



The Effect of Inlet Air Temperature and Volume Flowrate on Drying Rate, Thermophysical Properties and Flammability of Epoxy-based Coating Powder: A Comparative Study on a Fluidized Bed Dryer and Thermal Oven

A. R. Zafari¹, A. R. Bahramian^{2*}

1- M. Sc. Student of Science in Chemical Engineering, Hamedan University of Technology

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Hamedan University of Technology

Email: bahramian@hut.ac.ir

Abstract

In this study, the effect of temperature and volume flowrate of inlet air on the drying rate, thermophysical properties, and flammability of epoxy-based coating powder containing low percentages of solvent is compared in a fluidized bed dryer and thermal oven. The results of the burning speed test of the epoxy base powder indicated a decrease in the burning speed of the sample dried in the fluidized bed dryer (drying sample) compared to the sample dried in the oven (control sample). Based on experiments, the maximum degradation temperature of the test sample was higher than that of the control sample. Also, the starting degradation temperature of the test sample was higher than the control sample. The experimental data showed that the limited oxygen index in the sample of the dryer was higher than in the control sample. Therefore, the use of a fluidized bed dryer is preferred due to the creation of moisture-thermal properties and more suitable flammability of the powder compared to the control sample. In the fluidized bed dryer, by increasing the inlet air temperature, the drying rate of the test sample increased so that at 60 °C the content of the remaining solvent in the powder reached the desired value. In the temperature range of 55-60 °C, with increasing the inlet air temperature and volume flowrate, the drying rate of the fluidized bed dryer increased significantly, while the flammability of the sample decreased. Therefore, the temperature of 55 °C and the volumetric air flowrate of 0.16 m³/s was determined as the optimal drying values of the epoxy-based powder in the fluidized bed dryer. A reduction in the volume flowrate of air during the drying stages had a significant effect on achieving the maximum drying rate of the powder. The results showed that the secondary drying process of epoxy-based coating powder can be an effective method to achieve the minimum content of the remaining solvent and a high-quality powder with stable thermophysical properties.

Received: 7 August 2024

Accepted: 14 November 2024

Page Number: 63-76

Keywords:

Epoxy-Based Coating Powder,
Fluidized Bed Dryer,
Temperature and Volume Flowrate Effect,
Solvent Removal,
Thermal Properties and Flammability

Please Cite this Article Using:

Zafari, A. R., & Bahramian, A. R. (2025). The Effect of Inlet Air Temperature and Volume Flowrate on Drying Rate, Thermophysical Properties and Flammability of Epoxy-based Coating Powder: A Comparative Study on a Fluidized Bed Dryer and Thermal Oven. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(141), 63-76, [In Persian].



تأثیر دمای هوای ورودی و نرخ حجمی جریان بر نرخ خشک شدن، خواص ترموفیزیکی و اشتعال پذیری پودر پوششی پایه اپوکسی: مقایسه عملکرد خشک کن بستر سیال و آون حرارتی

علیرضا ظفری^۱، علیرضا بهرامیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی همدان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی همدان

پیام نگار: bahramian@hut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، تأثیر دما و نرخ حجمی هوای ورودی بر نرخ خشک شدن، خواص ترموفیزیکی و اشتعال پذیری پودر پوششی پایه اپوکسی حاوی درصد های پایین حلال در یک خشک کن بستر سیال و آون حرارتی، مقایسه شد. نتایج حاکی از کاهش سرعت سوزش نمونه خشک شده در خشک کن بستر سیال (نمونه آزمایش) در مقایسه با نمونه خشک شده در آون حرارتی (نمونه کنترل) بود. بیشینه دمای تخریب نمونه خشک شده در خشک کن بیشتر از نمونه کنترل بود. همچنین، دمای شروع به تخریب نمونه خشک کن بیشتر از نمونه کنترل بود. آزمون تجربی نشان داد که شاخص حدی اکسیژن در نمونه آزمایش بالاتر از نمونه کنترل است. بنابراین، استفاده از خشک کن بستر سیال با توجه به ایجاد خواص رطوبتی- گرمایی و اشتعال پذیری مناسب تر پودر نسبت به نمونه خروجی از آون حرارتی ترجیح داده می شود. در خشک کن بستر سیال، با افزایش دمای هوای ورودی به خشک کن بستر سیال، نرخ خشک شدن نمونه افزایش یافت، به طوری که در دمای 60°C محتوای حلال باقی مانده درون پودر به مقدار مطلوب رسید. در محدوده دمایی $55-60^{\circ}\text{C}$ با افزایش دما و نرخ حجمی هوای ورودی به خشک کن بستر سیال، نرخ خشک شدن نیز به طور چشم گیری افزایش یافت، اما میزان اشتعال پذیری نمونه آزمایش کاهش نشان داد. بنابراین، دمای 55°C و نرخ حجمی هوای $0.16\text{ m}^3/\text{s}$ به عنوان مقادیر بهینه خشک شدن پودر پایه اپوکسی در خشک کن بستر سیال تعیین شد. استفاده از روند کاهش نرخ حجمی جریان هوا در طی مراحل خشک شدن تأثیر به سزایی بر دستیابی به بیشینه نرخ خشک شدن ذرات داشت. نتایج نشان داد که فرایند خشک کردن ثانویه پودر پوششی پایه اپوکسی به وسیله خشک کن بستر سیال، می تواند در بهبود کیفیت محصول پس از مرحله اولیه پخت، به منظور دستیابی به کمینه محتوای حلال باقی مانده و رسیدن به پودر با خواص ترموفیزیکی ثابت، تأثیرگذار باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

شماره صفحات: ۶۳ تا ۷۶

کلیدواژه ها:

پودر پوششی پایه اپوکسی، خشک کن بستر سیال، اثر دما و نرخ حجمی هوا، حلال زدایی، خواص گرمایی و اشتعال پذیری

* همدان، دانشگاه صنعتی، دانشکده مهندسی شیمی و علوم پایه، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

ظفری، علیرضا، و بهرامیان، علیرضا. (۱۴۰۴). تأثیر دمای هوای ورودی و نرخ حجمی جریان بر نرخ خشک شدن، خواص ترموفیزیکی و اشتعال پذیری پودر پوششی پایه اپوکسی: مقایسه عملکرد خشک کن بستر سیال و آون حرارتی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۴۱): ۶۲-۷۶.

۱. مقدمه

رزین اپوکسی، به‌عنوان یک پلیمر گرماسخت دارای ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی حاوی گروه‌های عاملی اپوکساید است که از پیش‌سازهای حاوی گروه‌های اکسیران یا اپوکسی به‌دست‌می‌آید [۱ و ۲]. اصطلاح اپوکسی برای توصیف طیف وسیعی از مونومرهای (تکپارها) حاوی یک گروه اپوکسایدی استفاده می‌شود، درحالی‌که رزین‌های اپوکسی به‌دسته‌ای از مولکول‌های حاوی حداقل دو گروه اپوکساید اشاره دارد [۳ و ۴]. رزین اپوکسی عموماً ماده‌ای با ساختار شیشه‌ای است که در دمای اتاق نیز حالت شیشه‌ای خود را حفظ می‌کند [۵ و ۶]. از مهم‌ترین موارد استفاده از رزین‌های اپوکسی، کاربرد آن‌ها در پودرهای پوششی، رنگدانه‌ها، پرکننده‌ها و به‌عنوان مواد افزودنی است که در قالب پودرهای خشک به بازار عرضه می‌شوند. رزین اپوکسی به‌دلیل خواص مکانیکی خوب، نظیر: مقاومت کششی و فشاری مناسب و خواص شیمیایی عالی با تمایل زیاد به افزایش چگالی اتصال متقابل در ساختار شبکه پلیمری خود، می‌تواند در ساخت انواع چسب‌ها و کامپوزیت‌های استفاده‌شونده در پره توربین‌ها، قطعات خودرو و الکترونیکی، ادوات مکانیکی و صنعت ساختمان‌سازی به‌کار رود [۷-۹ و ۳].

دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی با افزایش جزء فنولیک آن افزایش می‌یابد، به طوری که دمای انتقال شیشه‌ای آن در حضور مقادیر ۱۰ و ۳۰ درصد وزنی جزء فنولیک، به ترتیب برابر ۳۷۳ و ۳۸۳ درجه کلوین تعیین شده است [۱۰]. با افزایش جزء فنولیک، درصد کربن باقی‌مانده (زغال) نمونه اپوکسی افزایش خواهد یافت که آن را برای دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر مناسب‌می‌سازد [۹]. در خصوص چسب‌های اپوکسی نسبت بهینه جزء اپوکسی به عامل حلالی فنولیک تحت تأثیر عواملی هم‌چون دما و مدت زمان پخت و نسبت دو گونه فرار می‌گیرد. اسماعیل و همکارانش دریافتند که نسبت یک به دو رزین اپوکسی به جزء فنولیک در دمای ۱۵۰ °C طی بازه زمانی ۸۰ دقیقه برای دستیابی به فرمول بهینه چسب اپوکسی مناسب است [۱۱].

