش با یک تریپلیمر هیدروکسیل پروپیل متاکریلات-استیرن-آکریلات استفاده شده است. استفاده از آکریلی‌هایی که عاملیت اپوکسید دارند، روش دیگری برای ایجاد اتصال عرضی است، اگرچه این جریان‌پذیری و پایداری انبارداری ضعیف و دمای پخت زیادی دارد. در گزارش جدیدتری از پیش‌ماده ایزوسیاناتی کوپلیمر شده مانند تری‌آکیل‌آمین متاکریل‌ایمید استفاده شده است که با مونومرهای آکریلی هیدروکسیل‌دار کوپلیمر می‌شود تا یک کوپلیمر آمین‌ایمید-هیدروکسیل تولید شود. هنگام پخت، عامل آمین‌ایمید دوباره به ایزوسیانات تغییر ساختار می‌دهد که در نهایت با گروه هیدروکسیل وارد واکنش می‌شود. در چنین سامانه‌هایی عملیات پخت در دمای 180°C تا 160°C به مدت ۲۰ min تا ۳۰ min امکان‌پذیر است. در مطالعه دیگری رزین پودری آکریلی دارای گروه عاملی گلیسیدیل با قابلیت پخت با یک جز اسیدی تولید شد [۹، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۳۱، ۷۵].

۴-۲-۱-۵ پوشش‌های پودری سلولوز استات بوتیرات

ممکن است، از سلولوز استات بوتیرات برای اصلاح فرمول‌بندی انواع پوشش‌های پودری دارای رزین‌های گرمانرم یا گرماسخت به‌منظور دستیابی به جریان‌پذیری بهتر، به‌حداقل‌رساندن سوراخ‌سوزنی (pinholing)، پوست‌پرتالی‌شدن و آتشفشانی‌شدن سطح و محافظت بهتر از لبه‌ها استفاده شود. در این راستا از پودر استات بوتیرات و سلولوز پروپیونات استات برای افشانش الکتروستاتیکی و پوشش بستر سیالی برای پوشش‌دهی قطعات با اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود. این پودرها در پوشش افشانش الکتروستاتیکی، با اندازه‌های مش ۷۰ تا ۱۵۰ و برای کاربرد بستر سیالی، با اندازه مش ۵۰ موجود هستند [۱۶، ۲۱، ۲۴].

۴-۲-۱-۶ رزین‌های بازبافتی

منابع فسیلی محدود، قوانین زیست‌محیطی و شیوه‌نامه کیوتو به تغییر رویکرد جهانی و کاهش تمایل و وابستگی به نفت خام منجر شده است. این موضوع توجه دانشمندان و تولیدکنندگان را به سمت استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر به‌عنوان منبع انرژی و منبع مواد شیمیایی

در سامانه‌های پلی‌یورتانی مسدودشده، افزایش اسیدینگی ایزوسیانات و عوامل مسدودکننده به افزایش دمای مسدودزدایی منجر می‌شود. نوع ایزوسیانات نیز بر دمای مسدودزدایی مؤثر است. به‌عنوان مثال، هنگامی که از عامل مسدودزدای آروماتیکی استفاده می‌شود، هگزامتیلن دی‌ایزوسیانات دمای عامل مسدودزدای کمتری نسبت به ایزوفورن دی‌ایزوسیانات دارد، اما زمانی که از عامل مسدودزدای آلیفاتیک استفاده می‌شود، نتایج معکوس حاصل می‌شوند [۷۴-۷۰]. به‌منظور افزایش زاویه ترشدگی، مقادیر زبری و مقاومت سایشی در کنار کاهش انرژی سطحی، Pilch-Pitera و همکاران [۳۷] پلی‌ایزوسیانات‌های مسدودشده با قابلیت شبکه‌ای‌شدن زیاد را برای پوشش‌های پودری با پایداری جوی زیاد ارائه کردند. از جمله مشکلات صنعتی استفاده از پوشش‌های پودری پلی‌یورتانی می‌توان به انتشار عوامل مسدودکننده، واکنش‌پذیری کم برخی از ایزوسیانات‌های مسدودشده، دمای پخت زیاد این سامانه‌ها و نیاز به استفاده از کاتالیزگر اشاره کرد. برای غلبه بر این مشکلات، تلاش‌های زیادی، به‌ویژه در حوزه معرفی عوامل مسدودکننده جدید سازگار با محیط‌زیست انجام شده است. یکی از چالش‌های مطرح‌شده درباره پوشش‌های پودری پلی‌یورتانی، کاهش دمای پخت با هدف مصرف کمتر انرژی، ضمن حفظ مقاومت جوی و ظاهر پوشش است، زیرا تغییرات اعمال‌شده در راستای کاهش دمای پخت کمتر از 180°C ، موجب ناهم‌ترازی سطح و کاهش دوام انبارداری می‌شود [۱۶، ۲۱، ۷۳، ۷۴].

۴-۲-۱-۴ رزین آکریلی

رزین‌های پودری آکریلی گرماسخت، گونه دیگری از رزین‌های پودری هستند که برای تهیه پوشش‌های پودری استفاده می‌شوند. پوشش‌های پودری بر پایه رزین آکریلی بیشتر در ژاپن تولید و استفاده می‌شود، اما در اروپا و آمریکا به‌دلیل زیاده‌بودن قیمت آن، مورد توجه چندانی قرار نگرفته‌اند. ژاپنی‌ها تلاش کردند، این پوشش را جایگزین پوشش‌های آلکید-ملامین کنند. پوشش پودری آکریلی دارای برتری‌هایی مانند مقاومت جوی عالی، قابلیت زیاد حفظ رنگ، مقاومت مناسب در برابر آلودگی، چسبندگی و ظاهری عالی است که این پوشش‌ها را برای کاربردهای تزئینی و معماری مناسب می‌کند. پوشش‌های پودری آکریلی نسبت به پوشش‌های بر پایه رزین‌های وینیلی، مقاومت جوی، حفظ براقیت و مقاومت در برابر گچی‌شدن و مقاومت در برابر تغییر رنگ در دماهای زیاد، بسیار بهتری دارند. کاربردهای این نوع پوشش در قاب‌های پنجره بیرونی و تجهیزات گرمایش است [۹، ۳۱، ۷۵].

به‌طور کلی، تهیه فرمول‌بندی پوشش‌های پودری آکریلی به‌دلیل

فلوریدا)؛

- دسته دو: نشان‌دهنده عملکرد خوب پوشش (سه سال در فلوریدا) و
- دسته سه: نشان‌دهنده عملکرد عالی پوشش (ده سال در فلوریدا).
بر اساس نتایج در جدول ۱، پلی‌استر پخت‌شونده با TGIC یا HAA برای اکثر کاربردهای صنعتی، مناسب خواهند بود، به‌طوری که این پوشش‌ها پس از دو سال قرارگرفتن در معرض مداوم عوامل جوی بیرونی، براقیت و کیفیت مناسبی خواهند داشت. اگر به سطح بیشتری از پایداری جوی (بیش از ۵ سال) نیاز باشد، می‌توان از پلی‌استرهای آبرپایدار با رنگ‌دانه‌های بادوام استفاده کرد. نیاز به دوام بیشتر به مدت ۱۰ تا ۲۰ سال در کاربردهایی مانند قطعات بیرونی بدنه اتومبیل و کاربردهای ساختمانی با استفاده از رزین‌های پودری بر پایه آکرل یا فلوئوروپلیمر مرتفع می‌شوند [۱۷،۱۶،۲۱]. مقاومت شیمیایی و مقاومت به خوردگی رزین‌های مختلف استفاده‌شده در پوشش‌های پودری در جدول ۲ گزارش شده است.

