

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

خشك كردن، اصول، کاربرد و طراحی

(چاپ دوم)

نگارندگان

پروفسور سزلا استرامیلو

پروفسور تادیوز کودرا

مترجم

دکتر حسن پهلوانزاده

1396



استرومیلو، چسلاو، 1930 - Strumillo, Czeslaw

خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی / مؤلفان: سزلا استرامیلو، تادیوز کودرا؛ مترجم:

حسن پهلوانزاده. - تهران: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، 1396.

458ص: مصور، جدول، نمودار. - (دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی؛ 42)

ISBN: 978-964-6213-07-4

شابک: 4 - 07 - 6213 - 964 - 978

فهرست‌نویسی براساس اطلاعات فیپا (فهرست‌نویسی پیش از انتشار).

عنوان اصلی: Drying, principals, applications, and design.

واژه‌نامه.

کتابنامه:

1. خشک کردن، الف. کودرا، تادیوز، 1945 - Kudra, Tadeusz. پهلوانزاده، حسن، 1334 -

مترجم. ج. دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی. د. عنوان.

660/28426

کتاب 5/الف/ TP 363

1396

کتابخانه ملی ایران: 77-12501م

خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی

نگارندگان: پروفیسور سزلا استرامیلو، پروفیسور تادیوز کودرا

مترجم: دکتر حسن پهلوانزاده

طراح جلد: مصطفی جانجانی

شماره انتشار: 42

شماره پیاپی: 257

تاریخ انتشار: 1396

نوبت چاپ: دوم

ISBN: 978-964-6213-07-4

شابک: 4 - 07 - 6213 - 964 - 978

ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس

ناظر چاپ: مصطفی جانجانی

لیتوگرافی: ایران گرافیک

چاپ و صحافی: قشقایی

مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس،

صندوق پستی: 318-14115 تلفن: 82883096 دورنگار: 82883032

بها: 300000 ریال

صحت مطالب کتاب بر عهده نگارندگان و صحت ترجمه بر عهده مترجم است.

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیشگفتار مؤلف
ل	پیشگفتار مترجم
۱	فصل ۱ ویژگیهای مواد و گازها.....
۱	۱-۱ هوای مرطوب.....
۱	۱-۱-۱ پارامتر اصلی هوای مرطوب.....
۹	۱-۱-۲ نمودارهای رطوبت.....
۱۰	۱-۲-۱-۱ تغییرات رطوبت هوا در فشار ثابت روی نمودار $I - Y$
۱۴	۱-۲-۱-۲ نمودارهای مولیر برای سیستم‌های دیگر.....
۱۶	۱-۲ مواد تر.....
۱۶	۱-۲-۱ پارامترهای مواد تر.....
۱۸	۱-۲-۱-۱ تعادل در خشک کردن.....
۱۹	۱-۲-۳ طبقه‌بندی مواد.....
۲۲	۱-۲-۴ انواع رطوبت در مواد.....
۲۴	۱-۲-۵ پیوند رطوبت و مواد.....
۲۵	۱-۲-۶ خواص ساختاری مکانیکی مواد تر.....
۲۷	۱-۳ مثالهای محاسباتی.....
۳۷	۱-۴ فهرست نمادهای فصل اول.....
۳۹	۱-۵ مراجع فصل اول.....
۴۱	فصل ۲ انتقال حرارت و جرم در فرایند خشک کردن.....
۴۱	۲-۱ مقدمه.....
۴۲	۲-۲ انتقال جرم و حرارت بین مواد و عامل خشک کردن (شرایط خارجی).....
۴۳	۱- تبخیر از سطح آزاد.....
	۲- انتقال جرم و حرارت در طی جریان یافتن عامل خشک‌کننده از میان یک لایه ماده.....
۴۴	۳- انتقال حرارت و جرم بین گاز و یک ذره تنها.....