فتحی‌زاده و بهشتی به بررسی خواص مکانیکی- گرمایی و اشتعال‌پذیری سه نوع رزین پلی‌استر غیراشباع ارتو، ایزو و وینیل‌استر و رزین اپوکسی با استفاده از آزمون‌های تجزیه گرماوزن‌سنجی (TGA)، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

و آزمون تعیین سرعت سوزش، پرداختند [۱۲]. نتایج این پژوهش نشان داد که رزین وینیل‌استر، خواص بهینه‌ای از نظر مکانیکی- گرمایی و مقاومت در برابر اشتعال درمیان رزین‌های پلی‌استر دارد [۱۲]. درمقایسه رزین اپوکسی با انواع پلی‌استر مشاهده شد که رزین اپوکسی سرعت سوزش بیشتری دارد؛ اما مقدار کربن باقی‌مانده آن کمتر (۱۲/۴٪) و LOI آن بیشتر (۲۰/۲٪)، در نتیجه از پایداری گرمایی زیادتری درمقایسه با رزین‌های پلی‌استر برخوردار است [۱۳].

از جمله روش‌های بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و مقاومت در برابر نفوذ رطوبت در رزین اپوکسی، استفاده از مواد افزودنی نظیر فیبر کربنی [۱۴]، نانوفیبر سلولزی [۳] و استفاده از نانوذرات سیلیکا [۱۵] است. هرچند نانوکامپوزیت حاصل خواص مکانیکی/حرارتی بهتری مانند افزایش مدول کشسانی، استحکام کششی و ازدیاد طول و افزایش بیشینه دمای تخریب درمقایسه با نمونه رزین خالص از خود نشان می‌دهد [۱۴]، اما منجر به تغییر برخی از خواص مکانیکی- حرارتی پودر پوششی نظیر دمای شیشه‌ای به مقادیر بیشتر می‌شود [۱۶].

پودرهای ترموست اغلب دارای پیوندهای قوی شیمیایی با ساختارهای شبکه‌ای متقاطع هستند که از راه فرایند پخت در محدوده دمایی ۱۹۰-۲۰۰ °C طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای شکل می‌گیرند [۱۷]. در خصوص قطعات بزرگ تولیدی برای صنایع خودروسازی یا خطوط لوله انتقال، رسیدن به دمای ۲۰۰ °C برای فرایند پخت دشوار است. لذا، مواد ترموست با دمای پخت پایین (۱۳۵ °C) مد نظر است. دمای بالای مورد نیاز برای عملیات پخت پودرهای پوششی بر پایه اپوکسی، منجر به صرف انرژی بالا و حرارت لازم برای فرایند پخت در مواردی که سطح پوشش به حرارت حساس باشد، منجر به آسیب می‌شود. استفاده از شگرد اختلاط درصد، جزئی از نانوذرات سیلیکا با پودر پوششی پس از فرایند خشک کردن، حین پاشش پودر روی سطح مد نظر است که علاوه بر بهبود کیفیت پوشش، منجر به کاهش دمای پخت پودر پوششی به مقادیر کمتر از ۱۵۰ °C می‌شود [۱۸].

از دیگر روش‌های بهبود کیفیت پخت پودر پوششی پس از مرحله پخت اولیه، استفاده از خشک‌کن ثانویه است که برای کنترل مقدار حلال باقی‌مانده و رسیدن به پودر پایه اپوکسی با خواص مد نظر تأثیر

1. Limiting Oxygen Index

به‌سزایی خواهد داشت. خشک کردن شامل انتقال هم‌زمان جرم و حرارت ارزراه حذف آب یا حلال دیگر از درون جسم جامد مرطوب است [۱۹ و ۲۰]. برای خشک کردن هر ماده، مناسب‌ترین خشک‌کن به‌کارگرفته‌می‌شود تا کمترین افت کیفیت در محصول به‌وجودآید و عملیات در حداقل زمان ممکن انجام‌پذیرد [۲۱ و ۲۲]. لذا، جهت بهبود شرایط عملیاتی مناسب در فرایند خشک کردن، باید روش‌های خشک کردن را بسته‌به نوع ماده، ارزیابی کرد [۲۳].

استفاده از بسترهای سیال برای خشک کردن مواد باتوجه‌به برتری‌های زیاد آن از قبیل نرخ بالای انتقال جرم و حرارت و جلوگیری از کلوخگی مواد، به‌طور گسترده‌ای نظر محققان و صنعتگران را به‌خود جلب کرده‌است. بسترهای سیال، براساس حرکت جریان هوای گرم از پایین بستر و برخورد آن با جسم جامد مرطوب قرارگرفته در بستر طبق انتقال هم‌زمان جرم و حرارت عمل‌می‌کنند [۲۴]. حین شناوری ذرات، میزان رطوبت جسم جامد کاهش‌می‌یابد و این فرایند تا مرحله خشک شدن کامل جسم ادامه‌می‌یابد. این رفتار بسترهای سیال، انتقال حرارت مناسب را در درون سامانه فراهم‌می‌کند. هم‌چنین، یکنواختی حرارتی ذرات، مشابه گاز ورودی به بستر این امکان را فراهم‌می‌کند تا بتوان شرایط دمایی همگنی در بستر فراهم کرد. مطالعات مختلفی درخصوص نقش خشک‌کن‌های بستر سیال در خشک کردن رزین‌های پلیمری انجام‌گرفته‌است [۲۲-۲۵]. نتایج این تحقیقات، درخصوص عملکرد هریک از خشک‌کن‌های یادشده منجر به نتایج متناقضی درخصوص مشخصه‌های عملیاتی نظیر: تأثیر زمان، دمای هوا و نرخ حجمی جریان هوای ورودی بر میزان کاهش محتوای رطوبت نمونه نشان‌داد. براساس نتایج، عملکرد نامطلوب خشک‌کن بستر سیال صنعتی در مورد خشک کردن در ظرفیت کم مشاهده‌شد که نتیجه آن، مصرف بیشتر انرژی برای دستیابی به میزان کیفیت مد نظر نمونه نهایی بود [۲۳].

در این پژوهش، تأثیر دما و نرخ حجمی هوای ورودی بر نرخ خشک شدن، سرعت سوزش، شاخص حدی اکسیژن و اشتعال‌پذیری پودر پوششی برپایه اپوکسی در حضور حلال باقی‌مانده در آن در یک خشک‌کن بستر سیال (نمونه آزمایش) و آون حرارتی (نمونه کنترل) مقایسه‌شد. دمای هوای ورودی در چهار سطح °C ۶۰، ۵۵، ۵۰،

۴۵ و نرخ حجمی هوای ورودی در سه سطح m^3/s ۰/۱۶، ۰/۱۴ و ۰/۱۲ در نظر گرفته‌شد. عملکرد دو روش خشک کردن با تعیین میزان محتوای حلال باقی‌مانده (تغییرات وزن نمونه‌ها)، تجزیه گرماسنجی و تعیین شاخص حدی اکسیژن و آزمون سرعت سوزش نمونه خشک‌شده در خشک‌کن و نمونه کنترل مقایسه‌شد. در نهایت، شرایط عملیاتی بهینه برای خشک کردن پودر پوششی ارائه‌شد.

۲. شرح مواد، تجهیزات و روش آزمایش

۲-۱ مواد لازم و آماده‌سازی نمونه‌ها

پودر پوششی پایه اپوکسی از رزین اپوکسی ML-۵۰۵ (چگالی g/cm^3 ۱/۵۴ و گرانروی cP ۱۴۵۰) و سخت‌کننده HA-11 از محصولات شرکت مهندسی مکرر تهیه‌شد. در این رزین، از هیچ‌گونه حلال‌ها و رقیق‌کننده‌های غیرواکنشگر استفاده‌نشده تا ساختار پلیمری محصول پس از واکنش پایدار باقی‌بماند و دچار هیچ‌گونه تغییرات حجمی و وزنی نشود.

