

تعیین مشخصات و پارامترهای سینتیک خشک کردن ماده انفجاری پیکریت و طراحی یک خشک کن پیوسته

محمد مهدی منتظر رحمتی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

بهمن امینی حری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

جواد ایوانی

مری گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۷/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۹/۱۶، تاریخ تصویب ۸۲/۱۲/۲۳)

چکیده

یک خشک کن نوار نقاله‌ای با جریان موازی برای خشک کردن ماده انفجاری پیکریت طراحی شده است. رطوبت ورودی حدود ۸۱٪ و رطوبت نهایی نیز حدود ۰/۲٪ بوده و ضخامت ماده خشک شونده ۲ cm می‌باشد. مطابق با رویه‌های عمومی طراحی خشک کن؛ ابتدا سینتیک خشک کردن تحت شرایط کاهش وزن پیوسته^۱ به روش لایه نازک^۲ مورد مطالعه قرار گرفته است و سپس مدل‌سازی ریاضی و طراحی خشک کن صنعتی انجام گرفته است. آزمایشهای خشک کردن در دماهای مختلف ۴۰°C، ۶۰°C، ۸۰°C و ۱۰۰°C و با دو دبی مختلف به شکل تکراری انجام شده است و منحنی‌های پنج‌گانه خشک کردن^۳ شامل منحنی‌های وزن - زمان؛ محتوی رطوبت - زمان؛ دما - زمان؛ سرعت - زمان و منحنی مستقل از زمان کریشر^۴ ترسیم شده است. سپس اطلاعات حاصل از طریق منحنی‌ها برای بدست آوردن سایر پارامترها و مشخصات سینتیکی فرایند خشک کردن مورد پردازش قرار گرفته و ضرایب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز و دما و محتوی رطوبت فاز گاز و فاز جامد در فصل مشترک و همچنین ضریب انتقال جرم و ضریب نفوذ حرارتی و ضریب نفوذ جرمی در فاز جامد تعیین شده است. در بخش مدل‌سازی ریاضی نیز با تقسیم نواحی خشک کن نوارنقاله‌ای به دو بخش ممانعتی و غیر ممانعتی، سیستم معادلات تلفیقی موازنه میکروسکوپی و ماکروسکوپی جرم و انرژی معین و حل شده است و بدین ترتیب پارامترهای نهایی خشک کن صنعتی مشخص شده است. تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته شامل دمنده، رطوبت گیر، ورودی بخار، اندازه‌گیر دبی سیال خشک کننده، گرمکن، رطوبت سنج، کانال خشک کردن و بخش نمونه گیر جریان بوده و بدین ترتیب پارامترهای اساسی فرایند خشک کردن نظیر سرعت و دما و میزان رطوبت گاز عبوری و وزن نمونه در هر لحظه از زمان اندازه گیری و کنترل شده است.

واژه های کلیدی: پیکریت، خشک کردن، سینتیک خشک کردن، خشک کن، خشک کن همرفتی،

خشک کن نوار نقاله‌ای، مدل‌سازی ریاضی

مقدمه

خشک کن مورد نظر طراحی می‌شود [۲]. در اینجا نیز از همین رویه عمومی جهت طراحی خشک کن مورد نظر استفاده شده است. پیکریت در حالت تر دارای رطوبت اولیه نسبتاً بالا (حدود ۸۱٪) و چسبندگی توده‌ای زیادی می‌باشد. از طرف دیگر به علت خواص انفجاری ماده مورد نظر، مکانیسم انتقال حرارت به آن باید به گونه‌ای باشد که سبب ایجاد دمای بالا در توده ماده نشود. پس از مطالعه خواص ماده و انواع خشک کنها و شرایط و امکانات موجود؛ خشک کن نوار

در رویه‌های عمومی طراحی خشک کن، ابتدا کلیه خشک‌کنهای اصلی و فرعی و کلیه جداول و پارامترهای انتخاب و دسته‌بندی خشک‌کنها مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و سپس با توجه به خواص ماده خشک شونده یک یا چند خشک کن انتخاب می‌شود و در مرحله دوم آزمایشهایی برای تعیین پارامترها و مشخصات سینتیک خشک کردن در یک سیستم آزمایشگاهی صورت می‌گیرد [۱]. سرانجام نیز با مدل سازی ریاضی؛

منحنیهای پنجگانه وزن - زمان، دما- زمان، محتوی رطوبت - زمان، سرعت - زمان و منحنی مستقل از زمان کریشر خواهد شد. علاوه بر این با بررسی این منحنیها میتوان میزان رطوبت تعادلی نهایی، میزان رطوبت بحرانی، نوع ماده از لحاظ نمگیر^۱ نسبتاً نمگیر و غیرنمگیر بودن وهمچنین سطحی و غیرسطحی بودن رطوبت و تحت کنترل بودن انتقال رطوبت توسط پدیده مویینگی یا نفوذ ملوکولی را تعیین نمود [۷].

از طرف دیگر با پردازش اطلاعات حاصل از منحنیها می توان ضرایب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز و دما و رطوبت تعادلی در فصل مشترک و ضریب نفوذ حرارتی و جرمی در فاز جامد را بدست آورد. پارامترهای فوق الذکر اساسی ترین پارامترهایی هستند که در فرایند خشک کردن مورد توجه قرار می گیرند [۸].

سابقه تحقیق

مطابق با جستجوی تفصیلی انجام شده در باره سینتیک خشک کردن پیکریت در شرایط همرفتی^{۱۰} هیچ کار قبلی در این زمینه در مقالات داخلی و خارجی یافت نشد. اگر چه در برخی از کشورها خشک کنهایی برای پیکریت ساخته شده اما نتایج انتشار نیافته است. از طرف دیگر جستجو برای یافتن یک سیستم آزمایشگاهی که بتوان با استفاده از آن پارامترهای اساسی خشک کردن و منحنیهای خشک شدن را در شرایط دینامیک اندازه گیری نمود؛ در دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی بی نتیجه بود. اغلب سیستمهای موجود در شرایط ایستایی و در حالت اندازه گیری ناپیوسته عمل می نمودند. در مورد سینتیک خشک کردن پیکریت نیز این اولین تحقیق علمی در ایران به شمار می رود.

شرح سیستم آزمایشگاهی - نیمه صنعتی

تعیین منحنیهای سینتیکی

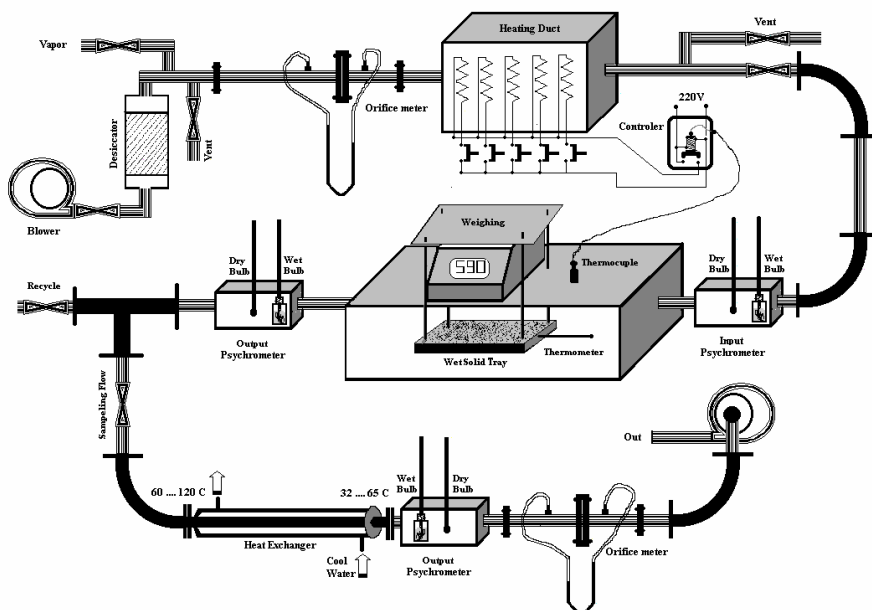
شماتیک این دستگاه آزمایشگاهی - نیمه صنعتی را می توان در شکل (۱) مشاهده نمود. این دستگاه متشکل از قسمتهای مختلفی از جمله هوا ساز با

نقاله ای با جریان موازی ناهمسو انتخاب شد. برای آنکه اطلاعات لازم برای ترسیم منحنیهای پنجگانه سینتیک خشک کردن فراهم شود؛ دو روش عمده وجود دارد: روش مستقیم و روش غیرمستقیم. در روش مستقیم سیستم آزمایشگاهی به شکل دینامیک طراحی می شود [۳] و در آن علاوه بر آنکه شرایط در حین عبور از لحاظ دما، رطوبت و سرعت ثابت نگه داشته می شود؛ مقدار وزن نمونه نیز باید به طور پیوسته اندازه گیری شود. امروزه چنین سیستمهایی متداولترین تجهیزات تعیین سینتیک خشک کردن می باشند [۴]. این روش تحت عنوان روش تعیین سینتیک خشک کردن به روش لایه نازک^۵ مشهور می باشد. هرچه منحنی وزن - زمان و منحنی محتوی رطوبت - زمان بدست آمده از طریق این روش هموارتر^۶ باشد؛ نشان دهنده آنست که نوسان^۷ ناخواسته کمتری در اثر عبور هوا و ارتعاش سینی بوجود آمده و لذا دقت نتایج بدست آمده بیشتر است. در روش دوم که تحت عنوان روش غیر مستقیم مشهور است؛ از دستگاه تجزیه گازی مادون قرمز^۸ استفاده می شود. این روش نوسان بیشتری داشته و معمولاً برای شرایطی که نمونه خیلی کوچک باشد و یا سرعت تبخیر خیلی زیاد باشد و یا زمان خشک شدن خیلی کوتاه باشد (در حد چند ثانیه یا دقیقه) استفاده می گردد. با توجه به ماهیت خشک کن انتخاب شده و نوع ماده مورد نظر و امکانات موجود، از روش مستقیم برای بدست آوردن منحنی های خشک کردن استفاده شده است [۵]، [۶].