همچنین مقاومت به خوردگی پوشش‌های حاصل از رزین‌های پودری مختلف به‌صورت طرح‌واره در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های اپوکسی، بیشترین مقدار مقاومت به خوردگی و در صورت استفاده در محیط‌های درونی یا دفنی که در معرض نور مستقیم خورشید نیستند، بیشترین کارایی را در میان پوشش‌های پودری دارند. پوشش‌های پودری هیبریدی و پلی‌یورتان نیز مقاومت به خوردگی بسیار خوبی دارند. گفتنی است، پوشش‌های پلی‌یورتانی از برتری مضاعف مقاومت در برابر

جدول ۱- مقایسه دوام جوی رزین‌های مصرفی در پوشش‌های پودری [۱۷،۲۱].

Table 1. The comparison of durability of different resins considered in powder coatings [17,21].

Resin type	Durability of powder coatings in outdoor applications in south Florida
Epoxy	1-3 months
Epoxy-polyester (hybrid)	2-6 months
Polyester	1-2 years
Polyurethane	1-2 years
Superdurable polyester*	3-5 years
Superdurable polyurethane	3-5 years
Fluoropolymers	5-20 years

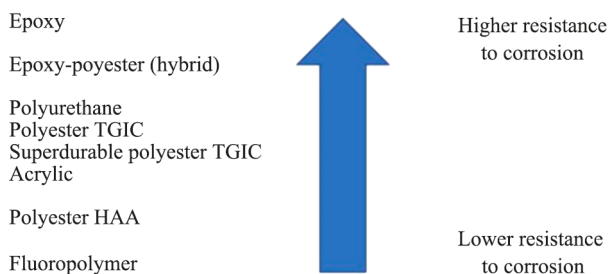
*Superdurable and hyperdurable.

معطوف کرده است [۷۶،۷۷]. امروزه اکثر رزین‌های استفاده‌شده در پوشش‌های پودری، بر پایه پلی‌استرهای حاصل از واکنش ترفتالات-ایزوفتالات اسیدها با دی‌ال‌های آلیفاتیک هستند که به‌طور صنعتی از مواد اولیه مشتق‌شده از منابع تجدیدناپذیر و بدون استفاده از مواد بازیافتی، تهیه می‌شوند. از این‌رو، تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از منابع تجدیدپذیر در راستای تولید پلی‌استرهای پودری سبز انجام شده است [۵۲،۵۳،۷۸]. یکی از این مطالعات استفاده از مونومر ایزوسوربید در تهیه رزین پلی‌استر پودری برای پوشش پودری است، زیرا این مونومر ساختار سختی دارد و از منابع تجدیدپذیر مختلف مانند شکر به‌دست می‌آید [۱۶]. Noordover و همکاران [۷۸] از پلی‌استرهای مشتق‌شده از ایزوسوربید، سوکسینیک اسید و دی‌ال‌های آلیفاتیک در تهیه پوشش‌های پودری استفاده کرده و پوشش نهایی را با پوشش‌های پودری مرسوم پایه‌پلی‌استری مقایسه کردند. Gioia و همکاران [۷۹] از روش بازیافت در تهیه رزین پلی‌استر برای پوشش‌های پودری استفاده کردند، به‌طوری که پلی‌(اتیلن ترفتالات) را با استفاده از ایزوسوربید و سایر مونومرهای مشتق‌شده از منابع تجدیدپذیر مانند سوکسینیک اسید و گلیسرول به‌صورت شیمیایی بازیافت کردند. نتایج نشان داد، پوشش پودری حاصل از این رزین بازیافتی، نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داد. در تمام موارد مشاهده شد، این پوشش‌ها در مقایسه با پوشش پودری بر پایه پلی‌استر حاصل از واکنش ترفتالیک اسید و نئوپتیل گلیکول موجود در بازار، مقاومت آبی، حلالی و شیمیایی بهتر، مقاومت ضربه‌ای عالی‌تر و نیز سختی بیشتری داشتند، اما مقاومت جوی آن‌ها مشابه پوشش‌های تجاری بود [۸۰]. تلاش‌هایی نیز در راستای استفاده از رزین آلکید برای تهیه پوشش‌های پودری انجام شده اما تاکنون نتایج قابل قبولی حاصل نشده است.

۲-۴ مقایسه رزین‌های مصرفی در پوشش‌های پودری

پایداری جوی رزین‌های استفاده‌شده در پوشش‌های پودری، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کلیدی در انتخاب رزین، در جدول ۱ گزارش و مقایسه شده است. پایداری و ماندگاری پوشش‌ها در فضای باز معمولاً براساس دوام مدنظر در فلوریدای جنوبی درجه‌بندی می‌شود. سامانه دقیقی توسط سازمان کیفیت پوشش مستقر در سوییس (Qualicoat) ایجاد شده که نمایانگر عملکرد پوشش در مواجهه با شرایط جوی فلوریدای جنوبی است. این سامانه به‌ترتیب زیر تعریف می‌شود [۱۷،۱۶،۲۱]:

- دسته یک: نشان‌دهنده عملکرد ضعیف پوشش (یک سال در فلوریدا)؛
- دسته یک‌ونیم: نشان‌دهنده عملکرد متوسط پوشش (دو سال در



شکل ۱۳- مقاومت به خوردگی پوشش‌های حاصل از رزین‌های پودری مختلف.

Fig. 13. Corrosion resistance of coatings made from different powder resins.

پوشش‌های پودری بر پایه اپوکسی دارند، اما مقاومت شیمیایی آن‌ها ضعیف‌تر است [۱۶،۱۷،۲۱].

سختی پوشش پودری باعث ایجاد سطحی مستحکم می‌شود. گاهی اوقات مقدار لغزندگی سطح یا ضریب اصطکاک کم نیز در پوشش‌های پودری لازم است. انعطاف‌پذیری مکانیکی ویژگی مهمی است، به‌ویژه اگر در فرایند تولید محصول، مراحل سرهم‌کردن پس از پوشش‌دادن مانند کشش و برش نیز وجود داشته باشد. معمولاً اپوکسی‌ها، اپوکسی-پلی‌استرها و اکثر پلی‌استرها انعطاف‌پذیری عالی دارند و در برابر ضربه مقاوم هستند. پوشش پودری بر پایه آکریلی‌ها، پلی‌استرهای آبرپایدار و بسیاری از پوشش پودری آبرمات، نسبتاً شکننده هستند و ممکن است، از نظر انعطاف‌پذیری و خواص مکانیکی انتخاب مناسبی نباشند [۸۴-۱۶۸۲].