۲-۲ نحوه تهیه نمونه‌ها

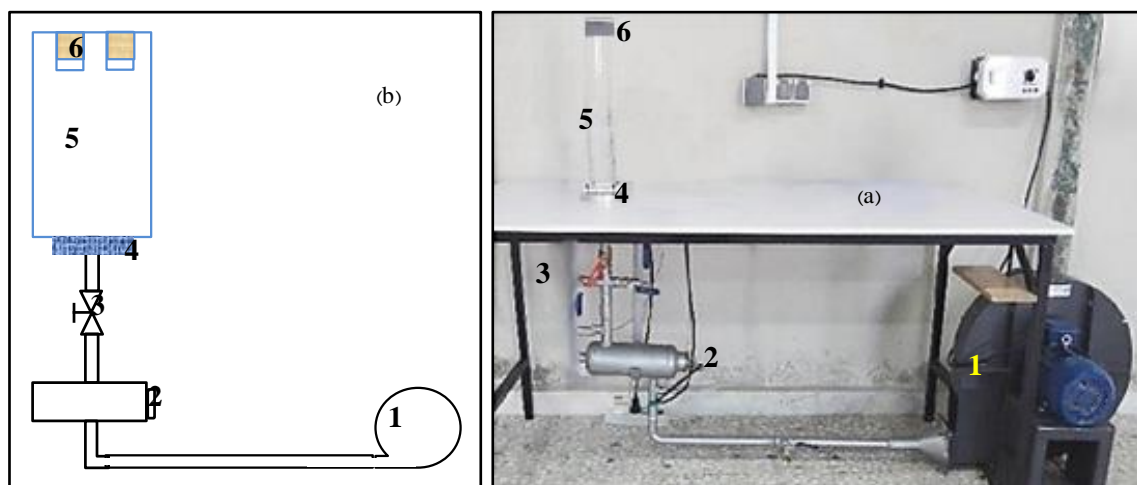
در ابتدا، مقدار مشخصی رزین اپوکسی بانسبت یک‌به دو رزین اپوکسی به‌گونه سخت‌کننده مخلو شد. سپس، نمونه‌ها در قالب‌های سیلیکونی شکل ریخته شد و طی بازه زمانی ۴ ساعته در دمای محیط خشک‌شد. پس از آن نمونه‌ها از قالب خارج و پس از خرد کردن برای حلال‌زدایی نمونه پودر حاصل به دو بخش تقسیم‌شد. بخش اول به مدت ۲ ساعت در آون حرارتی تحت دما در محدوده °C ۴۵-۶۰ برای خشک شدن نهایی قرارداد شدند. نمونه پودر خروجی از آون حرارتی به‌عنوان نمونه گروه کنترل نامگذاری‌شد. در بخش دوم، نمونه پودری شکل در دستگاه خشک‌کن بستر سیال (نمونه آزمایش) قرار گرفت و آزمایش‌های خشک کردن نمونه تحت شرایط عملیاتی مختلف در یک خشک‌کن بستر سیال انجام‌شد. مطابق آزمون الک ابعاد ذرات پودر پوششی جامد سفید رنگ در محدوده اندازه ذرات ۱-۵ mm شکل هندسی نامنظم (میزان متوسط کرویت در حدود ۰/۶) قرار داشت. مطابق طبقه‌بندی گلدارت، پودر مذکور در محدوده مرز بین گروه‌های B و D این طبقه‌بندی قرار می‌گیرد.

۲-۳ خشک کن بستر سیال و آزمایش های آن

به منظور خشک کردن پودر پوششی پایه پوکسی، از یک خشک کن بستر سیال در شرکت صدر رزین واقع در شهرک صنعتی گرمسار استفاده شد. شکل (۱) نمای حقیقی و طرحواره اجزای تشکیل دهنده سامانه خشک کن را نشان می دهد. محفظه خشک کن از جنس شیشه پیرکس با مختصات استوانه ای شکل به قطر ۷/۸ cm و طول ۱۸ cm ساخته شده است. در آغاز شناورسازی ذرات، در هر مرحله ۱۰۰ گرم پودر پوششی پایه پوکسی مرطوب توزین شد و به درون محفظه خشک کن ریخته شد. دمنده، هوا را از محیط اطراف مکش کرد و با سرعت بیشینه $3/5 \text{ m/s}$ به داخل یک گرمکن الکتریکی هدایت کرد. گرمکن الکتریکی شامل المنت های حرارتی با توان حرارتی 3000 W است و می تواند هوای داغ را تا دمای 200°C تأمین کند. کنترل کننده دما (مدل XH-W3001) برای اندازه گیری و کنترل دما، می تواند دمای هوای ورودی را با دقت $\pm 1^\circ \text{C}$ در مقدار دلخواه ثابت نگه دارد.

برای آماده سازی دستگاه، در ابتدا کلیه مشخصه های آزمایش، نظیر دمای المنت های حرارتی و دور دمنده و سرعت هوای عبوری از بستر تنظیم شد. بعد از تنظیم مشخصه ها، قبل از شروع هر آزمایش برای اطمینان یافتن از انجام صحیح آزمایش، ۱۵ دقیقه قبل از شروع آزمایش، خشک کن روشن شد تا به وضعیت یکنواخت و پایدار برسد.

سپس، نمونه ها در محفظه خشک کن قرار گرفت و فرایند خشک شدن رخ داد. لازم به ذکر است که نمونه ها قبل از قرار گرفتن در دستگاه خشک کن به وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت $0/001$ گرم توزین شدند. برای انجام آزمایش های خشک کردن در بستر سیال، دمای هوای ورودی در چهار سطح 45°C ، 50°C ، 55°C و 60°C و نرخ حجمی هوای ورودی در سه سطح $0/16 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $0/14 \text{ m}^3/\text{s}$ و $0/12 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد. با توجه به این که دمای انتقال شیشه ای پودر پوششی پایه پوکسی بیشتر از 40°C گزارش شده است، لذا دماهای 45°C و 60°C به ترتیب به عنوان کمینه و بیشینه دمای پخت ثانویه پودر پوششی - مطابق مقادیر گزارش شده در مراجع - انتخاب شدند [۲۴]. افزایش دمای خشک کردن پودر به بالای دمای انتقال شیشه ای آن افزایش احتمال ذوب شدن و به هم چسبیدن ذرات را به دنبال دارد [۲۴]. نحوه انتخاب محدوده نرخ حجمی جریان هوا در محدوده $0/16 \text{ m}^3/\text{s}$ - $0/12 \text{ m}^3/\text{s}$ بر مبنای حداقل سرعت شناوری پودر پوششی با توزیع اندازه ذرات گسترده درون بستر سیال انتخاب شد. تمامی آزمایش ها برای دستیابی به نتایج معتبر سه مرتبه تکرار شد. فرایند خشک کردن تا رسیدن محتوای حلال باقی مانده در نمونه پودر پوششی پایه پوکسی به کمتر از $0/2$ درصد ادامه یافت. بدین ترتیب، نمونه های گروه کنترل و گروه آزمایش برای آنالیز و مشخصه یابی آماده شد.



شکل ۱. (a) نمای حقیقی خشک کن بستر سیال و (b) نمای طرحواره اجزای تشکیل دهنده سامانه [۱: کمپرسور، ۲: گرمکن، ۳: شیر تنظیم جریان هوا، ۴: توزیع کننده جریان، ۵: محفظه خشک کن بستر سیال، ۶: فیلتر نایلونی].

Figure 1. (a) The real image of the fluidized bed dryer and (b) its schematic view consisting of system components [1: compressor, 2: heater, 3: airflow adjustment valve, 4: air distributor, 5: Fluidized bed dryer chamber, 6: nylon filter].

۲-۴ آنالیز و مشخصه‌یابی نمونه‌ها

خواص ترموفیزیکی و اشتعال‌پذیری نمونه‌های کنترل و آزمایش بررسی شد. برای این منظور، محتوای حلال باقی‌مانده، سرعت سوزش، تجزیه‌گرماوزن‌سنجی^۱ و شاخص حدی اکسیژن نمونه‌ها تعیین شد.

۲-۴-۱ آزمایش‌های وزن‌سنجی

قبل و پس از خشک‌کردن، وزن نمونه‌ها با ترازوی دقیق دیجیتالی، مشخص و یادداشت شد. رطوبت نمونه‌ها در زمان‌های مختلف با استفاده از رابطه (۱) حساب شد [۲۶].