زمینه و لزوم طراحی سیستم

آزمایشگاهی تعیین منحنیهای سینتیکی

بعلت گستردگی بسیار زیاد مواد خشک شونده و تنوع خواص فیزیکی و در عین حال تغییرات پارامترهای فیزیکی مواد در حین خشک کردن، انجام آزمایشهای سینتیک خشک کردن قبل از طراحی خشک کن الزامی است و صرفاً استفاده از مدل سازی ریاضی و استفاده از روابط عمومی فرایند خشک کردن به نتایج صحیحی منتهی نخواهد شد. مطالعه سینتیک خشک کردن منتهی به تعیین



شکل ۱: شماتیک سیستم آزمایشگاهی - نیمه صنعتی تحقیق سینتیک خشک کنهای همرفتی در شرایط دینامیک.

شرح مختصر اجزای سیستم آزمایشگاهی

- هوای محیط به کمک یک دمنده گریز از مرکز با قدرت موتور ۰/۷۵ kW و قطر پروانه ۷۰ cm تامین می‌گردد. این دمنده قادر است افت فشار کل مسیر را که حدود ۶۰ cm آب می‌باشد جبران نموده و توسط یک شیر کنترل دبی متغیر بین ۳ تا ۴۰ gr/sec را در مسیر ایجاد نماید. پس از آن هوا به دلخواه از یک خشک کننده گاز^{۱۱} که یک بستر سیلیکازلی به سطح مقطع ۲۸/۳*۲۸/۳ cm و به ارتفاع ۵۲ cm بوده و حاوی سیلیکازل کروی به قطر ۰/۶ cm می‌باشد عبور می‌نماید. این خشک کننده قادر است در دبی موثر ۲۰ gr/sec در یک دوره عملکرد ۸ ساعتی ۲/۸ kg آب از هوا جذب نموده و یک هوای (تقریباً) خشک تولید نماید. افت فشار بستر در این حالت ۰/۸۹ kPa می‌باشد. پس از این مرحله باز هوا بدخواه با مقدار معینی بخار که از خط بخار تأمین می‌شود ترکیب می‌شود و بدین ترتیب یک هوای مرطوب یا کاملاً خشک برای بدست آوردن منحنیهای جذب و دفع و منحنی e.m.c تأمین می‌شود [۱۰].

- پس از آنکه هوای مرطوب یا کاملاً خشک در بخش هوا ساز تأمین شد، توسط یک اریفیس که به طور خاص برای این سیستم طراحی و ساخته شده

رطوبت معین، اندازه گیر دبی گاز خشک کننده، کانال گرمکن، رطوبت سنج ورودی و خروجی، کانال خشک کردن و بخش نمونه گیر جریان که خود شامل مبدل حرارتی، رطوبت سنج و اندازه گیر دبی جریان و یک مکنده می‌باشد [۹].

این سیستم مجموعاً شرایط مناسب را برای بدست آوردن اطلاعات لازم جهت تعیین منحنیهای سینتیکی خشک کردن مواد در شرایط لایه نازک به روش کاهش وزن پیوسته ایجاد خواهد نمود. این سیستم در شرایط دینامیک عمل نموده و قادر است برای هر آزمایش گاز عبوری را در شرایط دما ثابت، رطوبت ثابت و سرعت ثابت برای خشک کردن ماده مورد نظر تأمین نماید. علاوه بر این دستگاه مذکور دارای قابلیت انعطاف زیادی می‌باشد، به طوری که می‌توان از آن برای تعیین سینتیک سایر فرآورده های دارویی، کشاورزی، انفجاری و مواد معدنی و غذایی استفاده نمود. اطلاعات بدست آمده از این دستگاه، برای طراحی خشک کنهای همرفتی در شرایط پیوسته و ناپیوسته مناسب است. در صورتی که بخواهیم خشک کنهای پراکندگی نظیر بستر سیالی یا بستر فواره ای یا خشک کنهای آنسی طراحی نماییم باید بخش کانال خشک کردن را مطابق با شرایط خشک کن نهایی تغییر دهیم [۹].

ضخامت ۱ cm و ۲ cm بوده و در مرکز جریان هوا قرار گرفته‌اند.

• قبل و بعد از کانال خشک کردن رطوبت سنج هایی از نوع حباب تر و حباب خشک قرار گرفته که باتوجه به دماهای خوانده شده و معادله تبدیل آن رطوبت گاز عبوری تعیین می‌شود. در این رطوبت سنجها قطر حفره قبل از مخازن تر و خشک ۱۶ mm بوده و سبب ایجاد سرعتی بیشتر از ۵ m/sec در حداقل دبی جریان خواهد شد. رطوبت سنجهای حباب تر و حباب خشک در محدوده رطوبت نسبی بین ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ و دمای کمتر از ۶۵°C دقت خوبی دارند. برای حالتی که دمای گاز از ۶۵°C بیشتر باشد؛ از یک بخش نمونه گیر استفاده می‌شود که متشکل از یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای ناهمسو و یک رطوبت سنج و یک اریفیس می‌باشد. مبدل دارای طول ۱۱۵ cm می‌باشد و قادر است که دمای متغیر ورودی بین ۶۰ تا ۱۲۰°C را به دمایی بین ۳۲ تا ۶۵°C برساند. نرخ جریان نمونه نیز بین ۰/۸ تا ۲ gr/sec در نظر گرفته شده است. اریفیس نیز دارای طول ۹۵ cm و $\beta=0/۲۳$ و قطر اسمی ۴۰ cm از استاندارد DIN2440 انتخاب شده است. در انتهای بخش نمونه گیری نیز یک دمنده در حالت مکش برای جبران افت فشار این بخش تعبیه شده است.

بدین ترتیب این سیستم آزمایشگاهی - نیمه صنعتی قادر است پارامترهای اساسی فرایند خشک کردن را کنترل و اندازه گیری نموده و برای تحقیق روی سینتیک خشک کردن در خشک‌کنهای همرفتی ایدال می‌باشد.

شرایط انجام آزمایشها

در هر یک از دماهای ۴۰°C، ۶۰°C، ۸۰°C و ۱۰۰°C آزمایشهای خشک کردن در دو دبی حد اقل و حداکثر انجام گرفته است. حد اقل دمای انفجار^{۱۳} گزارش شده برای پیکریت در شرایط توده ۱۷۰°C می‌باشد که به طور استاندارد باید ۵۰°C کمتر از آن را در طراحی به کار برد. در آزمایشها برای ایمنی بیشتر در برابر خطر انفجار حداکثر از دمای ۱۰۰°C استفاده شده است که ۷۰°C کمتر از

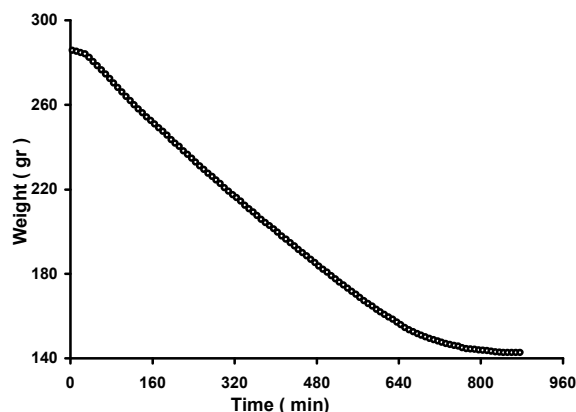
است؛ دبی آن اندازه گیری می‌شود. به علت گستردگی محدوده دبی که بین ۳ تا ۴۰ gr/sec می‌باشد؛ دو صفحه اریفیس^{۱۲} در نظر گرفته شده که یکی با $\beta=0/۲$ و قطر حفره ۱۵ mm در محدوده دبی بین ۳ تا ۱۰/۷ gr/sec اختلاف ارتفاعی بین ۳/۱ تا ۳۹ cm آب ایجاد می‌نماید. دومی نیز با $\beta=0/۳۶$ و قطر حفره ۲۹ mm در محدوده دبی بین ۱۰/۷ تا ۳۹/۷ gr/sec قادر است اختلاف ارتفاعی بین ۲/۵ تا ۴۰ cm از آب در لوله U شکل ایجاد نماید. طول اریفیس در مجموع ۱۸۴ cm و قطر اسمی لوله آن ۸۰ mm از استاندارد DIN2440 انتخاب شده است. برای اندازه گیری دبی هوای عبوری از اریفیس برنامه کامپیوتری Flowmeter Calculator نوشته شده است که در آن پس از محاسبه خواص فیزیکی گاز عبوری نظیر ویسکوزیته، دانسیته، ضریب تراکم پذیری و سایر پارامترهای گاز به محاسبه عدد رینولدز و ضریب انبساط گاز و ضریب تخلیه گاز می‌پردازد و از طریق یک زیر برنامه حدس و خطایی با استفاده از معادلات استاندارد StolzII، L/TC 28، ANSI2530 و ISO1978 به محاسبه دبی می‌پردازد و بدین ترتیب اختلاف ارتفاع آب تبدیل به دبی گاز عبوری می‌شود. اریفیس در شرایط D&D/2 tap و Flange tap طراحی شده است [۱۱].

• پس از اندازه گیری دبی؛ جریان هوا از یک گرمکن که دارای دو المان حرارتی ۵ kW و چهار المان ۱ kW می‌باشد و قادر است هوا را در حداکثر دبی به دمایی بالاتر از ۱۲۰°C برساند، عبور می‌نماید. المانها توسط یک کنتاکتور به یک کنترل کننده دیجیتال دما متصل می‌باشند که دمای عبوری از کانال خشک کردن را توسط دمای خوانده شده از طریق ترموکوپل الکتریکی که روی سینی مواد نصب شده؛ تنظیم می‌نماید.