شکل ۱۴- مقایسه مقاومت شیمیایی پوشش‌های پودری حاصل از رزین‌های مختلف.

Fig. 13. Chemical resistance of coatings made from different powder resins.

پرتو فرابنفش نیز برخوردارند و می‌توانند نیاز برخی از محیط‌های خورنده مانند محیط‌های ساحلی با خوردگی متوسط را برآورده کنند. پلی‌استرها نیز مقاومت به خوردگی متوسطی دارند [۲۸،۳۲،۸۱]. مقاومت در برابر لکه حاصل از مواد شیمیایی مانند شوینده‌ها، ضدعفونی‌کننده‌ها، ترکیبات جلادهنده، مواد غذایی، روغن‌ها، حلال‌ها، سوخت‌ها و روغن‌های هیدرولیک از معیارهای مهمی است که باید هنگام انتخاب رزین پودری مناسب در نظر گرفته شوند. مقاومت شیمیایی پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های مختلف در شکل ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

اپوکسی‌ها و پلی‌یورتان‌ها بهترین انتخاب برای کاربردهایی هستند که مقاومت در برابر لکه مواد شیمیایی در آن‌ها الزامی است. فلوئوروپلیمرها نیز مقاومت شیمیایی بسیار خوبی دارند، البته قیمت این محصول نسبتاً زیاد است. همچنین آکریلی‌ها مقاومت شیمیایی بسیار خوبی به‌ویژه در برابر محصولات مرتبط با خودرو مانند بنزین، روغن موتور و روغن هیدرولیک دارند. در این باره، پلی‌استرها به‌عنوان پوششی با مصارف عمومی در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند به مقدار کم یا متوسط در معرض مواد شیمیایی همچون محصولات غذایی و مواد شوینده قرار گیرند [۸۲].

بدین ترتیب، پوشش‌های پودری گرماسخت پلی‌استری انعطاف‌پذیری و مقاومت جوی بیشتری نسبت به رزین‌های

جدول ۲- مقایسه مقاومت شیمیایی و خوردگی رزین‌های مختلف استفاده‌شده در پوشش پودری [۱۷،۲۱].

Table 2. The comparison of chemical and corrosion resistance of different resins considered in powder coatings [17,21].

Resin type	Corrosion resistance*	Chemical resistance
Epoxy	1000-5000 hours	Excellent
Polyurethane	500-1500 hours	Great
Acrylic	500-1500 hours	Very good-excellent
Epoxy-Polyester (hybrid)	500-1500 hours	Very good-excellent
Superdurable Polyester	500-1500 hours	Very good
Standard polyester	500-1500 hours	Good
Fluoropolymers	250-500 hours	Good

* According to salt spray (fog) standard (ASTM B-117), resistance with minimal cracking on iron-phosphate-heated steel.

۳-۴ پژوهش‌ها درباره رنگ‌دانه‌ها و پرکننده‌ها

رنگ‌دانه‌ها و پرکننده‌ها جزء مهمی از پوشش‌های پودری هستند که انتخاب درست آن‌ها، بر خواص نهایی پوشش به‌شدت مؤثر است. مهم‌ترین خواص رنگ‌دانه، قدرت رنگی، قدرت پراکندگی و پایداری گرمایی آن است که در انتخاب آن‌ها باید به این موارد توجه کرد. در پوشش‌های پودری از هر دو نوع رنگ‌دانه‌های آلی و معدنی استفاده می‌شود. تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2) رنگ‌دانه‌ای معدنی است که اغلب در تهیه پوشش‌های پودری کاربرد دارد. Shi و همکاران [۴۹] پوشش پودری پلی‌استری دارای ۲٪ وزنی نانوذرات TiO_2 اصلاح‌شده را مطالعه کردند. نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات TiO_2 سبب کاهش بیش از 5°C در دمای شروع و دمای اوج واکنش پخت شد. بدین ترتیب، افزودن نانوذرات TiO_2 به پوشش‌های پودری پلی‌استر، نقش محرکی را در فرایند پخت ایفا کرد. همچنین، در مطالعه دیگری سطح نانوذرات TiO_2 با گروه‌های آب‌گریز پیوند زده شد تا پراکندگی آن‌ها در ماتریس پوشش و آب‌گریزی سطح پوشش افزایش یابد.

هداوند و همکاران [۱۵] درباره خواص ضدباکتریایی پوشش پودری دارای نانوذرات روی اکسید (ZnO) مطالعه کردند. آن‌ها موفق شدند، سطح نانوذرات را با وینیل‌تری‌متوکسی‌سیلان اصلاح کنند. نتایج نشان داد، نانوذرات ZnO اصلاح‌شده نه تنها پایداری گرمایی را افزایش داد، بلکه موجب سازگاری عالی در فرایند اختلاط و پراکندگی خوب در ماتریس پلیمری نیز شد. نتایج آزمایش‌های ضدباکتریایی نیز نشان داد، کارایی پوشش‌های دارای نانوذرات ZnO اصلاح‌شده به‌صورت چشمگیری ارتقا یافته است. Trotter و همکاران [۶] برای افزایش رسانندگی پوشش پودری و تغییر حامل‌های بار متحرک، از روی اکسید و سیلیکا در سامانه رزین پودری پلی‌استر-اپوکسی به‌عنوان رنگ‌دانه استفاده کردند. نتایج نشان داد، انرژی فعال‌سازی در چرخش دوقطبی‌ها کاهش یافت، بسامد قله‌های آسایش به سطوح کمتر منتقل شد و T_g پوشش پودری با افزودن رنگ‌دانه‌ها افزایش یافت.

Puig و همکاران [۸۱] پوشش پودری دارای مقادیر مختلف رنگ‌دانه روی مولیبدات ارتوفسفات هیدرات را روی فولاد گالوانیزه اعمال کردند و خواص ضدخوردگی آن‌ها را با روش‌های الکتروشیمیایی بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزودن ۱۵-۱۰٪ رنگ‌دانه در این نوع پوشش پودری، خواص ضدخوردگی به‌دلیل بهبود خواص سدی و اثر بازدارندگی رنگ‌دانه، افزایش یافت.

رنگ‌دانه‌های فسفاتی به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی بسیار مؤثر و ایمن در پوشش‌های مختلف مطرح هستند. El-Ghaffar و همکاران [۲۸] پوشش پودری هیبریدی اپوکسی-پلی‌استر و پلی‌استر را با رنگ‌دانه‌های فسفاتی برای بهبود خواص ضدخوردگی تهیه کردند.

پوشش پودری را روی ورقه‌های فولادی نورد سرد (cold rolled) اعمال کرده و خواص فیزیکی و مکانیکی را بررسی کردند. همچنین، خواص حفاظت از خوردگی با محفظه مه نمکی به‌مدت ۱۰۰۰ h ارزیابی شد. نتایج نشان داد، هیچ تغییر شاخصی در خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش‌ها به‌وجود نیامد، اما پوشش‌های پودری حاصل، خواص ضدخوردگی کارایی را برای محافظت از فولاد نشان دادند.