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

در این رابطه M_d محتوای حلال باقی‌مانده، W_w وزن نمونه‌تر و W_d وزن نمونه کاملاً خشک برحسب گرم است. نرخ خشک‌شدن نمونه‌ها (منحنی مشخصه خشک‌شدن) با استفاده از داده‌های حاصل از درصد کاهش محتوای حلال خروجی از نمونه‌ها در واحد زمان حساب شد [۲۶].

$$R = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

در این رابطه R نرخ خشک‌شدن نمونه (درصد کاهش محتوای حلال در واحد ساعت)، $M_{t+\Delta t}$ محتوای حلال باقی‌مانده در نمونه در لحظه $t+\Delta t$ ، M_t محتوای حلال باقی‌مانده در نمونه در لحظه t (%) و Δt بازه زمانی طی شده برای کاهش محتوای حلال باقی‌مانده در نمونه‌ها برحسب ساعت است. نمونه‌گیری از سامانه خشک‌کن بستر سیال، با یک قاشق نمونه‌گیر انجام گرفت. در هر بار اندازه‌گیری، وزن نهایی پودر خشک‌شده درون محفظه اندازه‌گیری شد. تفاوت وزن اولیه پودر پوششی درون (۱۰۰ گرم) نسبت به وزن نهایی آن در هر یک از شرایط عملیاتی تعیین شد.

۲-۴-۲ آزمون سرعت سوزش

آزمون سرعت سوزش (UL-94 HB) طبق استاندارد ASTM D ۶۳۵ انجام گرفت. مطابق این آزمون، شعله‌ای به طول ۲ mm به مدت

1. Thermal Gravimetric Analysis

۳۰ دقیقه زیر یک ظرف نمونه‌آزمون که روی توری ریز قرار گرفته به‌طور افقی قرار می‌گیرد و سپس، از آن دور می‌شود. در این مرحله، اگر نمونه شعله‌ور شود و تا فاصله ۲۵ mm از لبه بسوزد، زمان سنج روشن و زمان سوختن نمونه تا رسیدن شعله به فاصله ۱۰۰ mm از لبه، ثبت و محاسبات لازم انجام می‌شود، در غیر این حالت عددی گزارش نمی‌شود.

۲-۴-۳ تجزیه‌گرماوزن‌سنجی

تجزیه‌گرماوزن‌سنجی برای اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه به‌عنوان تابعی از دما به‌کار می‌رود. تغییرات وزن نمونه‌ها به‌کمک دستگاه و به‌روش گرماوزن‌سنجی (TGA, SHIMADZU) تعیین می‌شود. وزن نمونه‌ها با سرعت گرمادهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ از دمای محیط تا 60°C در شرایط جو نیتروژن تعیین شد. در تجزیه‌گرماسنجی مقادیر $T_5\%$ (دمایی که در آن وزن نمونه به ۹۵٪ وزن اولیه می‌رسد)، T_{max} (دمایی که در آن حداکثر سرعت تخریب رخ می‌دهد) و T_f (دمای نهایی که در آن نمونه به وزن ثابتی می‌رسد) تعیین می‌شود.

۲-۴-۴ شاخص حدی اکسیژن

مقادیر LOI نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D ۶۳۵ انجام شد. در این آزمون، نمونه‌آزمایش در یک ستون شیشه‌ای به طول ۱۵۰ mm و قطر ۵ mm پر می‌شود. غلظت اکسیژن در ترکیبی از اکسیژن و نیتروژن تغییر داده و رفتار اشتعال‌پذیری نمونه بررسی می‌شود. LOI به‌عنوان کمترین غلظت اکسیژن شناخته می‌شود که در دمای محیط باعث سوختن نمونه به مدت ۳ دقیقه شد. نمونه با LOI بیشتر، اشتعال‌پذیری کمتری دارد. مقدار کربن (زغال) باقی‌مانده پس از احتراق، به‌عنوان مانع فیزیکی در برابر نفوذ اکسیژن و گرما به پودر پلیمری عمل می‌کند و از ادامه تخریب آن جلوگیری می‌کند. افزون‌براین، زغال مانع رسیدن ترکیبات فرار اشتعال‌پذیر حاصل از تخریب گرمایی رزین به فاز گازی نیز می‌شود.

۳. بحث و نتایج

در این بخش ابتدا مقایسه نتایج تأثیر شرایط عملیاتی بر محتوای حلال باقی‌مانده ناشی از فرایند پخت طی خشک‌شدن در خشک‌کن بستر سیال، ارزیابی شد. سپس، نتایج مرتب با خواص ترموفیزیکی،

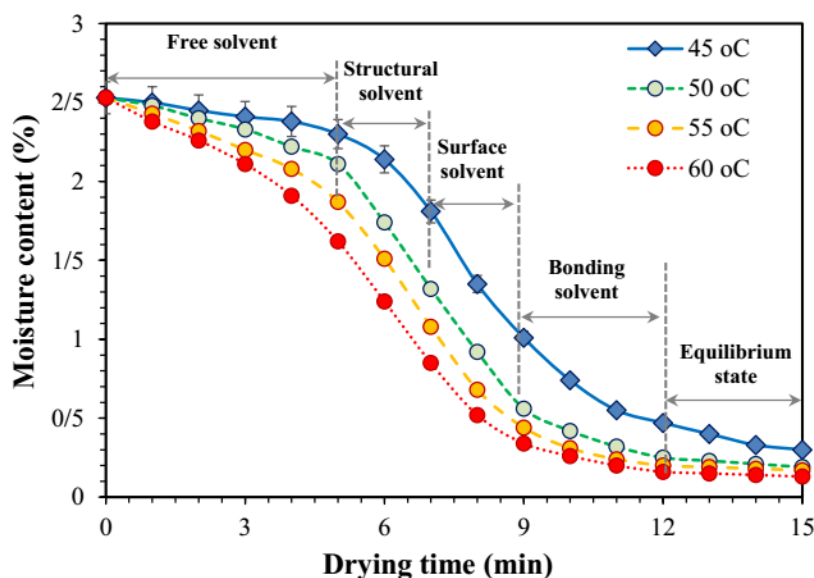
حلال در نمونه شامل (۱) خروج حلال آزاد، (۲) کاهش اولیه محتوای حلال بین ساختاری، (۳) کاهش حلال سطحی، (۴) کاهش حلال پیوندی و در نهایت، (۵) حالت تعادل در میزان محتوای حلال باقی مانده در نمونه است. انتخاب هریک از این مراحل براساس شیب منحنی تغییرات محتوای حلال باقی مانده در نمونه برحسب زمان تعیین شد. این مراحل در خصوص نمونه خشک شده در دمای ۵۰ °C نشان داده شده است. در مرحله اول، نرخ خروج حلال از سطح نمونه تقریباً ثابت است و مقاومتی برای انتقال جرم از درون پودر به سطح آن وجود ندارد [۱۸]. مراحل دوم و سوم فرایند خشک کردن براساس مقاومت انتقال جرم داخلی جسم رخ می دهد، به طوری که شیب تغییرات محتوای حلال باقی مانده در مرحله دوم بیشتر از مرحله سوم است. مراحل چهارم و پنجم فرایند خشک کردن براساس پدیده نفوذ داخلی کنترل می شود. مدل سینتیکی خشک شدن پودر پوششی در مراحل دوم تا چهارم از مدل ریاضی Midilli به صورت تابع نمایی تبعیت می کند [۲۷]. در شرایط تعادلی تغییرات محتوای حلال نسبت به زمان تقریباً به صفر نزدیک می شود. در این مرحله، میزان خروج حلال با گذشت زمان در دماهای ۶۰ و ۵۵ به کمتر از ۰/۰۲ درصد می رسد که ادامه فرایند خشک کردن را از لحاظ میزان صرف انرژی در ازای کاهش محتوای حلال غیراقتصادی می کند.

گرمایی و اشتعال پذیری پودر پوششی برپایه رزین اپوکسی در خشک کن (نمونه آزمایش) با نمونه قرار گرفته در آن حرارتی (نمونه کنترل) مقایسه و ارائه می شود.