• پس از آنکه هوایی با رطوبت معین و دمای معین و سرعت معین تهیه شد، آن را از کانال خشک کردن عبور می‌دهیم. کانال دارای ابعاد ۱۵cm*۱۲*۸۵ بوده و در فاصله ۶۰ cm آن سینی مواد از یک ترازو با دقت ۰/۱ gr \pm آویزان است. سینیها دارای سطح مقطع ۱۵*۱۰ cm و

نسبی و مطلق و ویسکوزیته گاز مرطوب خشک کننده می‌باشد. سپس اطلاعات خام مربوط به توزین پیوسته وارد برنامه کامپیوتری **inputgenerator** شده و یک فایل متن برای برنامه‌های تولید کننده جداول اطلاعات منحنی‌ها ؛ یعنی برنامه های **table1** و **table2** تولید می‌شود. خروجی برنامه **table1** جدولی است که در آن تغییرات وزن و دما و محتوی رطوبت مرطوب و کل آب تبخیر شده در هر لحظه و مقدار آب تبخیر شده در هر بازه زمانی را در اختیار می‌گذارد. خروجی **table2** نیز جدولی است که در آن محتوی رطوبت خشک ، شیب منحنی در هر لحظه ، مقدار سرعت خشک شدن و مقدار شار خشک شدن را در هر لحظه معین می‌کند. برای تعیین سرعت خشک کردن در هر لحظه از روش دیفرانسیل گیری مستقیم از اطلاعات منحنی محتوی رطوبت - زمان استفاده شده است. برای دیفرانسیل گیری از روش عددی تفاوت محدود^{۱۴} تحت شرایط مرکزی^{۱۵} استفاده شده است. با معین شدن سرعت می‌توان شار را با معلوم بودن سطح مؤثر خشک شدن مشخص نمود [۱۲].

با استفاده از اطلاعات فوق منحنی های پنجگانه خشک کردن شامل منحنی وزن - زمان، منحنی خشک کردن (محتوی رطوبت - زمان)، منحنی سرعت خشک کردن، منحنی کریشر(سرعت - محتوی رطوبت) و منحنی دما - زمان ترسیم می شوند.



شکل ۲: منحنی اصلی برای آزمایش

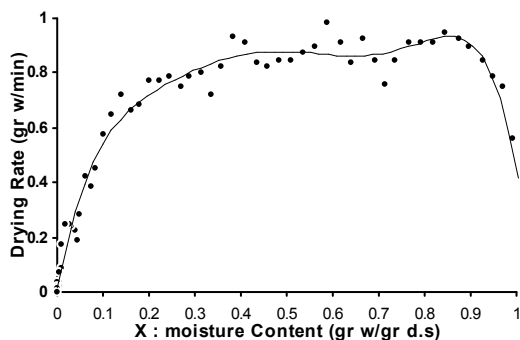
$$T=60^{\circ}\text{C Flow} =10.97 \text{ gr/sec } V=56.78 \text{ cm} / \text{sec}$$

حداقل دمای گزارش شده می‌باشد. درحداکثر دبی برای هر آزمایش عدد رینولدز در محدوده ۲۹۶۰۰ تا ۲۹۹۸۰ و سرعت گاز خشک کننده از روی سینی در محدوده ۱۴۵ تا ۱۴۹ cm/sec و دبی عبوری گاز نیز در محدوده ۳۲/۸ تا ۳۳/۲ gr/sec ثابت نگه داشته شد. در حالت دبی حداقل نیز عدد رینولدز در محدوده ۷۶۰۰ تا ۱۰۶۰۰ و سرعت گاز خشک کننده از روی سینی در محدوده ۵۰ تا ۵۲ cm/sec و دبی عبوری گاز نیز در محدوده ۱۰ تا ۱۱/۹ gr/sec ثابت نگه داشته شد. رطوبت گاز عبوری بر مبنای رطوبت مطلق در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۴ گرم آب بر گرم هوای خشک، ثابت نگه داشته شد. در هرآزمایش تقریباً ۲۵۰ gr از ماده مرطوب با رطوبت اولیه ۱۰۰٪ الی ۱۲۰٪ بر مبنای خشک روی سینی قرار داده شد و در معرض عبور گاز خشک کننده قرار گرفت. دانسیته مواد تر بین ۱/۱ تا ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب و دانسیته مواد خشک نهایی بین ۰/۵۸ تا ۰/۶۲ gr/cm³ می‌باشد.

روند تجزیه و تحلیل اطلاعات بدست آمده از آزمایشها و ترسیم منحنی ها

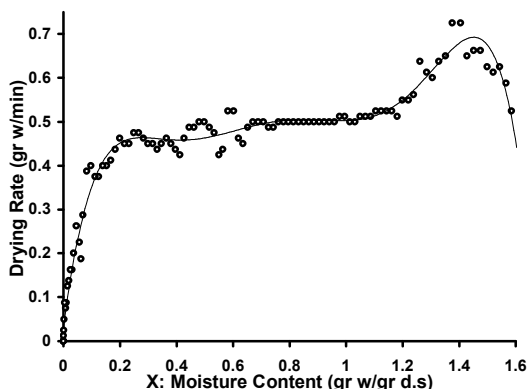
در هر آزمایش در واقع جدولی تهیه می‌شود که در آن به ازای فواصل زمانی یکسان (معمولاً هر ۴ دقیقه یکبار) مقادیر وزن نمونه، دمای خشک و تر رطوبت سنجهای ورودی و خروجی و دمای متوسط توده ماده خشک شونده؛ ارائه می‌شود. همچنین تفاوت خوانده شده از لوله U شکل اریفیس دمای هوای عبوری از اریفیس، دمای خشک و تر برای هوای عبوری از اریفیس و وزن سینی خالی به عنوان مشخصات دیگر آزمایش یادداشت می‌شود. اطلاعات مربوط به دبی سیال یعنی تفاوت خوانده شده در لوله U شکل، مشخصات فیزیکی اریفیس و دمای گاز عبوری و دمای خشک و تر سیال عبوری به برنامه کامپیوتری **flowmeter calculator** داده می‌شود. خروجی این برنامه اطلاعات مربوط به عدد رینولدز، سرعت و دبی سیال عبوری از روی سینی به همراه مشخصات دیگر گاز مثل دانسیته و رطوبت

بهترین منحنی برای برازش^{۱۶} کردن منحنی نامبرده یک منحنی درجه سوم است. این عمل توسط برنامه 'Excel Trendline' انجام گرفته و توافق منحنی درجه سوم با منحنی‌های محتوی رطوبت - زمان و وزن - زمان بیش از ۹۹/۸ % می‌باشد که این خود دلیلی بر دقت و صحت نتایج بدست آمده می‌باشد.



شکل ۶: منحنی کریشر برای آزمایش

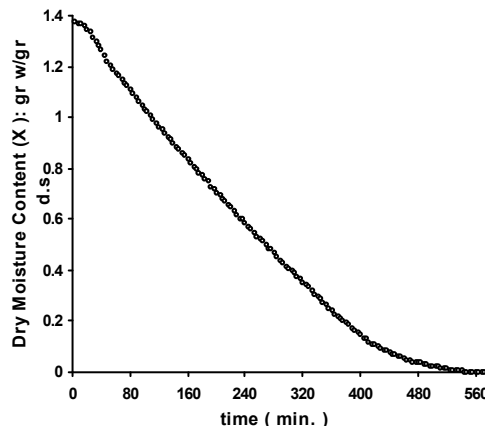
T=100 °C Flow=32.74gr/sec V=145.39 cm/Sec



شکل ۷: منحنی کریشر برای آزمایش

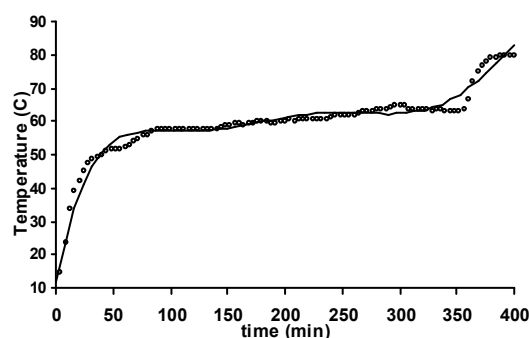
T=100 °C Flow=10.1 gr/sec V=59.23 cm/sec

منحنی‌های سرعت - زمان و کریشر اصولاً ماهیتی دنداندار^{۱۷} دارند و این موضوع به دقت ترازوی به کار رفته (که دقت ترازوی ما در حد ۰/۱ gr ± بود) و نسبت نوسان به علامت ایجاد شده بستگی دارد. نسبت نوسان به علامت در اغلب آزمایشهای خشک کردن که به روش مستقیم یا غیرمستقیم انجام می‌گیرد وارد می‌شود و سبب دنداندار شدن منحنی‌های سرعت - زمان و منحنی مستقل از زمان کریشر می‌شود. روشهای به کار رفته برای هموار سازی این منحنی‌ها خود یک زمینه تحقیقاتی بوده و هم اکنون محققان روی آن کار می‌کنند. معمولاً



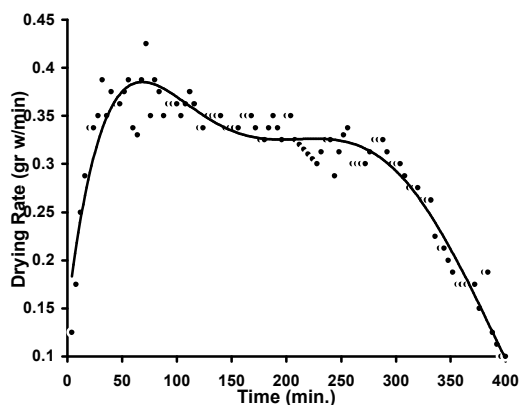
شکل ۳: منحنی خشک کردن برای آزمایش

T=60°C ; Flow=33.14 gr/sec V=147.54 cm/sec



شکل ۴: منحنی دما - زمان برای آزمایش

T=80°C Flow 32.88 gr/sec V=146.48 cm/sec



شکل ۵: منحنی سرعت خشک کردن برای آزمایش

T=80°C Flow =11.96 gr/sec V =53.04 cm/sec

بحث و بررسی منحنی‌های بدست آمده

منحنی‌های وزن - زمان و منحنی محتوی رطوبت - زمان کاملاً هموار می‌باشند و این به علت طولانی بودن زمان خشک شدن و پایین بودن نوسان بوجود آمده در توزین می‌باشد. این امر سبب شده که دقت نتایج در حد مطلوبی باشد. مطابق روش معمول

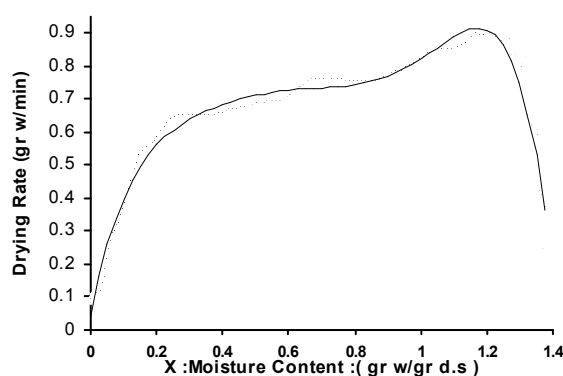
تبخیر از سطح می باشند [۳]. این مراحل به خوبی در منحنی‌های کریشر و سرعت - زمان دیده می شود [۳]، [۱۳].