Vähä-Nissi و همکاران [۲۶] اثر استفاده از پرکننده کلسیم کربنات (CaCO_3) بر تخلخل و اندازه متوسط منفذهای پوشش‌های پودری را مطالعه و گزارش کردند، استفاده از این پرکننده‌ها موجب کاهش مصرف انرژی طی فرایند پخت و افزایش شایان توجه خواص چسبندگی و سختی می‌شود. Kalaei و همکاران [۴۵] اثر کاتالیزگری CaCO_3 بر واکنش پخت پوشش‌های پودری پلی‌استر-اپوکسی را بررسی کردند. مشخص شد، اثر وجود نانوذرات CaCO_3 پوشش‌یافته با استئاریک اسید بر شکل‌شناسی، رفتار پخت، چسبندگی و سختی پوشش‌های پودری پلی‌استر-اپوکسی بسیار مناسب است. در مطالعه‌ای عملکرد مقاومت به خراش و سایش دو سامانه پوشش پودری گرماسخت دارای کسرهای وزنی مختلف پرکننده مولیبدن دی‌سولفید (MoS_2) ارزیابی شد. نتایج نشان داد، این پرکننده در پوشش‌های اپوکسی نسبت به پلی‌استر، مقاومت به خراش بیشتری را ایجاد کرده است [۲]. Piazza و همکاران [۴۶] خواص پوشش‌های پودری اپوکسی دارای نانورس مونت‌موریلونیت با ساختار میان‌لایه‌ای و میکروذرات باریم سولفات را بررسی کردند. نتایج نشان داد، نانوکامپوزیت‌های دارای مونت‌موریلونیت خواص مقاومت به خوردگی و فیزیکی بهتری نسبت به میکروکامپوزیت‌های اپوکسی-سولفات باریم نشان دادند. آن‌ها دریافتند، با اعمال نانوذرات مونت‌موریلونیت، پوشش‌هایی با پایداری گرمایی بیشتر و چسبندگی بهتر حاصل می‌شوند، زیرا مونت‌موریلونیت پراکندگی خوب و برهم‌کنش مناسبی با ماتریس اپوکسی دارد. نوع و کسر حجمی ذرات پرکننده نیز بر خواص پوشش آثار متفاوتی دارد. میرعابدینی و همکاران [۵۰] اثر اعمال پرکننده نانوذرات سیلیکای دودی را در پوشش پودری بررسی کردند. مشاهده شد، این نانوذرات به‌دلیل پراکندگی و برهم‌کنش‌های شیمیایی مناسب میان نانوذرات-ماتریس پلیمر، استحکام کششی، مدول کشسانی، سختی، نقطه شکست و چسبندگی پوشش را افزایش دادند. Puig و همکاران [۸۳] نیز از ذرات سیلیکای اصلاح‌شده با سیلان‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده چسبندگی در پوشش پودری پلی‌استر استفاده کردند. نتایج نشان داد، ذرات سیلیکای اصلاح‌شده نه تنها خواص چسبندگی را بهبود می‌بخشد، بلکه مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌ها را نیز ارتقا می‌دهد.

۵- رویکردهای فنی نوین برای افزایش خواص پوشش‌های پودری

از بدو معرفی پوشش‌های پودری تاکنون، مطالعات گسترده‌ای برای افزایش خواص و بهبود فرایند اعمال و پخت آن‌ها انجام شده است. در ادامه به چند نمونه از چالش‌ها و رویکردهای در حال بحث در صنعت پوشش پودری اشاره می‌شود. یکی از رویکردهای مطرح در زمینه پوشش‌های پودری، ورود این نوع پوشش به صنعت خودروسازی است. اولین بار از پوشش پودری بر پایه رزین اپوکسی به صورت افشانش الکتروستاتیکی در صنعت خودرو استفاده شده است. ضخامت این پوشش بین ۱ mil تا ۲ mil بود که به پختی حدود ۲۰ min در دمای ۲۵۰°C نیاز داشت. امروزه پوشش پودری در صنعت خودروسازی، بیشتر برای پوشش‌دهی قطعات زیری کاپوت استفاده می‌شوند و به دلیل نواقص سطحی، پوشش‌دهی کامل بدنه خودرو با این نوع از پوشش‌ها مرسوم نشده است. در این راستا، دو شرکت Ford و General Motors دارای خطوط آزمایشی برای پوشش‌دهی بدنه خودروها به طور کامل با پوشش پودری هستند. پیشرفت‌های در حوزه رویه‌های بیرونی خودروها نیز بررسی و مشخص شد، در این زمینه رزین‌های پودری آکریلی و پلی‌استر بهترین گزینه‌ها به شمار می‌آیند [۱۶].

چالش دیگر در زمینه پوشش‌های پودری، کاهش دمای پخت این نوع از پوشش‌هاست. یکی از ضعف‌های فناوری پوشش پودری این است که پخت پوشش پودری به مقدار شایان توجهی انرژی گرمایی نیاز دارد. به همین دلیل، آینده این فناوری‌ها شامل توسعه پوشش‌های پودری پخت‌پذیر در دمای کم خواهد بود که عمده‌ترین برتری آن‌ها صرفه‌جویی در مصرف انرژی و نیز قابلیت پوشش‌دادن زیرآیندهای حساس به دمای غیرفلزی خواهد بود. تاکنون رزین‌های پودری به طور عمده برای تولید پوشش‌های پودری اعمال‌شونده روی زیرآیندهای فلزی توسعه یافته‌اند، اما امروزه پژوهش‌ها به سمتی رفته است که بتوان از پوشش‌های پودری بر پایه رزین‌های پلی‌استر روی بسترهای حساس به دمای غیرفلزی مانند چوب و پلاستیک نیز استفاده کرد [۱۷، ۳۴]. دمای پخت برای سطوح حساس به دما مانند چوب، محصولات چوبی یا پلاستیک بین ۱۶۰°C-۱۱۰°C و ترجیحاً بین ۱۴۰°C-۱۲۰°C است. صافی سطحی، براقیت و سختی زیاد و دمای پخت کم، خواصی هستند که پوشش پودری برای استفاده روی زیرآیندهای حساس به دما باید داشته باشد. در این زمینه شرکت Stepan رزین پلی‌استر جدیدی با دمای پخت کم با نام Rucote 9900، قابلیت پخت در دمای کمتر از ۱۳۰°C را برای پوشش‌های پودری TGIC طراحی کرده است. شرکت Allnex طیف

گسترده‌ای از رزین‌های پلی‌استر مناسب برای سامانه‌های هیبریدی، TGIC و HAA را با دمای پخت کم تولید کرده است. گفته می‌شود، دمای پخت این رزین‌های هیبریدی کمتر از ۱۵۰°C است، در حالی که این پلی‌استرهای تخصصی می‌توانند با TGIC در دمای کمتر از ۱۴۰°C پخت شوند. همچنین گزارش شده است، پلی‌استرهای با دمای پخت کم و پخت‌پذیر با HAA در دمای کمتر از ۱۹۰°C پخت می‌شوند. شرکت DSM از پلی‌استری غیراشباع و دی‌وینیل‌اتر به عنوان عامل پخت استفاده کرد و اذعان داشت که این فرمول‌بندی در دمای کمتر از ۱۲۰°C قابل پخت است. تمرکز فروش این نوع از محصولات بیشتر برای تولید تخته‌های MDF است [۸۲].