۳-۱-۳ تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد خشک کن بستر سیال

۳-۱-۱ اثر دما بر محتوا و نرخ خشک شدن حلال

شکل (۲) نتایج منحنی حاصل از محتوای حلال باقی مانده درون نمونه ها طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در دماهای مختلف (۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ °C) را نشان می دهد. در این آزمایش ها نرخ حجمی جریان ثابت و برابر $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد. در دمای ۴۵ و ۵۰ °C، نرخ خشک شدن نمونه ها بسیار پایین تر از دمای ۶۰ °C است. کاهش محتوای حلال (رطوبت) باقی مانده در نمونه خشک شده در دمای ۵۵ °C در حد واسط دو دمای ۵۰ و ۶۰ °C رخ می دهد. بنابراین، افزایش دمای هوای ورودی، نرخ خشک شدن نمونه را بالا می برد و بیشترین میزان کاهش حلال باقی مانده مربوط به دماهای ۶۰ و ۵۵ °C است. در این شرایط، محتوای حلال باقی مانده در نمونه ها در دماهای ۶۰ و ۵۵ به ترتیب به کمتر از ۰/۱۴ و ۰/۲ درصد می رسد. این مقادیر برای نمونه های پودری مورد استفاده در مصارف رنگ های الکتروستاتیکی مطلوب است. منحنی مشخصه خشک شدن نمونه های پودری حاصل، نشان دهنده پنج مرحله کاهش محتوای

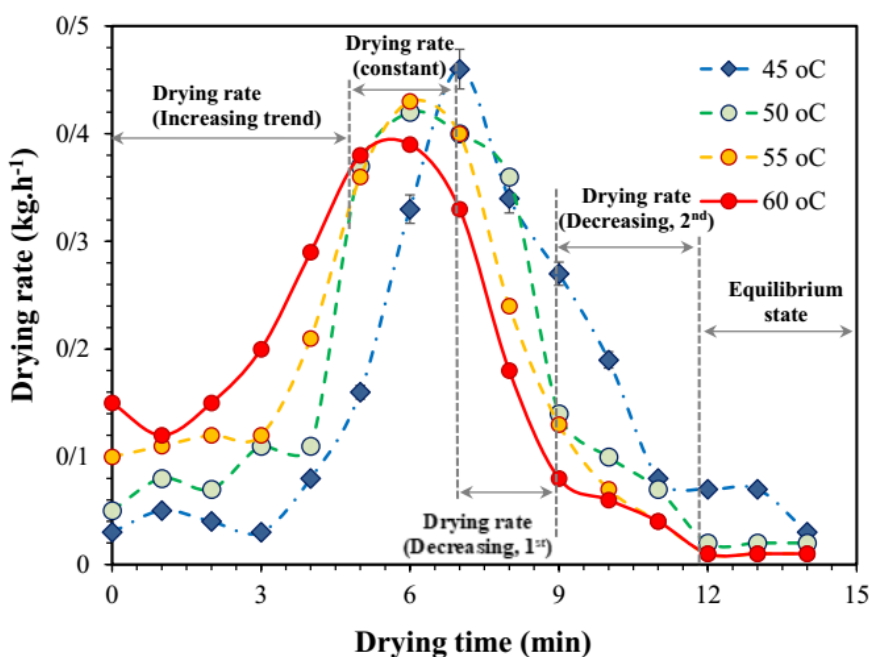


شکل ۲. تغییرات محتوای حلال باقی مانده درون نمونه ها طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در دماهای مختلف (دقت اندازه گیری محتوای حلال باقی مانده برابر ۰/۰۰۱ گرم و نرخ حجمی جریان در خشک کن بستر سیال برابر $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد).

Figure 2. The variation of residual solvent content in the samples during a period of 15 min at different temperatures (the measurement accuracy of the residual solvent content was 0.001 g and the volume flowrate in the fluidized bed dryer was $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$).

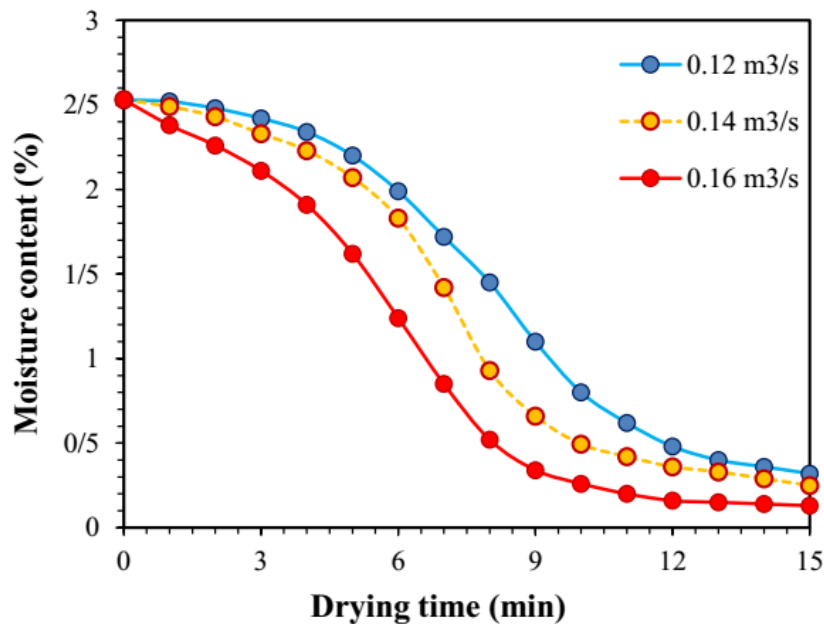
نمونه پودر قابل مشاهده است. در حالت تعادلی انتظار می رود تا نرخ خشک شدن نمونه بر حسب زمان از دستگاه خشک کن بستر سیال را طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در دماهای مختلف (۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ °C) نشان می دهد. در این آزمایش ها نرخ حجمی جریان ثابت و برابر $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد. در دمای ۴۵ و ۵۰ °C، نرخ خشک شدن نمونه ها بسیار پایین تر از دمای ۶۰ °C درجه سلسیوس است. کاهش محتوای حلال (رطوبت) باقی مانده در نمونه خشک شده در دمای ۵۵ °C در حد واسط دو دمای ۵۰ و ۶۰ °C رخ می دهد. بنابراین، افزایش دمای هوای ورودی، منجر به افزایش نرخ خشک شدن نمونه می شود؛ به طوری که بیشترین نرخ خشک شدن مربوط به دماهای ۶۰ و ۵۵ °C است. در این شرایط نرخ خشک شدن اولیه نمونه ها در دماهای ۶۰ و ۵۵ به ترتیب به بالای ۰/۵ درصد و ۱/۰ درصد می رسد. مطابق با مراحل ذکر شده در منحنی کاهش محتوای حلال باقی مانده بر حسب زمان، در خصوص منحنی مشخصه خشک شدن نمونه پودرهای حاصل نیز پنج مرحله شناخته شده، شامل: (۱) افزایش نرخ خشک شدن، (۲) مرحله تقریباً ثابت خشک شدن، (۳) مرحله اولیه و (۴) ثانویه خشک شدن و در نهایت، (۵) حالت تعادل در میزان محتوای حلال باقی مانده در

۱-۲ اثر نرخ حجمی جریان بر محتوا و نرخ خشک شدن حلال شکل (۴) نتایج منحنی حاصل از کاهش محتوای حلال باقی مانده درون نمونه ها را طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در نرخ های حجمی هوای ورودی مختلف ($0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ ، 0.14 و 0.12) نشان می دهد. در این آزمایش، دما ثابت و برابر ۶۰ °C در نظر گرفته شد. چنان که در شکل (۵) مشاهده می شود، افزایش نرخ حجمی جریان هوای ورودی به محفظه خشک کن منجر به افزایش عملکرد خشک کن و کاهش سریع محتوای حلال باقی مانده از مرحله اول پخت رزین اپوکسی می شود. این نتیجه با نتایج سایر محققان در خصوص تأثیر نرخ حجمی جریان هوای ورودی بر افزایش نرخ خشک شدن ذرات هم خوانی داشت [۲۴ و ۲۵]. بیشترین میزان کاهش محتوای حلال در مراحل ۲ الی ۴ ذکر شده در شکل (۳) مشاهده می شود. به طوری که کاهش شدید در میزان حلال های بین ساختاری، سطحی و پیوندی



شکل ۳. منحنی مشخصه خشک شدن نمونه پودرهای خروجی از دستگاه خشک کن بستر سیال طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در دماهای مختلف (نرخ حجمی جریان در خشک کن بستر سیال برابر $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد).

Figure 3. Characteristic curve of the powders coming out of the fluidized bed dryer during a period of 15 min at different temperatures (volume flowrate in the fluidized bed dryer was $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$).