آزمایشها نشان می دهد که بیشترین سرعت تبخیر مربوط به آزمایش انجام گرفته در دمای 100°C و سرعت گاز عبوری 146 cm/s می باشد. کل زمان خشک شدن در این حالت 240 min می باشد. کمترین سرعت تبخیر نیز مربوط به آزمایش انجام گرفته در 40°C و سرعت گاز عبوری برابر با 53 cm/s می باشد که در این شرایط کل زمان خشک شدن در حدود 1496 min می باشد. برای هرآزمایش مقدار آب موجود در ماده تر اولیه تقریباً برابر و معادل 139 gr بوده است.

اندازه گیری ضرایب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز

روابطی که برای بیان ضرایب انتقال جرم و حرارت گسترش یافته‌اند؛ عمدتاً مربوط به حالاتی است که در آنها انتقال جرم یا حرارت به شکل منفرد اتفاق می افتد. فرایند خشک کردن یک پدیده انتقال حرارت و جرم همزمان می باشد که در این موارد انتقال رطوبت بر ضریب انتقال حرارت اثر می گذارد. بنابراین در این گونه موارد باید از روابطی که به طور خاص برای انتقال جرم و حرارت همزمان توسعه یافته است استفاده نمود. تعداد این گونه روابط در مقایسه با روابط بیان کننده پدیده‌های انتقال منفرد بسیار کمتر است. برای بدست آوردن ضرایب انتقال همزمان از اصل تشابه انتقال جرم و حرارت و آزمایش معروف لوله جدار مرطوب^{۲۰} استفاده می شود. در دیواره لوله یک مایع خالص مثل آب جریان دارد. در لوله نیز یک گاز حامل خنثی مثل هوا جریان دارد. گاز عاری از رطوبت و با دمای بالا وارد لوله می شود. دمای آب در این حالت نهایتاً به دمای اشباع آدیباتیک می رسد. برای سیستم آب و هوا این دما تقریباً با دمای حباب تر برابر است. آزمایشهایی که توسط محققین برای بدست آوردن ضرایب انتقال جرم و حرارت همزمان در لوله جدار مرطوب انجام گرفته است به رابطه نیمه تجربی زیر منتهی شده است [۷].

چندین روش برای هموار سازی این منحنی‌ها وجود دارد که یکی از آنها روش برازش یک چند جمله‌ای درجه بالا با استفاده از روش حداقل مربعات می باشد. چند جمله‌ای‌های برازش شده از درجه شش بوده و دارای توافق نزدیکی با منحنی اصلی می باشد (این توافق در حد $98\% \sim 91\%$ می باشد). همچنین می توان از برنامه Table Curve smooth... استفاده نمود. یک نمونه از این منحنی‌های هموار سازی شده که به خوبی با مراحل خشک شدن مطابقت دارد در شکل (۸) مشاهده می شود.



شکل ۸: منحنی هموار سازی شده کریشر برای آزمایش
 $T=60^{\circ}\text{C}$ Flow 33.14 gr/sec $V=147.54\text{ cm/sec}$

در مرحله اول که به مرحله برانگیختگی^{۱۸} مشهور است؛ دمای مواد برای رسیدن به شرایط تعادلی بالا می رود. سپس یک مرحله تبخیر با دبی بالا موجود است که این به خاطر وجود یک لایه نازک اولیه آب روی سطح ماده در سینی می باشد. پس از آن سرعت تبخیر رطوبت از سطح ناگهان کاهش یافته و به مقدار مشخص ثابت دیگری می رسد. سپس تا مدتی تبخیر با همین سرعت ثابت ادامه پیدا میکند؛ که اصطلاحاً به این مرحله، مرحله تبخیر با سرعت ثابت گفته می شود. در این شرایط میزان مهاجرت رطوبت از لایه‌های زیرین به سطح ماده با میزان تبخیر آب از سطح سینی برابر می باشد. پس از این مرحله، مرحله تبخیر با سرعت نزولی که اصطلاحاً مرحله تبخیر با شرایط ممانعتی^{۱۹} نامیده می شود؛ آغاز می شود. تحت این شرایط پدیده‌های انتقال جرم و حرارت در درون ماده تر کنترل کننده سرعت

جدول ۱: ضرایب انتقال جرم و حرارت تئوری و تجربی در شرایط آزمایشی مختلف.

Air flowing Temperature °C	Mass flowrate gr /sec	Y _s Empirical gr w/gr d.a	T _s Empirical °C	h _c Empirical W/m ² °C	h _c Theoretical W/m ² °C	K _y Empirical kgd.a/m ² s	K _y Theoretical kgd.a/m ² s
100	30.83	0.09326	51.4	29.952	16.454	0.029190	0.016027
	11.289	0.09562	51.8	16.993	8.084	0.016565	0.007876
80	30.83	0.06058	43.8	29.518	16.035	0.029012	0.015751
	11.289	0.06478	45	15.99	7.834	0.015705	0.007693
60	30.83	0.03906	36.2	29.025	15.622	0.028775	0.015480
	11.289	0.04338	38	16.790	7.656	0.016644	0.007586
40	30.83	0.02171	26.4	33.843	15.258	0.033862	0.015262
	11.289	0.02513	28.8	17.351	7.469	0.017353	0.007469

علاوه بر سطح از طریق کف و دیواره‌ها نیز منتقل شود؛ سبب

وجود آمدن شرایط تعادلی جدیدی می‌شود که در آن دمای مایع و فصل مشترک بیشتر از دمای اشباع آدیاباتیک می‌باشد. این نتیجه بسیار مهمی است که هم سبب تغییر در ضرایب انتقال و هم سبب تغییر در نیروهای محرکه جرمی و حرارتی می‌شود. در این شرایط سرعت انتقال حرارت به سطح و سرعت انتقال رطوبت از سطح افزایش می‌یابد. دمای فصل مشترک گاز و مایع در این شرایط کاملاً به ژئومتری سیستم مورد آزمایش بستگی دارد و نمی‌توان رابطه خاصی را پیشنهاد نمود [۷]، [۱۴].

بنابراین برای اندازه گیری ضرایب انتقال و دمای اشباع در این شرایط آزمایشگاهی را ترتیب داده‌ایم که در آنها بجای مواد تر آب خالص در سینی ریخته و در معرض عبور جریان گاز با همان شرایط خشک کردن قرار داده‌ایم. در این شرایط تمام مقاومتهای موجود در برابر انتقال جرم و حرارت در فاز گاز قرار داشته و در فاز مایع هیچ مقاومتی موجود نیست. بنابراین ضرایب انتقالی که بدست می‌آید کاملاً مربوط به فاز گاز می‌باشد. در چنین شرایطی برای بدست آوردن ضرایب انتقال از روابط موازنه جرم و حرارت در فاز گاز استفاده می‌کنیم:

$$R \cdot \Delta H = \{h_c \cdot A_1 + h_m \cdot (A_1 + 2A_2 + 2A_3)\} \cdot (T_g - T_l)$$

$$h_c = h_g \cdot Ac; \quad Ac: \text{Ackermann Corrector}$$

$$Ac = E / (\exp(E) - 1); \quad E = R \cdot Cs / h_g$$

موازنه جرم:

$$R = K_y \cdot A_1 \cdot (Y_s - Y_g); \quad Y_s = (M_w / M_{da}) \cdot P_s / (P_t - P_s)$$

$$St_D \cdot Sc = St_{h,Pr} = 0.1 Re_e^{-0.29}$$

که در آن ضرایب انتقال از روابط زیر تعیین میشوند:

$$Nu = h_c \cdot D_e / K = 0.1 Re_e^{0.71} Pr^{1/3}$$

$$Sh = K_y \cdot D_e / \rho D = 0.1 Re_e^{0.71} Sc^{1/3}$$

تحت این شرایط سرعت انتقال جرم و حرارت به صورت زیر است:

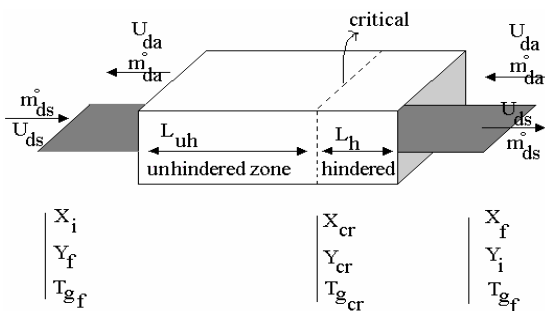
$$R = K_y \cdot A \cdot (Y_s - Y_g)$$

$$Q = R \cdot \Delta H_{lv} = h_c \cdot A \cdot (T_g - T_s)$$

سیستم آزمایشگاهی ما به گونه‌ای طراحی شده که در آن حرارت هم از طریق کف و دیواره‌ها و هم از طریق سطح سینی منتقل می‌گردد. برای چنین مواردی دمای فصل مشترک و ضرایب انتقال از رابطه تئوریک داده شده قابل محاسبه نیست. در حالتی که انتقال حرارت فقط از طریق سطح صورت گیرد، پس از رسیدن به شرایط تعادلی؛ حرارت منتقل شده به سطح دیگر صرف افزایش دمای مایع نمی‌شود بلکه صرف تبخیر در دمای ثابت می‌شود. در این شرایط سرعت انتقال رطوبت از سطح بر ضریب انتقال حرارت به سطح اثر می‌گذارد به طوری که بخشی از حرارتی که با مکانیسم همرفتی توسط سطح دریافت شده بدلیل انتقال رطوبت از سطح جدا می‌شود و این سبب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود مجموعه شرایط فوق سبب بوجود آمدن یک شرایط تعادلی می‌شود که در آن دمای فصل مشترک نهایتاً به دمای اشباع آدیاباتیک می‌رسد. در حالی که اگر حرارت

متنوع ارائه می‌شود که امکان انتخاب یک خشک‌کن مناسب را از میان دهها مورد دیگر امکان پذیر می‌سازد.