به منظور بهبود فرایند پخت پوشش‌های پودری و کاهش مصرف انرژی، استفاده از امواج زیرقرمز برای سرعت‌بخشیدن به فرایند پخت فناوری جدیدی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بنا بر اظهارات شرکت DSM پخت پوشش‌های پودری در زمان‌هایی به کوتاهی ۳ min با استفاده از این فناوری قابل دستیابی است. همچنین، شرکت Photo Fusion Technologies روش جدیدی را در راستای پخت پوشش‌های پودری معرفی کرده است. این روش بر مبنای فناوری لیزر و حرکت پرتو لیزر زیرقرمز روی سطح پوشش‌یافته پایه‌گذاری شده است. با استفاده از این روش، طی چند ثانیه لایه پودری ذوب و جاری شده و سپس به شکل فیلم سخت و بادوام پخت می‌شود [۸۲]. برای کاهش مصرف انرژی حین پخت پوشش‌های پودری و کاهش مدت زمان پخت، استفاده از فناوری پخت پوشش پودری در معرض تابش پرتو فرابنفش و نور مرئی پیشنهاد داده شده و در این باره مطالعاتی نیز انجام شده است. پوشش‌های تابش‌پز می‌توانند سرعت تولید را افزایش دهند، با انرژی کمتر در کسری از ثانیه پخت شوند، هزینه‌ها را به واسطه سرعت بیشتر تولید، مصرف کمتر انرژی و حذف حلال، کاهش دهند و پوشش‌های سبتری را ایجاد کنند [۸۸-۸۵].

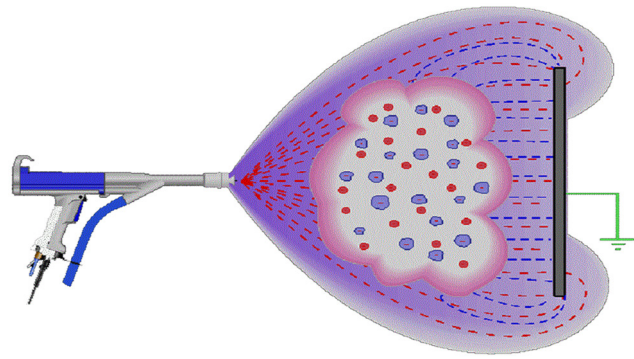
از سایر چالش‌های مطرح در زمینه پوشش‌های پودری، کاهش اتلاف ذرات پودر حین افشانش الکتروستاتیکی و ارتقا قابلیت بازیابی پودرهای تلف شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، حجم زیادی از پودرهای افشانش شده مطابق با جریان الکتریکی به سمت پشت قطعات حرکت می‌کنند و به پشت قطعه می‌چسبند و در همان‌جا پخت می‌شوند، این در حالی است که در بسیاری از موارد به پوشش‌دهی پشت قطعه نیازی نیست [۲۴].

همچنین در راستای کاهش اتلاف و افزایش کارایی اعمال پوشش پودری، روش‌های اعمال جدیدی مانند محفظه‌های ابری الکتروستاتیک عرضه شده‌اند که کارایی انتقال بیشتری دارند و به طور فزاینده در حال توسعه هستند. نمونه‌ای از محفظه ابری الکتروستاتیک

پوشش پودری در صنعت پوشش‌های کلاف که در صورت دستیابی به نتایج مناسب، کاربرد بسیار زیادی خواهد داشت. یکی دیگر از این موارد تولید رزین‌های ابرپایدار در کاربردهای بیرونی، تهیه و توسعه رزین‌های کارآمد با افزایش T_g رزین و ارتقا عملکرد گرمایی، هیدرولیتیکی و شیمیایی آن، توسعه و تولید رزین‌های پودری برای کاربردهای بهداشتی و خوراکی و رزین‌های مات برای پوشش‌های مات (اختلاط خشک یا خشک درجا) است [۱۶، ۱۷، ۲۱، ۸۹]. گفتنی است، مطالعاتی در زمینه استفاده از رزین‌های سیلیکونی پودری برای افزایش خواص گرمایی پوشش‌های پودری انجام شده اما فناوری رزین‌های سیلیکونی مقاوم به گرما هنوز در آغاز راه است و پژوهش‌های گسترده‌ای توسط شرکت‌های مطرح مانند Dow و دانشگاه Southern Mississippi در این باره در حال انجام است [۱۶، ۷۵].

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به تمایل جهانی در کاهش تولید VOC، صنعت پوشش پودری به سرعت در حال پیشرفت است و صنعتگران در حال یافتن فرصت‌های جدید برای گسترش و ارتقا کیفیت این فناوری در راستای سازگاری بیشتر با محیط‌زیست هستند. نتایج پژوهش‌ها نشان داد، رزین‌های پودری جزء اصلی فرمول‌بندی پوشش پودری هستند و خواصی مانند نوع، ساختار شیمیایی، T_g ، نقطه نرمی، گرانروی، جرم مولکولی، اندازه ذرات و پایداری رزین اثر بسزایی بر خواص پوشش نهایی دارد. نوع رزین مصرفی بر اساس کاربرد پوشش و خواص مدنظر انتخاب می‌شود. مشاهده شد، از انواع مختلفی از رزین‌های گرمانرم و گرماسخت پودری در تولید این رنگ‌ها استفاده می‌شود که خواص نهایی پوشش‌های پودری حاصل از این رزین‌ها از نظر مقاومت شیمیایی، خوردگی و پایداری جوی با یکدیگر متفاوت است. براساس نتایج می‌توان گفت، امروزه پوشش‌های پودری به‌طور عمده بر پایه رزین‌های پلی‌استر و اپوکسی تهیه و با استفاده از روش الکتروستاتیک اعمال می‌شوند. همچنین مشخص شد، صنعت پوشش پودری با چالش‌ها، مشکلات و رویکردهای جدیدی مانند ارتقا کیفیت و بهبود روش‌های اعمال و پخت، افزایش بهره‌وری و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست مواجه است. برخی از این رویکردها که با هدف زیست‌سازگاری بیشتر و صرفه‌جویی در مصرف منابع فسیلی انجام شده است، شامل استفاده از فناوری تابش امواج الکترومغناطیس (زیرقرمز یا فرابنفش) یا قابلیت پوشش‌دهی سطوح حساس به دما با اعمال پوشش پودری بوده است.



شکل ۱۵- نمایی از حرکت ذرات باردار در پوشش پودری مطابق میدان الکتریکی به سمت مقابل و پشت قطعه [۲۳].

Fig. 15. A view of the movement of the charged powder coating particles towards the front and back of the plate according to the electric field part [23].

در شکل ۱۶ نشان داده شده است. یکی از معضلات سامانه بازیابی این است که تجهیزات باید به‌طور منظم تمیز شوند و برای جلوگیری از آلودگی از صافی‌های مناسب استفاده شود. همچنین، صافی‌ها پس از تغییر فام و نوع رنگ باید تعویض شوند و مخازن تخلیه شوند تا بتوان از هر فام رنگی درست استفاده کرد [۸۲].