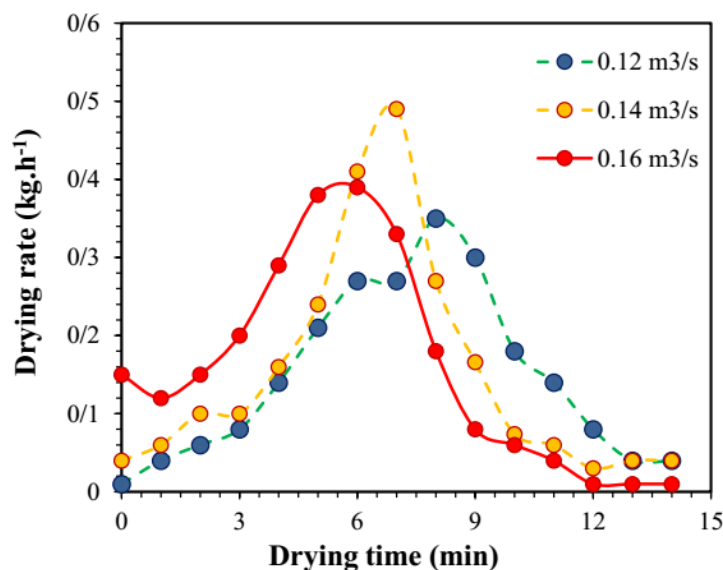
شکل ۴. تغییرات محتوای حلال باقی مانده درون نمونه‌ها طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در نرخ‌های حجمی هوای ورودی مختلف (دمای هوای ورودی در خشک‌کن بستر سیال برابر ۶۰ °C بود).

Figure 4. The variations of the residual solvent content in the samples during a period of 15 min at different inlet air volume flowrates (the inlet air temperature was 60 °C).

باقی مانده مطلوب می‌شود و زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد. در مرحله اول، خشک شدن (نرخ افزایشی خشک شدن)، بیشینه نرخ حجمی جریان ($0.16 \text{ m}^3/\text{s}$) منجر به بیشترین میزان خشک شدن سطحی جسم می‌شود. در مرحله دوم، خشک شدن (خشک شدن ثابت) بیشترین میزان نرخ خشک شدن مرتباً با نرخ حجمی هوای معادل $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ است. در مرحله نهایی، خشک شدن (حالت تعادلی)، کمینه نرخ حجمی جریان هوا ($0.12 \text{ m}^3/\text{s}$) منجر به دستیابی به بیشینه نرخ خشک شدن جسم بر اثر پدیده نفوذ درون ذره‌ای می‌شود. لذا، دستیابی به بیشینه نرخ خشک شدن، با به کارگیری نرخ حجمی بالای جریان در مرحله اول خشک کردن و سپس، روند تدریجی کاهش نرخ حجمی جریان هوا در مراحل بعدی همراه است. این نتیجه را می‌توان این گونه توجیه کرد که در مرحله اول مقاومتی برای انتقال جرم رطوبت از درون جسم به سطح آن وجود ندارد؛ لذا افزایش نرخ حجمی جریان به طور مستقیم بر نرخ خشک شدن حلال سطحی مؤثر است. در مقابل، در مراحل انتهایی فرایند خشک شدن ذرات، نقش مقاومت انتقال جرم و پدیده نفوذ حلال از درون ذره به بیرون آن افزایش می‌یابد و تأثیر نرخ حجمی جریان هوا کمتر از دمای خشک شدن است. در شرایط دمای ثابت و

موجود درون پودر قابل مشاهده است و در نتیجه، زمان رسیدن به حالت تعادلی محتوای حلال درون پودر را به سرعت کاهش می‌دهد. کاهش زمان رسیدن به حالت تعادل پودر هم‌زمان با کاهش مصرف انرژی خشک‌کن برای خشک کردن مواد است.

شکل (۵) نتایج منحنی مشخصه خشک شدن (نرخ خشک شدن بر حسب زمان) نمونه‌های خروجی از دستگاه خشک‌کن بستر سیال را طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در نرخ‌های حجمی هوای ورودی مختلف (0.12 ، 0.14 و $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$) نشان می‌دهد. در این آزمایش، دما ثابت و برابر 60°C در نظر گرفته شد. در مراحل اولیه خشک شدن شامل: مرحله نرخ افزایشی، نرخ خشک شدن ثابت و مرحله اولیه خشک شدن، نرخ حجمی بالای جریان ورودی هوا تأثیر زیادی روی خشک شدن پودر دارد؛ در حالی که در زمان‌های پس از ۱۲ دقیقه که در شرایط نرخ خشک شدن تعادلی قرار دارد، تأثیر افزایش نرخ حجمی هوا از بین می‌رود و عملکرد خشک‌کن تابع نرخ حجمی جریان هوای ورودی نیست. لذا می‌توان با اطمینان بیان داشت که در بازه زمانی ۱۲-۱۴ دقیقه، با توجه به این که نرخ خشک شدن تقریباً صفر است، نمونه کاملاً خشک شده است. از طرفی، بالا بودن نرخ حجمی هوا تا زمان ۱۲ min منجر به رسیدن نمونه به میزان حلال



شکل ۵. منحنی مشخصه خشک شدن نمونه‌های خروجی از دستگاه خشک کن بستر سیال طی بازه زمانی ۱۵ دقیقه در نرخ‌های حجمی هوای ورودی مختلف (دمای هوای ورودی ثابت و برابر ۶۰ °C بود).

Figure 5. Characteristic curve of drying samples from the fluidized bed dryer during a period of 15 min at different inlet air volume flowrates (the inlet air temperature was 60 °C).

نمونه‌ها متأثر از روش خشک کردن آن‌ها قرار دارد. میزان سرعت سوزش نمونه‌های کنترل بیشتر از نمونه‌های آزمایش است. کمترین مقادیر زمان سوزش در هر دو نمونه آزمایش و کنترل در دمای ۵۵ °C گزارش شد (شکل ۶-b). هم‌چنین، نتایج نشان داد که متوسط زمان سوختن نمونه‌های آزمایش نسبت به نمونه‌های کنترل در شرایط مشابه دمایی کمتر بود (شکل ۶-b). با افزایش دما از ۴۵ °C به ۵۵ °C روند کاهش متوسط زمان سوختن هر دو نمونه مشاهده می‌شود و پس از آن در ۶۰ °C روند افزایشی است. بنابراین، دمای ۵۵ °C به عنوان دمای بهینه خشک کردن تعیین شد.

۲-۲-۲-۳ آزمون گرم‌اوزن سنجی

جدول (۱) نتایج آزمون گرم‌اوزن سنجی و درصد کربن باقی مانده نمونه‌های کنترل و آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که دمای بیشینه تخریب در نمونه آزمایش بیشتر از نمونه کنترل است و دمای شروع تخریب ($T_{7/5}$) نیز در نمونه آزمایش بیشتر از نمونه کنترل است. این نتیجه را می‌توان به خروج یکنواخت محتوای حلال باقی مانده در نمونه آزمایش نسبت به نمونه کنترل نسبت داد. از آنجایی که دمای بیشینه تخریب (T_{max}) به عنوان شاخص پایداری گرمایی نمونه در نظر گرفته می‌شود [۲۶]، افزایش دمای بیشینه

با در نظر گرفتن این که کنترل کننده انتقال جرم در مراحل پایانی خشک شدن ذره بر پایه پدیده نفوذ داخلی است، بنابراین، در مراحل نهایی خشک شدن ذرات، پایین نگهداشتن نرخ حجمی هوا شرایط مناسب تری برای خشک شدن جسم فراهم می‌کند.