ماهیت همرفتی^{۲۳} خشک‌کنهای نوارنقاله‌ای بگونه‌ای است که طی عملیات خشک کردن دو ناحیه کاملاً مجزا در آنها بوجود می‌آید. یکی ناحیه ممانعتی^{۱۹} و دیگری ناحیه غیر ممانعتی^{۲۴}. مرز میان دو ناحیه مبین شرایط بحرانی در جامد مرطوب می‌باشد. ناحیه غیر ممانعتی متناظر با شرایط خشک کردن با دبی ثابت بوده و در آن فاز گاز، کنترل کننده فرایند خشک کردن است. ناحیه ممانعتی نیز متناظر با خشک کردن در شرایط دبی نزولی در آزمایش‌های سینتیک خشک کردن می‌باشد که در آن فاز جامد، کنترل کننده فرایند انتقال است [۱]، [۷].



شکل ۹: شماتیک تقسیم بندی منطقه ای خشک‌کن.

در ادامه مدلسازی ریاضی هریک از بخشهای ممانعتی و غیر ممانعتی و نتایج حاصل از آنها به تفکیک و به طور خلاصه آورده می‌شود.

الف: موازنه جرم و انرژی در بخش غیر ممانعتی

شرایط غیر ممانعتی متناظر با شرایط خشک کردن با سرعت ثابت در آزمایشهای سینتیک خشک کردن می‌باشد. مشخصه این بخش در فرایند خشک کردن آنست که دما و رطوبت در فصل مشترک فاز جامد و گاز با دما و رطوبت تعادلی برابر بوده و تقریباً ثابت می‌ماند. در این شرایط معادله معروف رطوبت سنجی^{۲۵} که بیان ماکروسکوپی انتقال انرژی می‌باشد؛ برقرار بوده و با توجه به اینکه فاز گاز کنترل کننده فرایند انتقال می‌باشد بنابراین مدلسازی در فاز

در روابط فوق مقدار R که همان سرعت تبخیر از سطح می‌باشد و دماها و سایر پارامترها از طریق آزمایشهای ترتیب داده شده مشخص می‌شود. مقدار دمای فصل مشترک تئوری از طریق رابطه رطوبت سنجی مشخص می‌شود.

$$\frac{(Y_s - Y_g)/(T_g - T_s)}{h_c/K_y} = \frac{(h_c/K_y)/\Delta H_{lv}}{Le \cdot C_s}$$

برای سیستم هوا - بخار آب : $Le \approx 1$

جدول (۱) نتایج بررسی ضرایب انتقال جرم و حرارت و دمای فصل مشترک تجربی را در مقایسه با نتایج تئوری نشان می‌دهد. نتایج به کمک برنامه Transpor استخراج شده اند [۱].

طراحی خشک کن نوار نقاله‌ای بر اساس اطلاعات بدست آمده از سینتیک خشک کردن

پس از مطالعه و بررسی انواع خشک‌کنهای مناسب برای مواد انفجاری، خشک‌کن نوارنقاله‌ای پیوسته جهت طراحی انتخاب شد. در این نوع خشک‌کنها توده مواد تر بر روی نقاله از یک سو و گاز خشک کننده از سوی دیگر به کانال خشک‌کن وارد می‌شود. هدف از طراحی خشک‌کن در اینجا ارائه پارامترهای طراحی پایه خشک‌کن نظیر ابعاد خشک‌کن (طول و عرض نقاله و کانال و ارتفاع کانال)، حداقل دبی هوای لازم، دبی هوای مصرفی، زمان کل خشک شدن مواد، پروفایل دما و رطوبت گاز و توده جامد در حال عبور، سرعت حرکت نقاله و سرعت عبور گاز خشک کننده می‌باشد.

بمنظور دست یابی به پارامترهای فوق؛ خشک‌کن مورد نظر با نوشتن معادلات میکروسکوپی و ماکروسکوپی انتقال جرم و انرژی مدل سازی ریاضی می‌شود. نتیجه این عمل یک سیستم مختلط معادلات دیفرانسیل و جبری^{۲۲} می‌باشد که بمنظور کاهش درجه آزادی سیستم معادلات و اعمال شرایط واقعی خشک‌کن از پارامترها و نتایج تجربی حاصل از بررسی‌های سینتیکی و برازش منحنی‌ها استفاده شد. مزیت استفاده از برنامه‌های کامپیوتری در حل سیستم معادلات این است که نتایج محاسبات طراحی پایه به شکل جداول و منحنی‌هایی برای شرایط

قرار گرفته است. با توجه به شرایط مذکور برای هر یک از قسمت‌ها می‌توان موازنه جرم و انرژی را بر قرار نمود. بدلیل حرکت گاز از روی توده مواد مرطوب از ترم انتقال جرم و انرژی در اثر نفوذ ملوکولی^{۲۷} در برابر ترم انتقال جرم و انرژی در اثر جابجایی جرم^{۲۸} صرفنظر می‌شود. بنابراین در معادلات ترم وابسته به ضریب نفوذ ملوکولی جرمی یا حرارتی نخواهیم داشت. موازنه جرم و انرژی در شرایط میکروسکوپیک برای هر Section از بخش غیر ممانعتی که در آن فاز گاز کنترل کننده فرایند انتقال می‌باشد منتهی به معادلات زیر خواهد شد:

$$\frac{dY}{dz} - \left[\frac{K_{y_{emp}} \cdot w}{m_{da}^{\circ}} \right] \cdot (Y_g - Y) = 0$$

$$\frac{dT}{dz} - \left[\frac{h_{c_{emp}} \cdot w}{m_{da}^{\circ} \cdot C_s} \right] \cdot (T - T_g) = 0$$

(۱)

موازنه ماکروسکوپیک (جبری) جرم و انرژی نیز به معادله خط کار^{۲۹} و معادله رطوبت سنجی^{۲۵} منتهی خواهد شد:

$$X = \frac{m_{da}^{\circ}}{m_{ds}^{\circ}} \cdot (Y - Y_{cr}) + X_{cr}$$

$$\frac{m_{da}^{\circ}}{m_{ds}^{\circ}} = \frac{(X_{cr} - X_i)}{(Y_r - Y_{cr})} \quad \text{که در آن}$$

$$\frac{h_{c_{emp}} / K_{y_{emp}}}{\Delta H_{Ts}^{kr}} = \frac{(Y_g - Y)}{(T - T_g)}$$

(۲)

مجموعه معادلات فوق یک سیستم D.A.E تشکیل می‌دهد. معادلات دیفرانسیل سیستم فوق از نوع خطی، هموزن و initial value problem بوده که شرایط اولیه آنها برای هر قسمت از حل قسمت قبلی بدست می‌آید. بنابراین:

$$@ Z=0 : T(z) = T_{i-1}$$

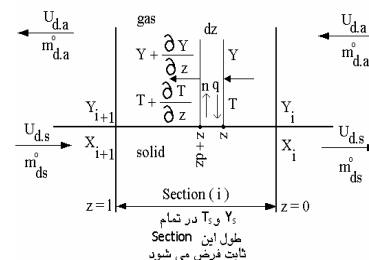
$$@ Z=0 : Y(z) = Y_{i-1}$$

(۳)

در سیستم معادلات فوق پارامترهای مجهول عبارتند از: Z (یا همان Δl) که طول هر قسمت می‌باشد و همینطور Y و X و T که مجموعاً چهار پارامتر خواهند بود. پارامترهایی که برای حل سیستم معادلات فوق باید تعیین گردند؛ عبارتند از: ضرایب انتقال جرم و حرارت تجربی که قبلاً نحوه بدست آوردن آنها از طریق آزمایشهای سینتیک خشک

گاز توسعه می‌یابد. با وجودی که ضرایب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز تقریباً ثابت می‌ماند اما بدلیل کاهش پیوسته دما و افزایش پیوسته رطوبت؛ نیروی محرکه انتقال دائماً در حال کاهش است که این موجب کاهش پیوسته سرعت انتقال جرم و حرارت خواهد شد [۷].

المانی در فاز گاز در نظر می‌گیریم و از تئوری فیلمی استفاده می‌کنیم. برای فاز گاز و فاز جامد یک مقدار متوسط دما و رطوبت در نظر می‌گیریم. جهت‌های عرض و ارتفاع خشک‌کن را هموزن فرض نموده و تغییرات غلظت و دما را فقط در جهت طول در نظر می‌گیریم. این فرضیات موجب کاهش پیچیدگی‌های حل سیستم معادلات جبری و دیفرانسیل نهایی شده و در عین حال دقت پاسخ آنها را نیز در حد مطلوبی حفظ می‌نماید.



شکل ۱۰: المان مفروض در هر Section جهت برقراری موازنه جرم و انرژی.

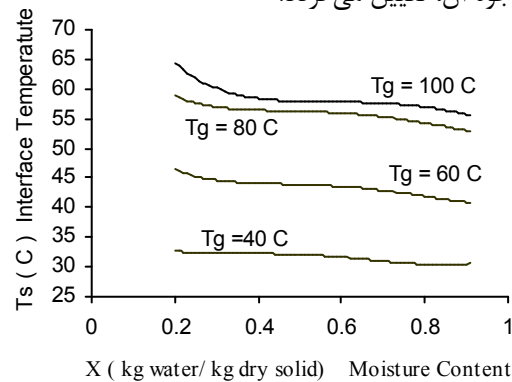
از آنجایی که شرط برقراری معادلات آنست که دما T_s و رطوبت Y_s در فصل مشترک جامد مرطوب در مجاورت ضخامت فیلم گاز ثابت بماند؛ و در عین حال در شرایط واقعی چنین حالتی برقرار نخواهد شد و طی فرایند خشک‌کردن دما و رطوبت در فصل مشترک ماده مرطوب و گاز تغییر خواهد کرد؛ لذا بایستی خشک‌کن در بخش غیر ممانعتی قسمت بندی^{۲۶} شود. بدین ترتیب با توجه به این که طول هر قسمت خیلی کوچک است؛ با تقریب بسیار خوبی می‌توان دما و رطوبت را در فصل مشترک جامد و گاز ثابت فرض کرد و بدین ترتیب سیستم معادلات را قابل حل نمود. طول هر قسمت پارامتری است که از طریق حل سیستم معادلات بدست می‌آید [۸].