۴۹	انتقال جرم و حرارت در ماده خشک شونده (شرایط داخلی)
۴۹	۱-۳-۲ هدایت حرارتی در مواد
۵۲	۲-۳-۲ انتقال حرارت جابه‌جایی در مواد
۵۳	۲-۴ مکانیزم فرایند خشک شدن
۵۳	۲-۴-۱ انواع انتقال رطوبت
۵۵	۲-۴-۲ شرایط داخلی و خارجی خشک کردن
۵۷	۲-۴-۳ ماهیت فرایند خشک کردن
۵۸	۲-۴-۴ تشریح روند خشک شدن
۶۱	۲-۵ خشک شدن از دیدگاه ترمودینامیک
۶۵	۲-۶ فهرست نمادهای فصل دوم
۶۶	۲-۷ مراجع فصل دوم

۶۷	فصل ۳ سینتیک خشک شدن
۶۷	۳-۱ مشخصه‌های کلی خشک شدن
۷۴	۳-۲ زمان خشک شدن
۸۳	۳-۳ منحنی‌های عمومی خشک شدن
۸۸	۳-۴ مثالهای محاسباتی
۹۵	۳-۵ فهرست نمادهای فصل سوم
۹۶	۳-۶ مراجع فصل سوم

۹۷	فصل ۴ روشهای تجربی خشک کردن
۹۷	۴-۱ تعیین رطوبت در مواد تر جامد
۱۰۰	۴-۲ تعیین رطوبت عامل خشک کننده
۱۰۳	۴-۳ تعیین منحنیهای سینتیک خشک کردن
۱۰۶	۴-۴ تعیین منحنی‌های جذب در دمای ثابت
۱۰۸	۴-۵ تعیین پتانسیل شیمیایی
۱۰۹	۴-۶ فهرست نمادهای فصل چهارم
۱۰۹	۴-۷ مراجع فصل چهارم

۱۱۱	فصل ۵ اصول عمومی طراحی
۱۱۱	۵-۱ مقدمه
۱۱۳	۵-۲ معادلات اساسی
۱۱۴	۵-۳ دیاگرامها اساسی خشک‌کنها
۱۱۷	۵-۴ محاسبات طراحی خشک‌کن: تعادل کلی
۱۱۷	۵-۴-۱ تعادل جرم و انرژی برای یک خشک‌کن
۱۲۴	۵-۴-۲ فرایند خشک کردن روی نمودار $I - Y$

۱۲۷	محاسبه خشک‌کنها بر اساس تعادل جزئی جرم و حرارت	۵-۵
۱۲۷	تبادل جزئی جرم و حرارت	۵-۵-۱
۱۳۱	روشهای یکپارچه‌سازی معادلات تعادل جرم و حرارت	۵-۵-۲
۱۳۲	روشهای تصویری برای یکپارچه‌سازی معادلات تعادل جرم و انرژی	۵-۵-۳
۱۳۳	جریان همسو	۵-۵-۳-۱
۱۳۶	جریان غیر همسو	۵-۵-۳-۲
۱۳۸	جریان مقاطع	۵-۵-۳-۳
۱۴۳	نیروی محرکه متوسط و سطح انتقال جرم و حرارت در فرایند خشک شدن	۵-۶
۱۴۹	محاسبه ابعاد خشک‌کن	۵-۷
۱۵۳	محاسبه خشک‌کنهای مداوم براساس زمان اقامت مواد در خشک‌کن	۵-۸
۱۵۶	محاسبات خشک‌کن غیرمداوم	۵-۹
۱۵۸	مثالهای محاسباتی	۵-۱۰
۱۸۷	فهرست فصل پنجم	۵-۱۱
۱۸۹	مراجع فصل پنجم	۵-۱۲

فصل ۶ مدل‌سازی ریاضی فرایندهای خشک کردن

۱۹۱	اصول مدل‌سازی	۶-۱
۱۹۲	مدلسازی آزمایشگاهی	۶-۲
۱۹۳	مدلسازی تحلیلی	۶-۳
۱۹۴	روشهای استفاده شده در مدل‌سازی ریاضی فرایندهای خشک کردن	۶-۴
۱۹۴	روش معادله تعادل	۶-۴-۱
۱۹۷	روش معادلات دبی خشک شدن	۶-۴-۲
۱۹۷	روش معادلات تجربی	۶-۴-۳
۱۹۸	روش بررسی مسیر	۶-۴-۴
۱۹۸	مثالهای مدل‌سازی ریاضی فرایندهای خشک کردن	۶-۵
۲۰۰	مدلسازی یک خشک‌کن بادی با معادلات تجربی	۶-۵-۱
۲۰۷	مدلسازی خشک‌کن پاششی با معادلات تجربی	۶-۵-۲
۲۱۳	مدلسازی خشک‌کن بستر سیالی ارتعاشی به روش معادلات تعادل	۶-۵-۳
۲۱۹	روندها در مدل‌سازی ریاضی	۶-۶
۲۱۹	فهرست نمادهای فصل هشتم	۶-۷
۲۲۲	مراجع فصل هشتم	۶-۸