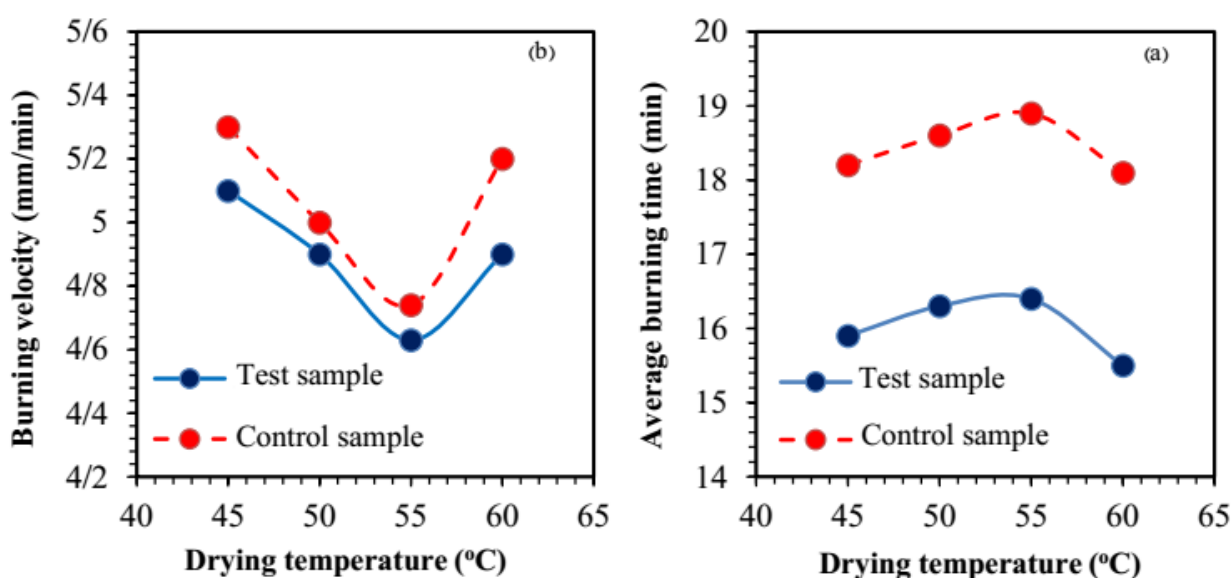
۲-۳ تعیین خواص پودر پوششی خروجی

۲-۳-۱ تعیین سرعت سوزش

شکل (۶) مقایسه نتایج سرعت سوزش و متوسط زمان سوختن نمونه پودر پوششی بر پایه اپوکسی (مقایسه نتایج نمونه کنترل و آزمایش) را نشان می‌دهد. نتایج آزمون سوختن به عنوان معیاری از قابلیت آتشگیری ماده پلیمری پذیرفته شده است. هرچه زمان سوختن نمونه طولانی تر یا سرعت سوزش حساب شده کمتر باشد، نمونه مد نظر اشتعال پذیری کمتری دارد [۲-۱]. افزایش سرعت سوزش، متوسط زمان سوختن را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که سرعت سوزش نمونه‌های آزمایش نسبت به نمونه‌های کنترل در شرایط مشابه دمایی کمتر بود (شکل ۶-a). در حین سوختن نمونه آزمایش جرقه‌ای دیده نشد و شعله‌ای همانند شعله شمع رویت شد؛ اما در خصوص نمونه کنترل، رفتاری همراه با ایجاد جرقه حین سوختن وجود داشت. این نتیجه نشان داد که خواص اشتعال پذیری

دریافت که درصد کربن باقی مانده در نمونه سوخته شده در دمای 530°C در نمونه آزمایش کمتر از نمونه کنترل است که نتایج آن با داده های به دست آمده از مراجع هم خوانی داشت [۱۳]. این موضوع نشان می دهد که خشک کن بستر سیال شرایط مطلوبی برای خروج حلال و جلوگیری از کربن حاصل از سوختن حلال در درون ساختار نمونه پودر پوششی فراهم کرده است.

تخریب نمونه آزمایش نسبت به نمونه کنترل نشان دهنده بهبود میزان محتوای حلال باقی مانده در ساختار پودر حاصل است و دمای شروع تخریب (T_{δ}) نیز در رزین اپوکسی خشک شده بیشتر است. این امر نشان از پایداری گرمایی و مقاومت در برابر اشتعال در پودر خشک شده در بستر سیال نسبت به آن حرارتی به دلیل همگنی محتوای حلال باقی مانده در نمونه ها دارد. در نتیجه، پودر حاصل پایداری گرمایی بیشتری دارد. هم چنین، از جدول (۱) می توان



شکل ۶. نتایج مقادیر (a) سرعت سوزش و (b) متوسط زمان سوختن نمونه پودر پوششی پایه اپوکسی (مقایسه نتایج نمونه کنترل و آزمایش).

Figure 6. The results of (A) burning velocity and (B) average burning time of the epoxy-based coating powder (comparing the results of control and test samples).

جدول ۱. نتایج آزمون گرماوزن سنجی و درصد کربن باقی مانده نمونه های کنترل و آزمایش.

Table 1. Thermogravimetric analysis results and residual carbon (%) of control and test samples.

Sample type	Drying temperature	Residual carbon at 530°C	T_f ($^{\circ}\text{C}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	$T(5\% ^{\circ}\text{C})$
Test	45°C	13.6	498	456	387
	50°C	13.2	493	451	381
	55°C	12.7	487	446	379
	60°C	12.5	475	442	377
Control	45°C	14.5	480	437	373
	50°C	14.3	476	433	370
	55°C	13.9	465	415	367
	60°C	13.2	461	409	364

۳-۲-۳ شاخص حدی اکسیژن

جدول (۲) نتایج حاصل از تعیین شاخص حدی اکسیژن نمونه‌های کنترل و آزمایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شاخص LOI نمونه آزمایش مقادیر تجربی و تئوری بالاتری نسبت به نمونه دارد. در این آزمون حداقل میزان اکسیژن یا شاخص حدی اکسیژن در یک مخلوط حاوی اکسیژن و نیتروژن اندازه‌گیری شد؛ به طوری که قادر بود شعله حاصل از نمونه را ۳ دقیقه پایدار نگه‌دارد. هرچه میزان این درصد بالاتر باشد، احتراق نمونه سخت‌تر است و در نتیجه، نمونه مقاومت بیشتری در مقابل آتش‌گیری دارد. همان طوری که اشاره شد، یافته‌های شاخص حدی اکسیژن حاکی از این است که نمونه آزمایش شاخص حدی اکسیژن تجربی و تئوری بالاتری نسبت به نمونه کنترل دارد. یافته‌های این مطالعه با نتایج سایر محققان هم‌خوانی دارد [۱۲، ۲۸]. در این آزمون، حداقل میزان اکسیژن یا شاخص حدی اکسیژن در یک مخلوط حاوی اکسیژن و نیتروژن اندازه‌گیری می‌شود، به طوری که قادر باشد شعله حاصل از نمونه را ۳ دقیقه پایدار نگه‌دارد. هرچه میزان این درصد بالاتر باشد، احتراق نمونه سخت‌تر است و در نتیجه، نمونه مقاومت بیشتری در مقابل آتش‌گیری دارد. همچنین، شاخص حدی اکسیژن با مقدار کربن باقی‌مانده پس از سوختن رابطه مستقیم دارد. یعنی با لا بودن مقدار کربن باقی‌مانده در نمونه دلالت بر بالا بودن شاخص حدی اکسیژن دارد و بنابراین، آتش‌گیری نمونه مورد نظر سخت‌تر است [۲۹]. مقدار درصد کربن باقی‌مانده پس از طی فرایند احتراق کامل، به‌عنوان مانعی در برابر نفوذ اکسیژن و گرما به پلیمر عمل می‌کند و مانع از ادامه تخریب آن می‌شود.

جدول ۲. مقادیر تجربی و تئوری شاخص حدی اکسیژن در نمونه‌های کنترل و آزمایش.

Table 2. Experimental and theoretical values of LOI in the control and test samples.

Sample type	Drying temperature	Experimental LOI (%)	Theoretical LOI (%)
Test	°C 45	19.7	22.6
	°C 50	21.1	24.7
	°C 55	23.5	25.6
	°C 60	22.9	25.0
Control	°C 45	17.8	20.9
	°C 50	19.9	22.2
	°C 55	21.3	23.4
	°C 60	20.3	23.1

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تأثیر دما و نرخ حجمی هوای ورودی بر خواص ترموفیزیکی و اشتعال‌پذیری و همچنین، نرخ خشک‌شدن نهایی پودر پوششی پایه‌پوکسی حاوی حلال باقی‌مانده از مرحله پخت پرداخته شد. نیز، تأثیر نحوه فرایند خشک‌کردن نمونه‌ها به کمک خشک‌کن بستر سیال (نمونه خشک‌کن) و آون حرارتی (نمونه کنترل) از نظر عملکردی مقایسه شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که دما و نرخ حجمی هوای ورودی تأثیر به‌سزایی بر نرخ خشک‌شدن، خواص ترموفیزیکی و اشتعال‌پذیری نمونه‌ها داشت. نتایج آزمون سرعت سوزش حاکی از کاهش سرعت سوزش نمونه آزمایش در مقایسه با نمونه کنترل داشت. بیشینه دمای تخریب و دمای شروع به تخریب نمونه آزمایش بیشتر از نمونه کنترل بود. همچنین، شاخص حدی اکسیژن در نمونه آزمایش بالاتر از نمونه کنترل است. بنابراین، استفاده از خشک‌کن بستر سیال نسبت به آون حرارتی برای مرحله نهایی خشک‌کردن پودر پوششی ترجیح داده می‌شود. مقایسه نتایج تغییر محتوای حلال باقی‌مانده و نرخ خشک‌شدن نمونه‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن بستر سیال، نرخ خشک‌شدن نمونه افزایش یافت؛ به طوری که در دمای °C ۶۰ محتوای حلال باقی‌مانده درون پودر به کمتر از ۰/۱۴ درصد رسید. در محدوده دمایی °C ۵۵-۶۰ با افزایش دما و نرخ حجمی هوای ورودی به خشک‌کن بستر سیال، نرخ خشک‌شدن و میزان اشتعال‌پذیری نمونه افزایش نشان داد. بنابراین، دمای °C ۵۵ به‌عنوان دمای بهینه خشک‌شدن نمونه در خشک‌کن بستر سیال تعیین شد. همچنین، تعیین شرایط بهینه نرخ حجمی هوای ورودی تأثیر زیادی بر بهبود خصوصیات نمونه‌ها داشت. یافته‌ها نشان داد که نرخ خشک‌شدن پودر پوششی تابع نرخ حجمی جریان هوا در مراحل مختلف خشک‌شدن است. بیشینه نرخ خشک‌شدن در مراحل اولیه (نرخ افزایشی خشک‌شدن) و نهایی خشک‌شدن (حالت تعادلی) به ترتیب در مقادیر بیشینه و کمینه نرخ حجمی جریان هوا حاصل شد. بنابراین، دستیابی به بیشینه نرخ خشک‌شدن، با به‌کارگیری نرخ حجمی بالای جریان در مرحله اول خشک‌کردن و سپس، روند تدریجی کاهش نرخ حجمی جریان هوا در مراحل بعدی همراه است. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری فرایند خشک‌کردن ثانویه پودر پوششی پایه‌پوکسی

