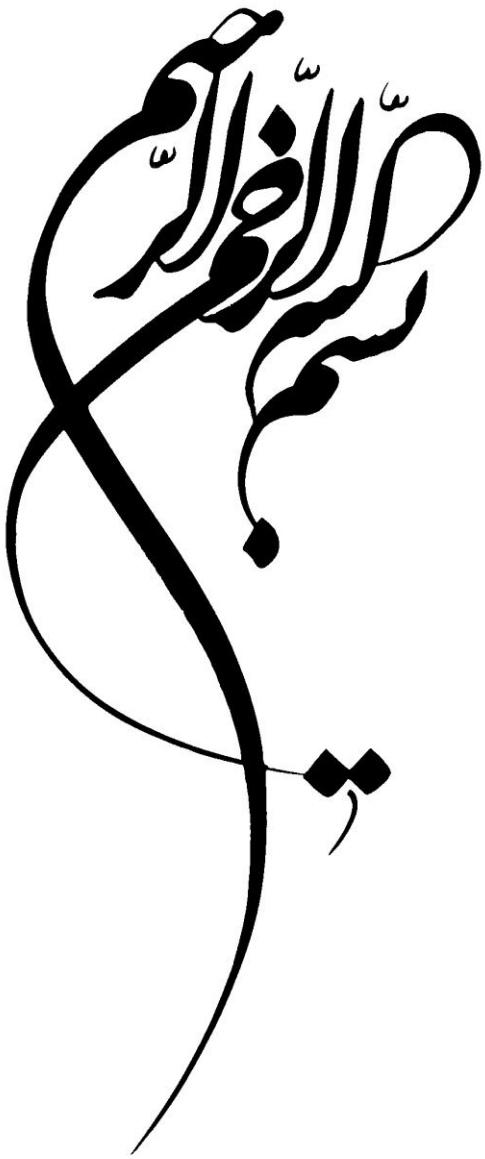

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد شاهرود

دانشکده علوم پایه، گروه مهندسی شیمی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد « M.Sc. »

گرایش : صنایع غذایی

عنوان :

مدل سازی ریاضی خشک شدن همرفتی یک ماده منفرد توسط یک مدل لامپ توسعه یافته

(Improved Lumped Model)

استاد راهنما :

دکتر بهروز عباسی سورکی

استاد مشاور :

دکتر جواد صیاد امین

نگارش :

محترم مقدسی

زمستان ۱۳۹۲

ISLAMIC AZAD UNIVERSITY

Shahrood Branch

Faculty of science, Department of Chemical Engineering

((M.Sc.)) Thesis

On Chemical Engineering

Subject:

Mathematical Modeling of Convective Drying of a Single Material Using an Improved Lumped Model

The Advisor :

Behrooz Abbasi Souraki Ph.D.

Consulting Advisor :

Javad Sayyad Amin Ph.D.

By:

Mohtaram Moghadasi

Winter 2013

سپاسگزاری

پس از حمد و سپاس خدای رحمان و رحیم، بر خود لازم می¬دانم از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر بهروز عباسی سورکی که در طول دوره ای که مشغول انجام این پروژه بودم از محضر ایشان درس علم و اخلاق فرا گرفتم، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری نمایم. بدون شک تمامی دستاورد¬هایی که در مدت انجام پایان نامه داشته¬ام را مدیون زحمات بی¬دریغ ایشان هستم. همچنین از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر جواد صیاد امین که زحمت مشاوره این پایان نامه را بر عهده گرفتند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به

پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

و

برادر و خواهرم همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگیم.