یکی دیگر از مشکلات پوشش‌های پودری تغییر رنگ آن‌ها پس از اعمال و پس از پخت است که این موضوع رنگ‌هماندی را بسیار دشوار می‌سازد. همچنین، نمی‌توان از روش‌های محاسباتی مرسوم برای رنگ‌هماندی پوشش‌های پودری استفاده کرد.

رویکرد مهم دیگر، توسعه رزین‌های پودری برای افزایش و گسترش کاربردهای پوشش‌های پودری است، مانند ایجاد قابلیت استفاده از



شکل ۱۶- محفظه ابری الکتروستاتیک برای اعمال و افشانش پوشش پودری با بهره‌وری زیاد [۸۲].

Fig. 16. Electrostatic cloud chamber considered for applying and spraying powder coating with high efficiency [82].

علائم اختصاری

CTBN	Carboxyl-Terminated Butadiene-Acrylonitrile Rubber	PE	Polyethylene
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis	PVC	Poly(vinyl chloride)
EDX	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy	PTFE	Poly(tetrafluoroethylene)
EEW	Epoxy Equivalent Weight	SEM	Scanning Electron Microscope
FDA	Food and Drug Administration	T _g	Glass Transition Temperature
FBE	Fusion Bonded Epoxy	TGIC	Triglycidylisocyanurate
HAA	β-Hydroxyalkyl Amides	USDA	United States Department of Agriculture
MDF	Medium-Density Fibreboard	VOCs	Volatile Organic Compounds
PP	Polypropylene		

۷- مراجع

- Luo Y., Zhu J., Ma Y., and Zhang H., Dry Coating, a Novel Coating Technology for Solid Pharmaceutical Dosage Forms, *Int. J. Pharm.*, **358**, 16-22, 2008.
- Zouari M., Kharrat M., Dammak M., and Barletta M., Scratch Resistance and Tribological Performance of Thermosetting Composite Powder Coatings System: A Comparative Evaluation, *Surf. Coat. Technol.*, **263**, 27-35, 2015.
- Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., and Khorasani M., A Facile Method to Synthesis of a Highly Acrylated Epoxidized Soybean Oil with Low Viscosity: Combined Experimental and Computational Approach, *Polym. Test.*, **115**, 107727, 2022.
- Meng X., Zhu J., and Zhang H., Influences of Different Powders on the Characteristics of Particle Charging and Deposition in Powder Coating Processes, *J. Electrostat.*, **67**, 663-671, 2009.
- Lafabrier A., Fahs A., Louarn G., Aragon E., and Chailan J.-F., Experimental Evidence of the Interface/Interphase Formation between Powder Coating and Composite Material, *Prog. Org. Coat.*, **77**, 1137-1144, 2014.
- Trottier E.C., Affrossman S., and Pethrick R.A., Dielectric Studies of Epoxy/Polyester Powder Coatings Containing Titanium Dioxide, Silica, and Zinc Oxide Pigments., *J. Coat. Technol. Res.*, **9**, 525-539, 2012.
- Takeshita Y., Sawada T., Handa T., Watanuki Y., and Kudo T., Influence of Air-Cooling Time on Physical Properties of Thermoplastic Polyester Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **75**, 584-589, 2012.
- Dumain E.D., Agawa T., Goel S., Toman A., and Tse A.S., Cure Behavior of Polyester-Acrylate Hybrid Powder Coatings, *J. Coat. Technol.*, **71**, 69-75, 1999.
- Iwamura G., Agawa T., Maruyama K., and Takeda H., A Novel Acrylic/Polyester System for Powder Coatings, *Sur. Coat. Int.*, **83**, 285-288, 2000.
- Amefia A., Abu-Ali J., and Barringer S., Improved Functionality of Food Additives with Electrostatic Coating, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **7**, 176-181, 2006.
- Lafabrier A., Fahs A., Louarn G., Aragon E., and Chailan J.-F., Experimental Evidence of the Interface/Interphase Formation between Powder Coating and Composite Material, *Prog. Org. Coat.*, **77**, 1137-1144, 2014.
- Stojanović I., Vinko Š., Vesna A., and Frankica K., Experimental Evaluation of Polyester and Epoxy-Polyester Powder Coatings in Aggressive Media, *Coatings*, **8**, 98, 2018.
- Barletta M. and Bellisario D., Effects of IR Pre-curing Conditions on Wear Resistance of Metal Flake Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **70**, 273-286, 2011.
- Mintsa M., Lecamp L., and Bunel C., A New UV-Curable Powder Coating Based on an Unsaturated Copolyamide 6/11/12, *Eur. Polym. J.*, **45**, 2043-2052, 2009.
- Hadavand B.S., Ataefard M., and Bafghi H.F., Preparation of Modified Nano ZnO/Polyester/TGIC Powder Coating Nanocomposite and Evaluation of Its Antibacterial Activity, *Compos. B: Eng.*, **82**, 190-195, 2015.
- Farshchi N. and Gedan-Smolka M., Polyurethane Powder Coatings: A Review of Composition and Characterization, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **59**, 15121-15132, 2020.
- Du Z., Wen S., Wang J., Yin C., Yu D., and Luo J., The Review of Powder Coatings, *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, **4**, 54, 2016.
- Al-Shroofy M., Zhang Q., Xu J., Chen T., Kaur A.P., and Cheng