بخش غیر ممانعتی مابین منطقه بحرانی و بخش خروج گاز که متناظر با ورود جامد مرطوب می‌باشد

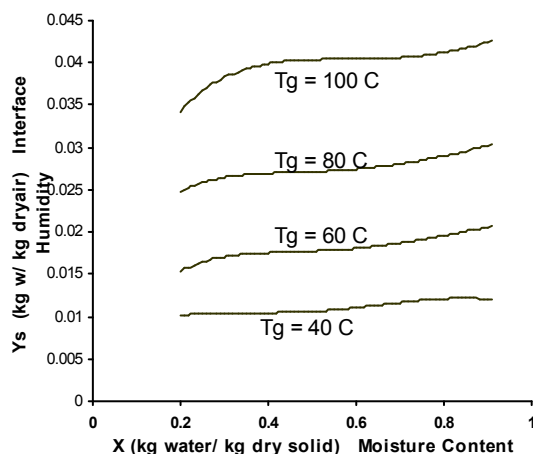
جرم و انرژی در شرایط ماکروسکوپی برای سینی مواد مرطوب و همینطور ضرایب انتقال جرم و حرارت تجربی می توان نوشت [۳] و [۱۳]:

$$\begin{aligned} n^{ev} \cdot \Delta H_{T_g}^{lv} &= h_{emp} \cdot (T_g - T_s) \cdot A_{eff} \\ n^{ev} &= K_{y_{emp}} \cdot (Y_s - Y_g) \cdot A_{eff} \end{aligned} \quad (۴)$$

مقدار Y_g ، رطوبت گاز عبوری از طریق اندازه گیری رطوبت هوا توسط رطوبت سنج حباب تر و حباب خشک معین می‌گردد. دمای گاز عبوری از روی سینی نیز در هر آزمایش مشخص است؛ سطح موثر سینی نیز پس از نوشتن معادلات تئوریک انتقال جرم و حرارت در سطح سینی و تاثیر مساحت هر یک از دیواره‌های سینی بر ضریب انتقال حرارت هر یک از وجوه آن، تعیین می‌گردد.



شکل ۱۱: پروفایل دمای فصل مشترک جامد مرطوب و گاز.



شکل ۱۲: پروفایل رطوبت فصل مشترک جامد مرطوب و گاز.

n^{ev} نیز همان نرخ انتقال جرم یا تبخیر رطوبت از سینی می‌باشد که از طریق برازش منحنی کریشر به صورت یک پروفایل بر حسب X (محتوی رطوبت

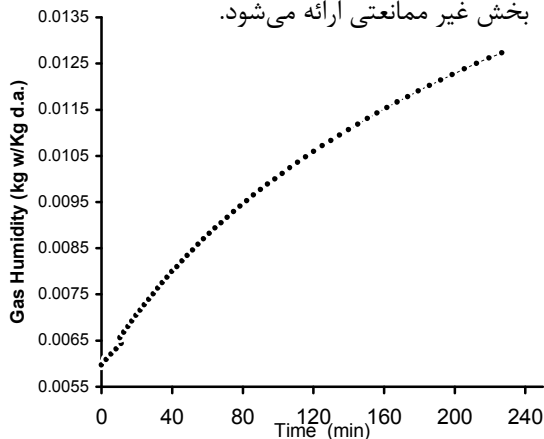
کردن ارائه شد. T_s و Y_s و همینطور پارامتر X_{cr} نیز باید از طریق آزمایشهای انجام شده تعیین گردد. مقدار m^{o}_{ds} از ابتدا معین است؛ زیرا یک پارامتر طراحی است. مقدار حداقل m^{o}_{da} یک پارامتر نامعین است و باید طی حل سیستم معادلات با توجه به شرایط تعادلی به شکل حدس و خطایی تعیین گردد.

برای یافتن m^{o}_{da} حداقل ابتدا یک مقدار به آن اختصاص می‌دهیم پس از حل هر قسمت با توجه به معین شدن مقادیر T و Y عدم نزدیک شدن به شرایط تعادلی با روابط $(Y_s - Y) > 0$ و $(T - T_s) > 0$ چک می‌گردد. در هر قسمت اگر یکی از روابط فوق برقرار نشود نشان دهنده عدم انتقال جرم و حرارت بوده و بنابراین زمان و طول آن قسمت بسیار بزرگ (بینهایت فیزیکی) خواهد شد. بنابراین m^{o}_{da} حداقل را به گونه‌ای تنظیم می‌نماییم که فقط در قسمت نهایی به شرایط تعادلی نزدیک گردیم و بنابراین برنامه کامپیوتری حل سیستم معادلات بگونه ای است که به ازای نزدیکی به شرایط عدم برقراری نیروی محرکه انتقال در هر قسمت به غیر از قسمت آخر پیغام خطای مناسب جهت افزایش m^{o}_{da} حداقل اعلام نماید. بنابراین سیستم معادلات در عین حال که باید به شکل همزمان حل گردد؛ نیازمند تصحیح و حل مجدد به ازای مقادیر m^{o}_{da} حداقل تصحیح شده می‌باشد. پس از تعیین حداقل هوای مورد نیاز یک بار دیگر باید سیستم معادلات را به ازای هوای عبوری لازم که معادل $1/2$ یا $1/3$ یا $1/4$ برابر حداقل هوای مورد نیاز می‌باشد؛ حل نمود و پاسخهای نهایی پروفایل غلظت و دما در فاز گاز و پروفایل رطوبت به ازای طول خشک کن در جامد مرطوب و طول خشک کن و زمان کل مورد نیاز برای عبور از بخش غیر ممانعتی و سرعت عبور نقاله را در بخش غیر ممانعتی تعیین نمود [۱۳].

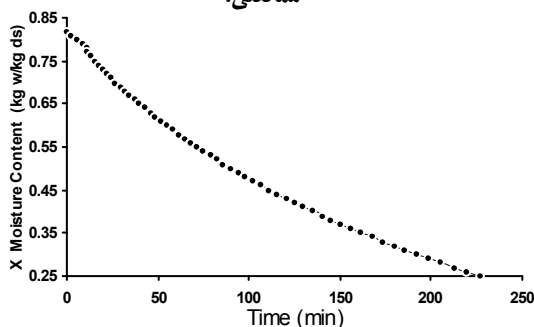
دما و رطوبت فصل مشترک

برای تعیین دما و رطوبت در فصل مشترک (T_s, Y_s) ، از منحنی کریشر که از طریق آزمایشهای سینتیکی در سیستم همرفتی بدست آمده؛ استفاده می‌کنیم. با استفاده از معادلات موازنه

محصول خشک تولیدی (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر ساعت) و مقادیر مختلف هوای اضافی مصرفی (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪) صورت گرفته است. در اینجا فقط نتایج مربوط به پروفایل دما و رطوبت در خشک کن برای شرایط هوای اضافی ۳۰٪ به همراه پروفایل رطوبت جامد مرطوب در بخش غیر ممانعتی ارائه می‌شود.



شکل ۱۴: پروفایل رطوبت هوای عبوری از خشک کن در شرایط ۱/۳ برابر حداقل هوای لازم برای منطقه غیر ممانعتی.



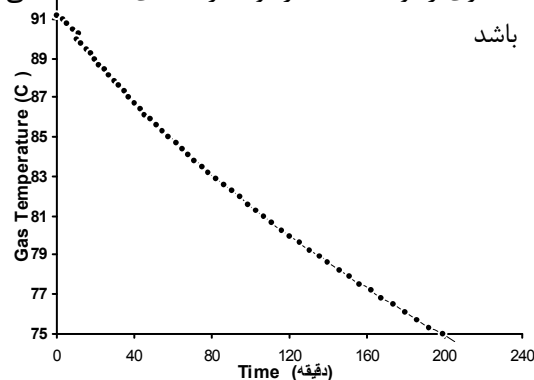
شکل ۱۵: پروفایل رطوبت جامد مرطوب عبوری در شرایط ۱/۳ برابر حداقل هوای لازم برای منطقه غیر ممانعتی.

مدلسازی ریاضی بخش ممانعتی

در منطقه ممانعتی که متناظر با بخش خشک کردن با دبی نزولی می‌باشد، فاز جامد مرطوب کنترل کننده فرایند خشک کردن می‌باشد. در این منطقه رطوبت سطح جامد مرطوب تقریباً برابر با رطوبت نهایی خواهد بود؛ با در نظر گرفتن یک المان در بخش ممانعتی می‌توان موازنه جرم میکروسکوپی برای یافتن پروفایل غلظت در جامد مرطوب و همینطور موازنه جرم و حرارت ماکروسکوپی برای یافتن پروفایلهای غلظت و دما در فاز گاز را انجام داد.

جامد) و به صورت یک معادله جبری آماده می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان پروفایل های T_s و Y_s را بر حسب X هم بصورت منحنی و هم به شکل یک معادله جبری جهت استفاده در حل سیستم معادلات، آماده نمود.

شکلهای (۱۴) و (۱۵) بیانگر نحوه تابعیت دما و رطوبت فصل مشترک جامد مرطوب و گاز عبوری از محتوی رطوبت جامد مرطوب بر مبنای خشک می باشد



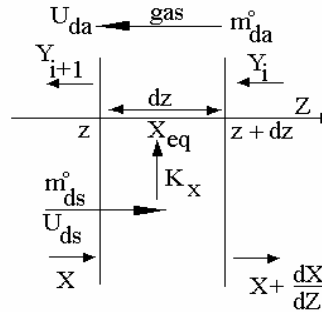
شکل ۱۳: پروفایل دمای هوای عبوری از خشک کن در شرایط ۱/۳ برابر حداقل هوای لازم برای منطقه غیر ممانعتی.