فصل ۷ روشهای خشک کردن و دسته‌بندی خشک‌کنها

۲۲۵	روشهای خشک کردن	۷-۱
۲۳۳	انواع خشک‌کنها	۷-۲
۲۴۶	مراجع فصل هفتم	۷-۳

فصل ۸

۲۴۹	خشک‌کنهای پراکندگی یا انتشاری
۲۴۹	۸-۱ مقدمه
۲۵۲	۸-۲ خشک‌کنهای با بستر سیالی
۲۵۲	۸-۲-۱ اصول پایه عملیاتی و کاربرد آنها
۲۵۵	۸-۲-۲ آیرودینامیک بسترهای سیالی
۲۶۵	۸-۲-۳ انتقال حرارت و جرم در بستر سیالی
۲۶۹	۸-۲-۴ ساختمان خشک‌کنهای با بستر سیالی
۲۷۹	۸-۲-۵ محاسبات خشک‌کنهای با بستر سیالی
۲۸۳	۸-۲-۶ مثالهای محاسباتی
۲۸۷	۸-۳ خشک‌کنهای با بستر ارتعاشی، با بستر سیالی ارتعاشی و با بسترهای سیالی جهشی
۲۸۷	۸-۳-۱ اصول پایه عملیاتی و کاربرد
۲۸۹	۸-۳-۲ دینامیک و آیرودینامیک بسترهای ارتعاشی
۲۹۴	۸-۳-۳ انتقال جرم و حرارت در بستر ارتعاشی
۲۹۷	۸-۳-۴ محاسبات خشک‌کنهای با بستر ارتعاشی
۲۹۸	۸-۳-۵ ساختمان خشک‌کنهای با بستر ارتعاشی
۳۰۱	۸-۴ خشک‌کنهای با بستر فواره‌ای
۳۰۱	۸-۴-۱ مقدمه
۳۰۳	۸-۴-۲ آیرودینامیک بستر فواره‌ای
۳۰۹	۸-۴-۳ انتقال حرارت و جرم در بستر فواره‌ای
۳۱۰	۸-۴-۴ خشک‌کردن خمیرها، محلولها و امولسیونها در بستر فواره‌ای
۳۱۲	۸-۴-۵ خشک‌کنهای بستر فواره‌ای و اصلاحات روی آنها
۳۱۳	۸-۴-۶ مثال محاسباتی
۳۲۶	۸-۵ خشک‌کنهای جریان‌ی
۳۲۶	۸-۵-۱ مقدمه
۳۲۶	۸-۵-۲ اصول عملیاتی پایه و کاربردها
۳۲۷	- مزایا
۳۲۸	- معایب
۳۲۹	۸-۵-۳ انتقال حرارت و جرم در خشک‌کنهای بادی
۳۳۳	۸-۵-۴ محاسبات خشک‌کنهای بادی
۳۳۷	۸-۵-۵ مثال محاسباتی
۳۴۱	۸-۵-۶ ساختمان خشک‌کنهای جریان‌ی
۳۴۹	۸-۶ خشک‌کنهای پاششی
۳۴۹	۸-۶-۱ اصول اساسی عملیات و کاربرد
۳۵۳	۸-۶-۲ محاسبات خشک‌کنهای پاششی
۳۵۶	۸-۶-۳ ساختمان خشک‌کنهای پاششی
۳۵۷	۸-۷ فهرست نمادهای فصل هشتم

۳۵۹	۸-۸ مراجع فصل هشتم
۳۶۷	فصل ۹ خشک کردن در میدانهای انرژی
۳۶۷	۹-۱ خشک کنهای مادون قرمز
۳۷۳	۹-۲ خشک کردن از طریق دی الکتریک
۳۹۹	۹-۳ خشک کردن در میدانهای صدایی
۴۰۱	۹-۴ فهرست نمادهای فصل نهم
۴۰۳	۹-۵ مراجع فصل نهم
۴۰۷	فصل ۱۰ مسائل متفرقه خشک کردن
۴۰۷	۱۰-۱ انتخاب خشک کن
۴۱۶	۱۰-۲ جنبه های انرژی
۴۲۷	۱۰-۳ فهرست نمادهای فصل دهم
۴۲۸	۱۰-۴ مراجع فصل دهم
۴۳۱	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۴۳۹	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۴۴۵	ضمیمه
۴۵۱	نمایه