- Y.-T., Solvent Free Dry Powder Coating Process for Low-Cost Manufacturing of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ Cathodes in Lithium-Ion Batteries, *J. Power Sources*, **352**, 187-193, 2017.
19. Yang Q., Ma Y., Zhu J., Chow K., and Shi K., An Update on Electrostatic Powder Coating for Pharmaceuticals, *Particuology*, **31**, 1-7, 2017.
 20. Nouri A. and Sola A., Powder Morphology in Thermal Spraying, *J. Adv. Manuf. Process.*, **1**, 10020, 2019.
 21. Du Z., Wen S., Wang J., Yin C., Yu D., and Luo J., The Review of Powder Coatings, *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, **4**, 54-59, 2016.
 22. Prasad L.K., McGinity W.J., and Williams O.R., Electrostatic Powder Coating: Principles and Pharmaceutical Applications, *Int. J. Pharm.*, **505**, 289-302, 2016.
 23. Shenzhen Anfengtai, Powder Coating Line, <https://coatingspray.com/automatic-powder-coating-line>, Available on 25 February 2009.
 24. Matsusaka S., Maruyama H., Matsuyama T., and Ghadiri M., Triboelectric Charging of Powders: A Review, *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 5781-5807, 2010.
 25. Grigoriev A.Y., Kavaliova I.N., Kupreev A.V., and Dmitrichenko E.E., Friction and Wear of Polyamide-6 Powder Coatings Gradient-Filled by Metal Nanofilms, *J. Fric. Wear*, **34**, 107-113, 2013.
 26. Vähä-Nissi M., Characterization of Filled Powders for Powder Coating of Paper, *Powder Technol.*, **279**, 127-133, 2015.
 27. Chow K., Zhu K., Tan R.H., and Heng P.S., Investigation of Electrostatic Behavior of a Lactose Carrier for Dry Powder Inhalers, *Pharm. Res.*, **25**, 2822-2834, 2008.
 28. El-Ghaffar M.A., Abdel-Wahab N., Sanad M., and Sabaa M., High Performance Anti-Corrosive Powder Coatings Based on Phosphate Pigments Containing Poly(o-aminophenol), *Prog. Org. Coat.*, **78**, 42-48, 2015.
 29. Giles S.L., Heller N.W., Clayton C.R., Walker M.E., Wytiaz M.J., and Wynne J.H., Novel Methods of Producing Low-Reflectance Coatings Utilizing Synergistic Effects of Polymer Phase Separation, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 26251-26257, 2016.
 30. Dumain E.D., Agawa T., and Goel S., Cure Behavior of Polyester-Acrylate Hybrid Powder Coatings, *J. Coat. Technol.*, **71**, 69-75, 1999.
 31. Iwamura G., Agawa T., and Maruyama K., A Novel Acrylic/Polyester System for Powder Coatings, *Surf. Coat. Int.*, **83**, 285-288, 2000.
 32. da Silva F.S., Cinca N., Dosta S., Cano I.G., Guilemany J.M., and Benedetti A.V., Cold Gas Spray Coatings: Basic Principles, Corrosion Protection and Applications, *Eclética Química*, **42**, 09-32, 2017.
 33. Sauer D. and McGinity J.W., Influence of Additives on Melt Viscosity, Surface Tension, and Film Formation of Dry Powder Coatings, *Drug Dev. Ind. Pharm.*, **35**, 646-654, 2009.
 34. Yang G., Xie W., Huang M., Champagne V.K., Lee J.-H., Klier J., and Schiffman J.D., Polymer Particles with a Low Glass Transition Temperature Containing Thermoset Resin Enable Powder Coatings at Room Temperature, *Indust. Eng. Chem. Res.*, **58**, 908-916, 2018.
 35. Bush T.B., Khalkhali Z., Champagne V., Schmidt D.P., and Rothstein J.P., Optimization of Cold Spray Deposition of High-Density Polyethylene Powders, *J. Therm. Spray Technol.*, **26**, 1548-1564, 2017.
 36. Dogan E. and Acar A.E., The Use of Anhydride Linkages to Increase the Glass Transition Temperatures of Polymers Containing Carboxyl End Groups: A Perspective in Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **76**, 513-518, 2013.
 37. Pilch-Pitera B., Blocked Polyisocyanates Containing Monofunctional Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) as Crosslinking Agents for Polyurethane Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **76**, 33-41, 2013.
 38. Rijkse K., Curing Powders-How Low Can You Go?, *Met. Finish.*, **99**, 47-50, 2001.
 39. de Lange P.G., *Powder Coatings: Chemistry and Technology*, Vincentz Network, 2004.
 40. Ramis X., Cadenato A., Morancho J., and Salla J., Curing of a Thermosetting Powder Coating by Means of DMTA, TMA and DSC, *Polymer*, **44**, 2067-2079, 2003.
 41. Yoshino S., Ishizuka T., and Agata T., Thermosetting Powder Coating Material and Coated Article, *US Pat. 9862836B2*, 2018.
 42. Noura K., Kato Y., and Ogoshi T., Thermosetting Powder Coating and Method for Forming Thermosetting Powder Coating Film, *Japan Pat. 2002275420A*, 2002.
 43. Agata T., Yoshino S., Ishizuka T., Thermosetting Powder Coating Material, *US Pat. 9550915B2*, 2016.
 44. Jia X., Zhang S., and Liu R., Preparation and Characterization of Carboxyl-Terminated Poly(butadiene-co-acrylonitrile)-Epoxy Resin Prepolymers for Fusion-Bonded-Epoxy Powder Coating, *J. Wuhan Univ. Technol.*, **27**, 694-701, 2012.

45. Kalae M., Akhlaghi S., and Nouri A., Effect of Nano-Sized Calcium Carbonate on Cure Kinetics and Properties of Polyester/Epoxy Blend Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **71**, 173-180, 2011.
46. Piazza D., Lorandi N.P., Pasqual C.I., Scienza L.C., and Zattera A.J., Influence of a Microcomposite and a Nanocomposite on the Properties of an Epoxy-Based Powder Coating, *Mater. Sci. Eng., A*, **528**, 6769-6775, 2011.
47. Vasil'ev V.A., Korolev I.V., and Mashlyakovskii L.N., Effect of Molecular Structure of Epoxy Oligomers with Perfluorinated Fragments on Hydrophobic Properties of Powder Coatings, *Russian J. Appl. Chem.*, **87**, 656-663, 2014.
48. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., and Mir Mohamad Sadeghi G., Soundproofing Flexible Polyurethane Foams: The Impact of Polyester Chemical Structure on the Microphase Separation and Acoustic Damping, *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 46744, 2018.
49. Shi Q., Huang W., Zhang Y., Zhang Y., Xu Y., and Guo G., Curing of Polyester Powder Coating Modified with Rutile Nano-Sized Titanium Dioxide Studied by DSC and Real-Time FT-IR, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **108**, 1243-1249, 2011.
50. Mirabedini S.M. and Kiamanesh A., The Effect of Micro and Nano-Sized Particles on Mechanical and Adhesion Properties of a Clear Polyester Powder Coating, *Prog. Org. Coat.*, **76**, 1625-1632, 2013.
51. Czachor-Jadacka D. and Pilch-Pitera B., Progress in Development of UV Curable Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **158**, 106355, 2021.
52. Mafi R., Mirabedini S.M., Naderi R., Attar M.M., Effect of Curing Characterization on the Corrosion Performance of Polyester and Polyester/Epoxy Powder Coatings, *Corros. Sci.*, **50**, 3280-3286, 2008.
53. Bhadu M.K., Guin A.K., Singh V., and Choudhary S.K., Corrosion Study of Powder-Coated Galvanised Steel, *ISRN Corros.*, **2013**, 464710, 2013.
54. Kühnert I., Gedan-Smolka M., Fischer M., Scholz P., Landgrebe D., and Garay D., Prefinished Metal Polymer Hybrid Parts, *Technol. Lightweight Struct.*, **1**, 89- 97, 2017.
55. Alimam H., Hinnawi M., Pradhan P., and Alkassar Y., ANN and ANFIS Models for Prediction of Abrasive Wear of 3105 Aluminium Alloy with Polyurethane Coating, *Tribol. Ind.*, **38**, 2016.
56. Samimi A. and Zarinabadi S., Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines, *Int. J. Sci. Invest.*, **1**, 43-45, 2012.
57. Chattopadhyay D.K. and Raju K., Structural Engineering of Polyurethane Coatings for High Performance Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **32**, 352-418, 2007.
58. Ulrich H., Polyurethanes, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley and Sons, **4**, 2002.
59. Huang Q., Zhang H., and Zhu J., Flow Properties of Fine Powders in Powder Coating, *Particuology*, **8**, 19-27, 2010.
60. Wicks D.A. and Wicks Jr Z.W., Blocked Isocyanates III: Part B: Uses and Applications of Blocked Isocyanates, *Prog. Org. Coat.*, **41**, 1-83, 2001.
61. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., and Mir Mohamad Sadeghi G., Acoustic Damping Flexible Polyurethane Foams: Effect of Isocyanate Index and Water Content on the Soundproofing, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47363, 2018.
62. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., and Mir Mohamad Sadeghi G., Soundproofing Flexible Polyurethane Foams: Effect of Chemical Structure of Chain Extenders on Micro-Phase Separation and Acoustic Damping, *J. Cell. Plast.*, **56**, 167-185, 2020.
63. Li G., Feng L., Tong P., and Zhai Z., The Properties of MWCNT/ Polyurethane Conductive Composite Coating Prepared by Electrostatic Spraying, *Prog. Org. Coat.*, **90**, 284-290, 2016.
64. Heller N.W., Clayton C.R., Giles S.L., Wynne J.H., Walker M.E., and Wytiaz M.J., Characterization of Immiscibly Blended Polyurethane Coatings Part 1: Selective Staining for Enhanced Micro-Raman Spectroscopy, *J. Coat. Technol. Res.*, **14**, 163-175, 2017.
65. Abdollahi Baghban S. and Khorasani M., Investigation of Acoustic Adsorption Behavior and Cell Wall Roughness of Flexible Polyurethane Foams, *J. Adv. Mater. Novel Coat.*, **6**, 1733-1739, 1397.
66. Wicks Jr Z.W., Blocked Isocyanates, *Prog. Org. Coat.*, **3**, 73-99, 1975.
67. Wicks D.A., Wicks Jr Z.W., Blocked Isocyanates III: Part A. Mechanisms and Chemistry, *Prog. Org. Coat.*, **36**, 148-172, 1999.
68. Wicks Jr Z.W., New Developments in the Field of Blocked Isocyanates, *Prog. Org. Coat.*, **9**, 3-28, 1981.
69. Frizelle G., Blocked Polyurethane Powder Coating Compositions, *US Pat. 3857818*, 1974.
70. Light Jr F.W., Hood J.D., and Chang Y.-H., Polyurethane