حل سیستم معادلات در بخش غیر ممانعتی

با کاهش درجه آزادی سیستم معادلات، از طریق جایگذاری مقادیر ضرایب انتقال جرم و حرارت تجربی و همینطور پروفایلهای دما و رطوبت فصل مشترک، سیستم متشکل از معادلات جبری و دیفرانسیل قابل حل می‌گردد. مقدار X_{cr} (رطوبت بحرانی) از طریق آزمایشهای سینتیک انجام شده در حدود 0.28 (kgw/kgds) تعیین می‌گردد. حل معادلات از قسمت اول که در مجاورت منطقه بحرانی است و در واقع مرز میان دو ناحیه ممانعتی و غیر ممانعتی است آغاز می‌گردد. عملیات تکرار در هر قسمت آنقدر انجام می‌گیرد تا T و X دیگر تغییر نکنند. در این حال قسمت موجود حل شده و با بررسی شرط تعادل به قسمت بعدی می‌رویم و برای آن نیز بطور مشابه با توجه به مقادیر یافت شده در قسمت قبلی به عنوان شرط اولیه، عملیات تکرار را تا همگرایی نهایی انجام می‌دهیم. حل سیستم معادلات برای شرایط مختلفی از سرعت جریان

شکل (۱۶) المان مربوطه را نشان می دهد. این المان همانند بخش غیر ممانعتی در یک قسمت از بخش ممانعتی در نظر گرفته می شود.

شکل ۱۶: المان مفروض در جامد مرطوب در بخش ممانعتی.



موازنه ماکروسکوپی یک جرم در هر قسمت به معادله خط کار خواهد انجامید.

$$Y = Y_i + \frac{m_{ds}^o}{m_{da}^o} \cdot (X - X_f)$$

که در آن

$$\frac{m_{ds}^o}{m_{da}^o} = \frac{(Y_{cr} - Y_i)}{(X_{cr} - X_f)} \quad (۶)$$

از طرف دیگر باید توجه داشت که در بخش ممانعتی دیگر معادله رطوبت سنجی برقرار نیست. زیرا لازمه چنین معادله ای آنست که دما در جامد مرطوب ثابت بماند؛ در حالی که در بخش ممانعتی همانطور که نتایج آزمایشهای دما - زمان در بخش دبی نزولی نشان می دهد؛ دمای توده مواد در حال افزایش است که این موضوع موجب بوجود آمدن معادله جدیدی میشود که مبین موازنه حرارت ماکروسکوپی یک می باشد و بصورت زیر می باشد:

$$m_{da}^o \cdot C_g \cdot [T_{g_{i+1}} - T_{g_i}] = 1.2 \{ m_{ds}^o \cdot C_p \cdot [T_{solid_{i+1}} - T_{solid_i}] + m^{o, ev} \cdot \Delta H_{T_{solid}}^{lv} \} \quad (۷)$$

ضریب ۱/۲ نیز بدلیل در نظر گرفتن افت حرارتی از بدنه و همینطور انرژی حرارتی مورد نیاز برای غلبه بر سایر نیروهای مخالف نظیر نیروی چسبندگی رطوبت به مواد مرطوب، نیروی کشش سطحی، نیروهای پیوستگی و غیره، مطابق با ایده صاحب نظران در معادله قرار گرفته است [۷] و [۴].

تعیین (K_x) ضریب انتقال جرم در ماده مرطوب

در بخش ممانعتی، دمای مواد تر دائما در حال افزایش است و فاز جامد کنترل کننده فرایند انتقال می باشد. ضریب کلی انتقال جرم در فاز جامد (K_x) از طریق اطلاعات منحنی خشک کردن تعیین می شود.

نیروی محرکه انتقال جرم در این شرایط اختلاف غلظت متوسط توده و غلظت سطحی جامد مرطوب می باشد. غلظت در سطحی ترین لایه جامد مرطوب تقریباً با رطوبت نهایی مواد در انتهای خشک کن برابر

عمده ترین پارامترهای مجهول معادله فوق X یا غلظت توده مواد در هر نقطه از خشک کن، Z یا طول هر قسمت از خشک کن (پاسخ Z به صورت Δl ظاهر می شود) و K_x می باشد. با معین شدن K_x معادله قابل حل می گردد. K_x را از طریق منحنی آزمایشگاهی سرعت خشک کردن و یا منحنی کریشر می توان تعیین نمود. البته باید فقط اطلاعات بخش دبی نزولی منحنی ها را در نظر گرفت [۳].

باید توجه داشت که شرط برقراری چنین معادله ای آنست که محتوی رطوبت جامد مرطوب (X) در هر قسمت ثابت بماند. این معادله از نوع I.V.P بوده و شرط اولیه حل هر قسمت با یافتن محتوی رطوبت در قسمت قبلی حاصل می شود. اولین قسمت برای حل نیز مربوط به قسمت بحرانی است

$$\frac{dX}{dZ} - \left[\frac{K_x \cdot w}{m_{da}^o} \right] \cdot (X - X_g) = 0 \quad (۵)$$

نقاله به طریق زیر تعیین می‌گردد:

$$L_{\text{belt}} = \sum_i (\Delta L)_h + \sum_j (\Delta L)_{uh}$$

$$U_{ds} = \frac{m_{ds}}{\rho_{ds} \cdot w \cdot \delta}$$

(۹)

δ ضخامت مواد تر روی سینی و برابر ۲ cm می‌باشد. ρ_{ds} نیز دانسیتهٔ مواد خشک نهایی و معادل 550 kg/m^3 می‌باشد. زمان کل خشک کردن نیز از تقسیم طول خشک کن بر سرعت نقاله بدست خواهد آمد. ابعاد کانال نقاله از طریق دبی عبوری گاز حاصل می‌شود و باید بنحوی باشد که حداقل سرعت m/sec را در کانال ایجاد نماید. نتایج نهایی به شکل منحنی‌ها و جداولی ارائه می‌شود که چند نمونه از آنها در ادامه ارائه شده است. شکل (۱۸) یکی از نمودارهایی است که طول نقاله را در هر مقدار از عرض در نظر گرفته شده برای آن در اختیار می‌گذارد. طول نقاله در این شرایط به دبی گاز عبوری و همینطور دبی محصول خشک نهایی بستگی دارد. با استفاده از چنین منحنی‌هایی و همینطور جداولی که حاوی اطلاعات مربوط به سرعت نقاله، شرایط هوای مصرفی و جامد مرطوب از لحاظ دما و رطوبت، زمان اقامت در خشک کن و سایر پارامترها می‌باشد؛ عملیات انتخاب خشک کن مناسب در شرایط مناسب و برای هدف خاص انجام می‌گیرد.

نتایج

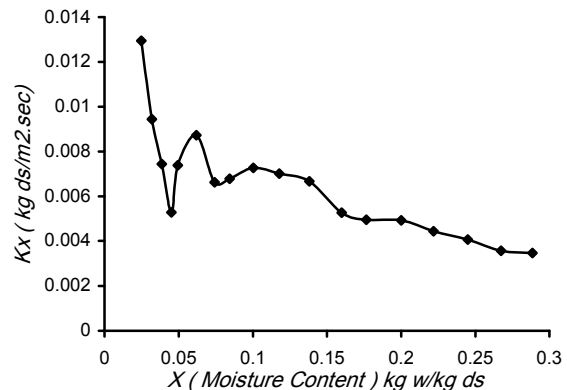
پیش از طراحی هر خشک کن انجام مطالعات سینتیکی و تعیین پارامترها و ضرایب انتقال الزامی می‌باشد. هدف نهایی از مطالعات و آزمایشهای فوق مدل سازی ریاضی یک خشک کن نوار نقاله ای با جریان موازی برای مادهٔ انفجاری پیکریت بود. با استفاده از منحنی های سینتیک خشک کردن بدست آمده می‌توان زمان خشک شدن و سرعت خشک کردن را بر آورد نمود. در نهایت منحنی های سینتیکی بدست آمده هموار سازی می‌شود و سپس با برازش منحنی های مناسب روابط آنالیتیک برای

است. بنابراین در این شرایط موازنهٔ ماکروسکوپیک جرم برای سینی آزمایشگاهی به معادلهٔ زیر منتهی می‌شود:

$$K_x = \frac{m_{ds}}{A} \cdot \frac{-\left(\frac{dX}{d\theta}\right)_x}{(X - X_{eq})}$$

(۸)

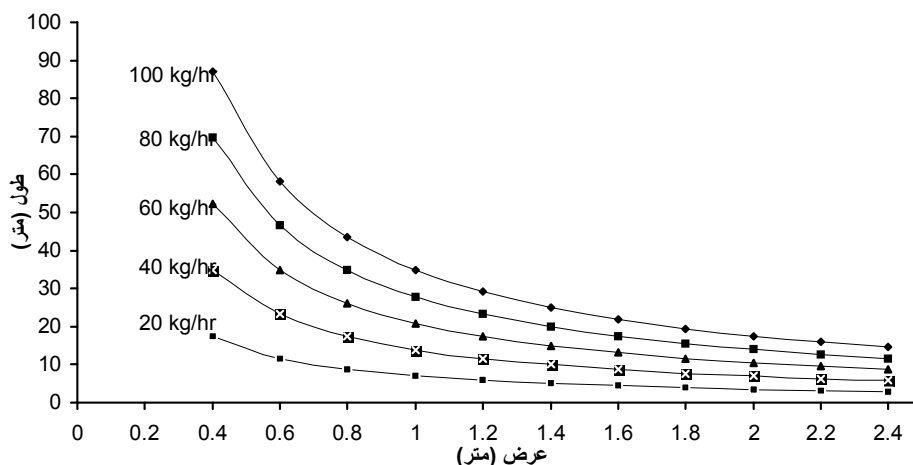
مقادیر $dX/d\theta$ به روش عددی محاسبه می‌شود. نیروی محرکهٔ انتقال نیز $(X - X_g)$ می‌باشد که در آن X_s با X_{Final} برابر است. m_{ds} نیز جرم مواد خشک در سینی می‌باشد. از طریق اطلاعات فوق پروفایل K_x بدست می‌آید که در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۷: پروفایل ضریب انتقال جرم جامد مرطوب در بخش ممانعتی حاصل از آزمایشهای سینتیکی.