پیشگفتار مؤلفان

خشک کردن موضوعی بسیار وسیع و با نظم داخلی است و جزو فرایندهایی به شمار می‌رود که انرژی زیادی مصرف می‌کنند. بنابراین اجرای این فرایند در مقیاس صنعتی با طراحی خوب و با استفاده از وسایل جدید خشک کردن با راندمان حرارتی بالا، اهمیت ویژه‌ای دارد. تجزیه و تحلیل نظری و همچنین طراحی سیستم خشک‌کننده را چندین عامل پیچیده می‌کند. انتقال همزمان جرم از سطح و حرارت به سطح و به داخل ماده، هیدرودینامیک حرکت ذرات در خشک‌کن، مکانیسمهای مختلف انتقال رطوبت در بدنه جسم جامد، تغییر شکل دادن، مشخصه‌های سیستم خوراک و سیستم گاز تمیزکن تعدادی از مشکلاتی است که با آنها روبه‌رو هستیم.

در ده سال گذشته پیشرفتهای قابل توجهی در فهم صورتهای اساسی فرایند خشک کردن و اجرای آن صورت گرفته که این موجب توسعه و پیشرفت روشهای طراحی شده است. از سال ۱۹۷۸ همایشهای بین‌المللی دو سالانه خشک کردن با شرکت تعداد زیادی نماینده سازماندهی شده است. برپایی این همایشها علاقه جهانی به بهبود فرایند خشک کردن را منعکس می‌کند. همچنین تعدادی مجلدات ادواری از جمله: «توسعه در خشک کردن^۱»، «پیشرفت در خشک کردن^۲» و «ژورنال تکنولوژی خشک کردن^۳» منتشر شده است. با وجود آنکه این اطلاعات در سراسر منابع و کتابهای اصلی در دسترس است، این مقوله هنوز به طور ناقصی پوشش داده می‌شود.

جستجوی کامپیوتری نشان داده است که فقط حدود ۲۵ درصد از مقالات مرتبط با موضوع خشک کردن به زبان انگلیسی می‌باشد.

هدف از نوشتن این کتاب ارائه اصول اصلی نظریه خشک کردن و همچنین مختصری از اصول کاربردی آن همراه با اطلاعاتی از خشک‌کنهای موجود بوده است. به دلیل گستردگی موضوع، تعداد محدودی از صورتهای بسیار مهم خشک کردن تشریح شده است. همچنین به طور وسیعی به انتشارات و تجارب گروه‌های محقق پرداخته شده است؛ بنابراین توجه خاصی به انواع مختلف خشک‌کنهای پراکنده‌ساز (فصل ۸) و خشک‌کنهای دی‌الکتریک (فصل ۹) معطوف شده است، به نظر نگارنده، نیاز به وسایل خشک‌کننده جدیدی که از نظر اقتصادی کارآمد باشند به شدت احساس می‌شود.

در نوشتن این کتاب از مقالات و منابع روسی و کشورهای اروپای شرقی به طور گسترده‌ای استفاده شده

است. چنانکه در بالا گفتیم، محققان دیگر کشورها، معمولاً از وجود این منبع وسیع مطالب بی اطلاع هستند. در این کتاب، نظریه و اصول طراحی و همچنین روشهای مدلسازی ریاضی انواع مختلف خشک‌کنها با استفاده از مثالهای مناسب تشریح شده است.

این کتاب برای استفاده دانشجویان و مهندسين طراح در این زمینه و همچنین افرادی که در صنایع یا مراکز تحقیقاتی فعالیت دارند تهیه شده است. این کتاب همچنین شامل مطالب مناسبی برای تدریس در درس کارشناسی ارشد مهندسی شیمی یا برای طراحی خشک‌کنها می باشد.