- Powder Coating Compositions, *US Pat. 4859760*, 1989.
71. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., and Mir Mohamad Sadeghi G., Soundproofing Performance of Flexible Polyurethane Foams as a Fractal Object, *J. Polym. Res.*, **27**, 62, 2020.
 72. Pilch-Pitera B., Kędzierski M., Olejnik E., and Zapotoczny S., Structure and Properties of Polyurethane-Based Powder Clear Coatings Systems Modified with Hydrotalcites, *Prog. Org. Coat.*, **95**, 120-126, 2016.
 73. Rossi S., Fedel M., Petrolli S., and Deflorian F., Accelerated Weathering and Chemical Resistance of Polyurethane Powder Coatings, *J. Coat. Technol. Res.*, **13**, 427-437, 2016.
 74. Rossi S., Fedel M., Deflorian F., and Feriotti A., Anti-Graffiti Properties of Polyurethane Powder Coatings, *J. Test. Eval.*, **45**, 1192-1200, 2017.
 75. Pilch-Pitera B., Kozakiewicz J., Ofat I., Trzaskowska J., and Špírková M., Siliconeacrylic Hybrid Aqueous Dispersions of Core-Shell Particle Structure and Corresponding Silicone-Acrylic Nanopowders Designed for Modification of Powder Coatings and Plastics. Part III: Effect of Modification with Selected Silicone-Acrylic Nanopowders on Properties of Polyurethane Powder Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **78**, 429-436, 2015.
 76. Abdollahi Baghban S. and Khorasani M., High Durable Latex-Modified-Concretes: The Effect of Minimum Film Formation Temperature of Acrylic-Styrene Latex, *Prog. Color. Color. Coat.*, **6**, 181-195, 2023.
 77. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Bagheri-Khoulenjani S., and Khorasani M., A Highly Efficient Microwave-Assisted Synthesis of an LED-Curable Methacrylated Gelatin for Bio-applications, *RSC Adv.*, **11**, 14996-15009, 2021.
 78. Noorderover B., van Staaldin V.G., Duchateau R., Koning C.E., van Benthem R.A.T.M., Mak M., Heise A., Frissen A.E., and van Haveren J., Co- and Terpolyesters Based on Isosorbide and Succinic Acid for Coating Applications: Synthesis and Characterization, *Biomacromolecules*, **7**, 3406, 2006.
 79. Gioia C., Vannini M., Marchese P., Minesso A., Cavalieri R., Colonna M., and Celli A., Sustainable Polyesters for Powder Coating Applications from Recycled PET, Isosorbide and Succinic Acid, *Green Chem.*, **16**, 1807, 2014.
 80. Gioia C., Minesso A., Cavalieri R., Marchese P., Celli A., Colonna M., Powder Coatings for Indoor Applications from Renewable Resources and Recycled Polymers, *J. Coat. Technol. Res.*, **12**, 555-562, 2015.
 81. Puig M., Gimeno M.J., Gracenea J.J., and Suay J.J., Anticorrosive Properties Enhancement in Powder Coating Duplex Systems by Means of ZMP Anticorrosive Pigment. Assessment by Electrochemical Techniques, *Prog. Org. Coat.*, **77**, 1993-1999, 2014.
 82. <https://www.powdercoatedtough.com/News/ID/5091/Technology-Interchange-Choosing-the-Right-Powder>, Available on 30 January 2019.
 83. Puig M., Cabedo L., Gracenea J.J., Jimenez-Morales A., Gamez-Perez J., and Suay J.J., Adhesion Enhancement of Powder Coatings on Galvanised Steel by Addition of Organo-Modified Silica Particles, *Prog. Org. Coat.*, **77**, 1309-1315, 2014.
 84. Rossi S., Fedel M., Petrolli S., and Deflorian F., Characterization of the Anti-Graffiti Properties of Powder Organic Coatings Applied in Train Field, *Coating*, **7**, 67, 2017.
 85. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., and Bagheri-Khoulenjani S., Selfstratifying Behavior of a Novel Light-Curable Coating with Gradient Hydrophobic Properties: Computational and Experimental Study, *Prog. Org. Coat.*, **159**, 106435, 2021.
 86. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., and Bagheri-Khoulenjani S., Design of Different Self-Stratifying Patterns in a VOC-Free Light-Curable Coating Containing Bio-Renewable Materials: Study on Formulation and Processing Conditions, *Prog. Org. Coat.*, **161**, 106519, 2021.
 87. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., and Bagheri-Khoulenjani S., Tailoring a Variety of Self-Stratifying Patterns in a Light Curable Coating on the Substrates with Different Surface Free Energies, *Prog. Org. Coat.*, **171**, 107023, 2022.
 88. Abdollahi Baghban S., A Review on the Renewable Oligomers and Monomers for Preparation of the Radiation Coatings, *J. Stud. Color World*, **8**, 51-57, 2019.
 89. Khan M.K.I., Schutyser M.A.I., Schroën K., and Boom R.M., Electrostatic Powder Coating of Foods-State of the Art and Opportunities., *J. Food Eng.*, **111**, 1-5, 2012.