نتایج نهایی و تلفیق پاسخهای بخش ممانعتی و غیر ممانعتی

برای اینکه بتوانیم منحنی‌ها و جداول متنوعی برای انتخاب خشک کن نوار نقاله ای ارائه نماییم؛ پارامترهایی نظیر سرعت جریان جرمی مواد خشک نهایی (در محدودهٔ 20 kg/hr تا 100 kg/hr) و عرض خشک کن (در محدودهٔ 4 m تا $2/4 \text{ m}$) در نظر گرفته می‌شود. همانطور که گفته شد m_{da}^0 با یک حدس اولیه شروع می‌شود؛ و آنقدر اصلاح می‌شود تا حداقل دبی هوای عبوری معین شود. سپس از 10% ، 20% ، 30% و 40% هوای اضافی جهت حل سیستم معادلات استفاده می‌شود. پس از آنکه طول هر قسمت در بخش ممانعتی و غیر ممانعتی بدست آمد، طول نهایی خشک کن و سرعت



شکل ۱۸: نمودار طول خشک کن بر حسب عرض در هر مقدار از سرعت محصول خشک نهایی در شرایط عبور ۳۰٪ هوای اضافی.

جدول ۲: اطلاعات فنی خشک کن برای شرایط عبور ۳۰٪ هوای مصرفی اضافی.

Dry Solid Mass Flowrate = 60 kg/hr
Initial Moisture Content = 0.82 kg.w/kg.ds
Final Moisture Content = 0.002 kg.w/kg.ds

Minimum Air Mass Flowrate = 3888 kg/hr
Used Air Mass Flowrate = 5054 kg/hr
Used Air Mass Flowrate/Minimum Air Mass Flowrate = 1.3
Inlet Air Temperature = 100 C
Inlet Air Humidity = 0.003 kg.w/kg.da
Outlet Air Temperature = 73.4 C
Outlet Air Humidity = 0.012734 kg.w/kg.da

Total Drying Time = 15067 Sec

Belt Length (m)	Belt Width (m)	Belt Velocity (mm/sec)	Channel Height (cm)
0.4	52.3	3.5	211.9
0.6	34.9	2.3	142.6
0.8	26.2	1.7	107.9
1	20.9	1.4	87.2
1.2	17.4	1.2	73.3
1.4	14.9	1	63.4
1.6	13.1	0.9	56.0
1.8	11.6	0.8	50.2
2	10.5	0.7	45.6
2.2	9.5	0.6	41.8
2.4	8.7	0.6	38.6

فهرست علائم

- A: سطح مقطع (m^2)
- Ac: ضریب تصحیح Ackermann
- β : نسبت قطر روزنه به قطر لوله در اریفیس
- C: غلظت رطوبت در جامد مرطوب ($kg\ mol/m^3$)
- C_s : ظرفیت حرارتی جامد مرطوب (J/kgC)
- D: ضریب نفوذ ملوکولی جرمی (m^2/sec)
- δ : ضخامت مواد روی نقاله یا سینی آزمایشگاهی (m)
- ΔH_{lv} : انرژی نهان تبخیر آب (J/kg)
- E: متغیر در ضریب تصحیح Ac
- F: شار انتقال جرم ($kg\ w/m^2sec$)
- Flow: سرعت جرمی گاز خشک کننده (kg/s)

محتوی رطوبت بر حسب زمان و سرعت خشک کردن بر حسب محتوی رطوبت بدست ارائه می شود. با استفاده از این نتایج خشک کن به دو بخش شرایط ممانعتی و غیر ممانعتی تقسیم بندی شده و معادلات جبری و دیفرانسیل هر بخش حل می گردد.

تشکر و قدر دانی

در اینجا از زحمات و تلاشهای مسئولین و کارشناسان محترم بخش تحقیقات و توسعه و فناوری صنایع شیمیایی پارچین که امکانات و شرایط مناسب را برای انجام آزمایشها فراهم نمودند و خصوصاً از آقای مهندس ابراهیم نظری به خاطر همکاریهای صمیمانه ایشان تشکر و قدردانی می گردد.

c : شرایط انتقال جرم و حرارت همزمان به روش جابجایی در فاز گاز	h_c : ضریب انتقال حرارت همزمان با انتقال جرم در فاز گاز ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
da : هوای کاملاً خشک	h_g : ضریب انتقال حرارت منفرد ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
ds : جامد کاملاً خشک	h_m : ضریب انتقال حرارت منتهجه ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
e : حالت مؤثر	K_y : ضریب انتقال جرم در فاز گاز ($kg w/m^2 sec$)
emp : شرایط تجربی	K : ضریب رسانش حرارتی در جامد ($W/m^\circ C$)
eq : شرایط تعادلی در سطح	m° : دبی عبور جامد مرطوب یا گاز (kg/sec)
g : مربوط به فاز گاز	M_w : جرم ملوکولی آب ($kg/kgmol$)
i : شرایط ابتدایی	M_{ds} : جرم ملوکولی جامد خشک ($kg/kgmol$)
m : حالت منتهجه برای ضریب انتقال حرارت گاز و سینی فلزی	μ : مقدار ویژه در حل معادله دیفرانسیل جزئی
s : فصل مشترک	n : شمارنده اعداد طبیعی
t : شرایط کلی	P : فشار (بخار رطوبت در هوا) (P_a)
۱ و ۲ و ۳ : سطوح مختلف و دیواره های سینی ها	Q : سرعت انتقال حرارت جابجایی به سطح (Watt)
اعداد بدون بعد	R : سرعت انتقال رطوبت از سطح ($kg w/sec$)
Fo : عدد فوریه ($D \cdot \theta / \delta^2$)	ρ : دانسیته (kg/m^3)
Le : عدد لوئیس ($Pr/S\phi$)	T : دما ($^\circ C$)
Nu : عدد ناسلت ($h_c \cdot D_e / K$)	θ : زمان (sec)
Pr : عدد پرندتل (v/D)	V : سرعت گاز خشک کننده روی سینی (m/sec)
Re : عدد رینولدز ($G \cdot D_e / \mu$)	W : عرض نوار نقاله (m)
Sc : عدد اشمیت (v/α)	Y : رطوبت مطلق گاز خشک کننده ($kgw/kgda$)
Sh : عدد شروود ($K_y D_e / \rho D$)	y : فاصله در محور مختصات (m)
	Z : متغیر بیانگر طول نوار نقاله (m)

زیر نویسها

av : حالت متوسط

مراجع

- 1 - Keey, R. B. (1972). *Introduction to Industrial Drying Operation*. Pergamon Press. N.Z.
- 2 - Kemp, I. C. and Bahu, R. E. (1994). "A new algorithm for dryer selection." *Drying'94*, PP. 439-446.
- 3 - Kemp, I. C. and Fyhr, B. C. (2001) "Methods for processing experimental drying kinetics data." *Drying Technology*, Vol. 19 No. 1, PP. 15-34.
- 4 - Zhang, Q. J. and Keey, R. B. (1994). "An experimental test of the concept of the characteristic drying curve using the thin-layer method." *Drying'94*, PP. 123-130.
- 5 - Williams-Gardner, A. (1976). *Industrial Drying*. George Goldwin Ltd.
- 6 - Kemp, I. C. (1999). "Progress in dryer selection techniques." *Drying Technology*, Vol. 17, No. 7&8, PP. 1667-1680.
- 7 - Keey, R. B. (1972). *Drying; Principles and Practices*. Pergamon Press. N.Z.
- 8 - Mujumdar, A. S. (1987). *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, Inc.

مدرس؛ مرکز نشر آثار علمی، (۱۳۷۷).

- 10 - McKetta, J. J. and Cuningham W. A. (1983). *Encyclopedia of chemical processing and design*.
- 11 - Miller, R. W. (1966). *Flow Measurement Engineering Handbook*. third edition McGraw-Hill .
- 12 - Ionscu, E. and Jinescu, G. (1994). "Aspects regarding the drying of glycerol monostearate." *Drying '94*, PP. 691-697.
- 12 - Krasnikov, V. V. (1980). "The methods of analysis and calculation of drying kinetics." *Drying '80*, PP. 57-62 .
- 13 - Alzamora, E. M. and Chirife, J. (1980). "Heat and mass transfer during air drying of avocado." *Drying '80*, PP. 247-254.
- 14 - Loyben, K. Ch. A. M. and Olieman, J. J. and Bruin, S. (1980). "Concentration dependence of diffusion coefficients derived from experimental drying curves." *Drying '80*, PP. 233-243.
- 15 - Raghavan, G. S. V. and Tulasidas, T. N. and Sabalani, S. S. and Ramaswamy, H. S. (1994). "Concentration dependence of moisture diffusivity in drying of shrinkable commodities." *Drying '94*, PP. 277-290.
- 16 - Szentgyorgyi, S. and Molnar, K. and Orvos, M. (1994). "Modelling and calculation of the drying process of capillary porous materials." *Drying '94*, PP. 29-35.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|----------------------------------|--|--------------------------|
| 1. Weight – Loss | 2. Thin Layer | 3. Interrelated Curves |
| 4. Krischer Curve | 5. Thin Layer Kinetic Test | 6. Smooth |
| 7. Noise | 8. Infra Red Gas Analyser | 9. Hygroscopic |
| 10. Convective Drying | 11. Desiccator | 12. Bore |
| 13. Minimum Ignition Temperature | | 14. Finite Difference |
| 15. Central | 16. Spline | 17. Jagged |
| 18. Induction | 19. Hindered | 20. Wetted Wall Tube |
| 21. Molecular Diffusivity | 22. Differential Algebraic Equations (DAE) | |
| 23. Convective | 24. Unhindered | 25. Hygroscopic Equation |
| 25. Sectional Operation | 27. Molecular Diffusion | 28. Convective Term |
| 29. Operating Line | | |