از انگیزش و تشویقی که از طرف افراد زیادی به ما ابراز شده است قدردانی می کنیم. بویژه باید از آقای پرفسور اف. ا. هلند^۱ از دانشگاه سالفورد^۲ و دکتر س. لویز کاسیسدو^۳ از مرکز تحقیقات انجمن الکتریسته^۴، کپنهارست^۵ انگلیس نام ببریم. همچنین تشکر مخصوص خودم را از همکاران دانشگاهیم در گروه تحقیق خشک کردن در انیستیتو مهندسی شیمی، دانشگاه فنی لودز^۶، لهستان به پاس کمک در بررسی منابع، محاسبات و تهیه نسخه نهایی این کتاب اعلان می نمایم.

از آقای دکتر «هاگیس»^۷ از دانشگاه سالفورد که این نوشتار را مطالعه و پیشنهادات با ارزشی ارائه کرده اند مخصوصاً قدردانی می کنیم.

همچنین علاقه داریم از خانم ج. جانسزیک^۸ برای تایپ آخرین نسخه تشکر کنیم.

سزلا استرامیلو و تادیوز کودرا

1. Holland

2. Salford

3. Lopez - Cacicedo

4. Electricity Council Research Centre

5. Capenhurst

6. Lodz Technical University

7. Hughes

8. J. Janczyk

پیشگفتار مترجم

فرایند خشک کردن در صنایع یکی از مهمترین فرایندهای مهندسی شیمی است که کراراً با آن سر و کار داریم. در بیشتر فرایندهای تولیدی در صنایع، حداقل یک مرحله خشک کردن وجود دارد که منظور از آن، گرفتن آب از ماده تر می باشد. خشک کردن در صنایع شیمیایی، کشاورزی، داروسازی، سرامیک، صنایع کاغذسازی و غیره کاربرد فراوانی دارد. در ایران منابع و مراجع مرتبط با این موضوع ناکافی به نظر می رسد و لذا به دلیل نیاز دانشجویان رشته مهندسی شیمی به این مطلب مهم، بر آن شدم که این کتاب را که صرفاً در زمینه خشک کردن است ترجمه کنم. امید است که دانشجویان، طراحان صنایع و اعضای مراکز تحقیقاتی و پژوهشی بتوانند از آن استفاده کنند.

این کتاب به عنوان کتاب جامع درسی در مقطع کارشناسی ارشد در زمینه نظریه خشک کردن و طراحی خشک کنها و کاربرد آنها در صنایع مطرح است. برای فهم بهتر موضوعات بحث شده در این کتاب، در انتهای هر بخش مسائل حل شده ای نیز ارائه داده شده است. در فصل اول درباره خواص گاز مرطوب و مواد تر بحث می شود. در فصل دوم فرایندهای انتقال جرم و حرارت تشریح می شود. موضوع سینیتیک خشک شدن در فصل سوم و روشهای آزمایشگاهی خشک شدن در فصل چهارم بررسی شده است. اصول طراحی خشک کنها و مدلسازی ریاضی فرایند خشک کردن را به ترتیب در فصول پنجم و ششم مطالعه می کنیم.

در فصول هفتم و هشتم و نهم دسته بندی خشک کنها و کاربرد آنها در صنایع بررسی می شود. در فصل دهم مسأله بازیافت انرژی در خشک کنها و مسائل متفرقه ای که در خشک کردن با آن مواجه می شویم بررسی شده است. این کتاب برای اولین بار ترجمه و منتشر می شود و با تمام تلاشی که صورت گرفته، امکان دارد اشکالاتی از نظر ناهماهنگی نمادها یا در چاپ حروف در آن دیده شود لذا از کلیه استفاده کنندگان این کتاب تقاضا می شود تا هر اشکالی را که مشاهده می کنند به مترجم اطلاع دهند تا در چاپهای بعدی اصلاح شود.

در خاتمه لازم می دانم از دست اندرکاران مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس که در چاپ این کتاب همکاری بسیار خوبی را مبذول داشته اند کمال تشکر و قدردانی خود را اعلان نمایم. از جناب آقای مهندس رضایات که ویراستاری این کتاب را عهده دار بوده اند قدردانی و از خانم مهندس نسرين عطاران رضایی که در مراحل آماده سازی این کتاب کمک فراوان کرده اند تشکر می شود.

حسن پهلوانزاده