فهرست مطالب

عنوان
صفحه

چکیده فارسی..... ۱

فصل اول:مقدمه

مقدمه..... ۳

۱-۱-مفاهیم مقدماتی در خشک کردن یک جسم جامد..... ۱۰

۱-۱-۱-شرایط محیطی(فرایند۱)..... ۱۱

۱-۱-۱-۱-رطوبت مطلق..... ۱۱

۱-۱-۱-۲-رطوبت نسبی..... ۱۲

۱-۱-۱-۳-درجه حرارت خشک..... ۱۲

۱-۱-۱-۴-درجه حرارت تر..... ۱۲

۱-۱-۲-شرایط داخلی(فرایند ۲)..... ۱۳

۱-۱-۳-محتوی رطوبت جامد..... ۱۳

۱-۱-۴-رطوبت تعادلی..... ۱۴

۱-۱-۵-رطوبت پیوندی و رطوبت غیر پیوندی..... ۱۴

۱-۱-۶-رطوبت آزاد..... ۱۵

۱-۲-انواع جامدات مرطوب..... ۱۵

۱-۳-همدماهای رطوبت..... ۱۶

۱-۴-پسماند جذب-دفع..... ۱۷

۱-۵-تغییرات رطوبت تعادلی با دما..... ۱۸

۱-۶-تعیین همدماهای جذب..... ۱۹

۱-۷-معادلات رطوبت تعادلی..... ۲۰

فصل دوم:پیشینه تحقیق

۲-۱-مدل لامپ..... ۲۵

۲-۲-اثر شکل..... ۲۹

۲-۳-اثر دمای خشک کردن..... ۲۹

۲-۴-اثر سایر شرایط خشک کردن..... ۲۹

فصل سوم: مدل سازی ریاضی

۳-۱-مقدمه..... ۳۲

۳-۲-مدل سازی خشک شدن با نرخ نزولی..... ۳۶

۳-۲-۱-مدل سازی انتقال جرم در داخل ذره..... ۳۶

۳-۲-۲-انتقال جرم در ذره با شرط مرزی جابجایی..... ۳۶

۳-۲-۳-معادله انتقال جرم با شرط غلظت تعادلی در مرز..... ۳۸

۳-۳-مدل سازی انتقال جرم در ذره منفرد با شرط مرزی تعادلی..... ۳۸

۳-۳-۱-صفحه تخت نامحدود..... ۳۹

۳-۳-۲-کره..... ۴۱

۳-۳-۳-استوانه نامحدود..... ۴۳

۳-۳-۴-استوانه با ابعاد محدود(استوانه محدود)..... ۴۵

۳-۴-معادله ساده شده برای درجه حرارت یک جسم صلب..... ۴۸

۳-۵-ضریب انتشار آب در اجسام صلب(جامد)..... ۵۰

۳-۶-مدل های ساده شده برای درجه حرارت ماده منفرد..... ۵۲

۳-۷-مدل سازی انتقال حرارت در داخل ذره..... ۵۳

۳-۷-۱-انتقال حرارت در داخل ذره جامد از طریق مکانیزم هدایت با در نظر گرفتن توزیع دما در داخل ذره جامد...۵۷

۳-۸-مدل سازی با استفاده از روش های تقریبی لامپ ساده و بهبود یافته.....۵۹

۳-۸-۱-مدل تقریب چند جمله ای(polynomial Approximation).....۶۲

۳-۸-۲-مدل لامپ ساده.....۶۵

۳-۸-۳-مدل تقریب هرمیت.....۶۷

۳-۸-۳-۱-مدل هرمیت H00/H00 برای تیغه (m=0).....۶۸

۳-۸-۳-۲-مدل هرمیت H11/H00 برای تیغه (m=0).....۷۰

۳-۸-۳-۳-مدل هرمیت H11/H00 برای استوانه(m=1).....۷۲

۳-۸-۳-۴-مدل هرمیتH20/H00 برای استوانه(m=1).....۷۴

۳-۸-۳-۵-مدل هرمیت H21/H00 برای کره(m=2).....۷۶

۳-۸-۳-۶-مدل هرمیت H21/H00 برای کره(m=2).....۷۷

۳-۸-۴-حل دقیق(تحلیلی).....۷۹

فصل چهارم: اعتبار سنجی

۴-۱-بررسی خطای مدل های ارائه شده.....۸۳

۴-۲-مختصات استوانه ای(هویج).....۸۳

۴-۳-مختصات کروی(نخود سبز).....۹۱

۴-۴-مختصات تیغه(هویج).....۹۹

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه گیری.....۱۰۶

پیشنهادات جهت کارهای آتی.....۱۰۸

فهرست منابع.....۱۰۹

چکیده انگلیسی.....۱۱۳

فهرست جداول

عنوان جدول

صفحه

۱-۱-جدول: انواع معادلات رطوبت تعادلی..... ۲۱

۱-۲-جدول: پارامترهای معادله گب برای برخی سبزیجات و میوه هادر دمای ۲۵ درجه سانتیگراد... ۲۲