- [10] Mora, A. S., Tayouo, R., Boutevin, B., David, G., & Caillol, S. (2020). A Perspective Approach on the amine reactivity and the hydrogen bonds effect on epoxy-amine systems. *European Polymer Journal*, 123(1), 109460.
- [11] Ismail, A., Motawie, A. M., & Sadek, E. M. (2011). Synthesis and characterization of polyurethane coatings based on soybean oil-polyester polyols. *Egyptian Journal of Petroleum*, 20(2), 1-8.
- [12] Thomas, R., Durix, S., Sinturel, C., Omonov, T., Goossens, S., Groeninckx, G., Moldenaers, P., & Thomas, S. (2007). Cure kinetics, morphology and miscibility of modified DGEBA-based epoxy resin: Effects of a liquid rubber inclusion. *Polymer*, 48(6), 1695-1710.
- [13] Duemichen, E., Javdanitehran, M., Erdmann, M., Trappe, V., Sturm, H., Braun, U., & Ziegmann, G. (2015). Analyzing the network formation and curing kinetics of epoxy resins by in situ near-infrared measurements with variable heating rates. *Thermochemica Acta*, 616(1), 49-60.
- [14] Liu, H., Chen, Y., Chai, M., Wu, Y., Xue, K., Liua, L., & Huang, Y. (2024). High-performance carbon fiber-reinforced epoxy resin composites based on novel, environmentally friendly, stability, and heat-moisture resistant nanoemulsion encapsulated POSS sizing agent interface modification. *Composites Part B*, 284(111697), 1-10.
- [15] Zhang, X., Peng, Zh. Feng, Q., & Zheng, Y. (2024). Effect of CTBN and Nano-SiO₂ modified epoxy resin powder on the mechanical properties of cement-based composites. *Journal of Building Engineering*, 83(108456), 1-13.
- [16] Mo, Zh., Jiang, X., Zhu, X., Ding, J., Bana, B., Sun, J., & Chen, J. (2024). Facile purification of glass fiber powder by sedimentation for enhanced epoxy resin composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 695(134259), 1-10.
- [17] Gilbert, M. D., Schneider, N. S., & MacKnight, W. J. (1991). Mechanism of the dicyandiamide epoxide reaction. *Macromolecules*, 24(2), 360-369.
- [18] Lva, X., Fub, J., Zhu, X., Zhanga, H., Shao, Y., Zhang, H., & Zhu, J. (2023). A latened catalytic strategy for low cure thermoset powder coating by post-dry-blending technique. *Progress in Organic Coatings*, 185(107922), 1-8.
- [19] Kalbasi, M., Khanlarkhani, M. R., & Ahmadpour, A. (2010). Modeling and simulation of aluminum drying process in spray dryer with parallel flow. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 9(49), 94-104, [In Persian].
- [20] Niamnuay, C., & Devahastin, S. (2015). Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 66(2), 267-271.
- با استفاده از خشک کن بستر سیال پس از مرحله پخت اولیه، می تواند منجر به بهبود کیفیت محصول نهایی - به منظور دستیابی به کمینه محتوای حلال باقی مانده - و رسیدن به پودر پوششی با خواص ترموفیزیکی ثابت شود.
- ۵. تشکر و قدردانی**
- نویسندگان مقاله، مراتب قدردانی و تشکر خود را از حمایت دانشگاه صنعتی همدان بابت اعتبار پژوهشی شماره ۴۰۲/۱۳۷۸۴/۲۱۳۷۸۴ ابراز می کنند.
- مراجع**
- [1] Cappitelli, F., Zanardini, E., & Sorlini, C. (2004). The biodeterioration of synthetic resins used in conservation. *Macromolecular Bioscience*, 4(4), 399-406.
- [2] Lee, T. K., Ryoo, S. J., Byun, J. W., Lee, S. M., & Lee, Y. S. (2005). Preparation of core-shell-type aminomethyl polystyrene resin and characterization of its functional group distribution. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 7(2), 170-173.
- [3] Zhang, Ch., Cui, J., Sui, W., Gong, Y., Liu, H., Ao, Y., & Shang, L. (2023). High heat Resistance, Strength, and toughness of epoxy resin with cellulose nanofibers and structurally designed ionic liquid. *Chemical Engineering Journal*, 478(147063), 1-11.
- [4] Lin, S. H., and Juang, R. S. (2009). Adsorption of phenol and its derivatives from water using synthetic resins and low-cost natural adsorbents: a review. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1336-1349.
- [5] Xiang, Q., & Xiao, F. P. (2020). Applications of epoxy materials in pavement engineering. *Construction and Building Materials*, 235, 117529.
- [6] Dearborn, E. C., Fuoss, R. M., MacKenzie, A. K., & Shepherd, R. G. (1953). Epoxy resins from bis-, tris-, and tetrakisglycidyl ethers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 45(1), 2715-2721.
- [7] Mustata, F., & Bicu, I. (2000). Multifunctional epoxy resins: Synthesis and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(11), 2430-2436.
- [8] Fache, M., Monteremal, C., Boutevin, B., & Caillol, S. (2015). Amine hardeners and epoxy cross-linker from aromatic renewable resources. *European Polymer Journal*, 73(1), 344-362.
- [9] Chiao, L. (1990). Mechanistic Reaction-kinetics of 4,4'-Diaminodiphenyl sulfone cured Tetraglycidyl-4,4'-diaminodiphenylmethane epoxy resins. *Macromolecules*, 23(5), 1286-1290.

- [21] Liu, R. H., Li, L., Yin, W. P., Xu, D. B., & Zang, H. C. (2017). Near-infrared spectroscopy monitoring and control of the fluidized bed granulation and coating process-a review. *International Journal of Pharmacy*, 53(1), 308-315.
- [22] Taghavivand, M., Choi, K., & Zhang, L. (2017). Investigation on drying kinetics and tribocharging behaviour of pharmaceutical granules in a fluidized bed dryer. *Powder Technology*, 316, 171-180.
- [23] Wang, H. G., Senior, P., Mann, R., & Yang, W. Q. (2009). Online solids moisture measurement and optimum control of fluidized bed dryer. *Chemical Engineering Science*, 64, 2893-902.
- [24] M. Maguire, J. M., Wang, J. Y., & Ó Brádaigh, C. M. (2024). Hygroscopicity in epoxy powder composites. *Powders*, 3, 168-189.
- [25] Agius, S. L., Magniez, K. J. C., & Fox, B. L. (2013). Cure Behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites. *Composite Part B Engineering*, 47, 230-237.
- [26] M. H. Karami, M. H., Kalae, M. R. (2023). Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(124), 71-83, [In Persian].
- [27] da Silva, F. B., Fakhouri, F. M., Manozzo Galante, R., Amadeu Antunes, C., dos Santos, M., Caon, Th., & Martelli, S. M. (2018). Drying kinetics of French fries covered with soy protein/starch edible coatings. Chapter Book, 1-29.
- [28] Fathizadeh, M. A., and Beheshty, M. H. (2016). A Comparative study on the thermal resistance, flammability and mechanical properties of unsaturated polyester and epoxy resins. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 28(5), 409-419, [In Persian].
- [29] Zhao, C., Zhang, G., & Zhao, L. (2012). Effect of curing agent and temperature on the rheological behavior of epoxy resin systems. *Molecules* (Basel, Switzerland), 17(7), 8587-8594.