۱-۴-جدول: ویزگی های هویج..... ۸۴

۴-۲-جدول: مقادیر خطای روش لامپ ساده..... ۸۶

۴-۳-جدول: مقادیر خطای روش H10/H00 ..... ۸۶

۴-۴-جدول: مقادیر خطای روش H11/H00 و روش PA..... ۸۶

۴-۵-جدول: محاسبه خطای روش لامپ ساده ۸۷

۴-۶-جدول: محاسبه خطای روش H10/H00..... ۸۷

۴-۷-جدول:محاسبه خطای روش H11/H00 و PA ۸۸

۴-۸-جدول: محاسبه خطای روش لامپ ساده ۹۰

۴-۹-جدول:محاسبه خطای روشH10/H00..... ۹۱

۴-۱۰-جدول: محاسبه خطای روش H11/H00وروشPA..... ۹۱

۴-۱۱-جدول :ویژگی های ترموفیزیکی نخود سبز..... ۹۲

۴-۱۲-جدول: محاسبه خطای روش لامپ ساده..... ۹۴

۴-۱۳-جدول: محاسبه خطای روش هرمیت H20/H00..... ۹۴

۴-۱۴-جدول:محاسبه خطای روش هرمیت H21/H00 و روشPA..... ۹۴

۴-۱۵-جدول:محاسبه خطای روشSL..... ۹۵

۴-۱۶-جدول:محاسبه خطای روش H20/H00..... ۹۵

۴-۱۷-جدول: محاسبه خطای روش H21/H00 و روشPA..... ۹۶

۴-۱۸-جدول: محاسبه خطای روش لامپ ساده..... ۹۸

۴-۱۹-جدول: محاسبه خطای روش H20/H00..... ۹۹

۴-۲۰-جدول:محاسبه خطای روش H21/H00و روشPA..... ۹۹

۴-۲۱-جدول:محاسبه خطای روش لامپ ساده..... ۱۰۱

۴-۲۲-جدول: محاسبه خطای روش H00/H00.....۱۰۱
۴-۲۳-جذول: محاسبه خطای روش H11/H00و روش PA ۱۰۱
۴-۲۴-جدول: محاسبه خطای روش لامپ ساده ۱۰۲
۴-۲۵-جدول: محاسبه خطای روش H00/H00.....۱۰۲
۴-۲۶-جدول: محاسبه خطای روش H11/H00و روشPA ۱۰۲
۴-۲۷-جدول:محاسبه خطای روش لامپ ساده.....۱۰۴
۴-۲۸-جدول: محاسبه خطای روش H00/H00.....۱۰۵
۴-۲۹-جدول: محاسبه خطای روش H11/H00 و روش PA.....۱۰۵

فهرست اشکال

عنوان
صفحه

۱-۱-شکل: منحنی خشک شدن.....۵

۱-۲-شکل: نمودار همدماهای جذب برای مواد مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.....۱۶

۱-۳-شکل: نمودار همدماهای جذب برای جامدات با خاصیت نمگیری متفاوت.....۱۷

۱-۴-شکل: شماتیک پسماند جذب-دفع برای یک ماده نمگیر.....۱۸

۱-۵-شکل: رطوبت تعادلی سیب زمینی در دماهای مختلف.....۱۹

۱-۶-شکل: محدوده همدماهای جذب برای مواد غذایی مختلف.....۲۰

۳-۱-شکل: نمودار سرعت خشک شدن یک جسم جامد نمگیر.....۳۳

۳-۲-شکل: شمایی از خشک شدن یک ذره منفرددر معرض جریان گازی.....۳۵

۳-۳-شکل: شمایی از خشک شدن مجموعه ای از ذرات در معرض جریان گازی.....۳۵

۳-۴-شکل: شمایی از نحوه المان گیری روی سطح ذره برای شرط مرزی معادله انتقال حرارت...۵۸

۴-۱-شکل: نمودار تغییرات رطوبت ماده حین فرایند(بدون بعد).....۸۵

۴-۲-شکل: منحنی تغییرات جرم.....

۴-۳-شکل: نمودار تغییرات دمای ماده حین فرایند(بدون بعد).....۸۹

۴-۴-شکل: نمودار تغییرات دما.....۸۹

۴-۵-شکل: نمودار تغییرات رطوبت در حالت بدون بعد.....۹۰

۴-۶-شکل: نمودار تغییرات رطوبت حین فرایند در حالت بدون بعد.....۹۳

۴-۷-شکل: نمودار تغییرات دما در حالت بدون بعد.....۹۳

۴-۸-شکل: نمودار تغییرات رطوبت حین فرایند.....۹۶

۴-۹-شکل: نمودار تغییرات دما حین فرایند.....۹۷

۴-۱۰-شکل: نمودار تغییرات میزان رطوبت در حالت بی بعد.....۹۸

۴-۱۱-شکل: نمودار تغییرات رطوبت در حالت بدون بعد.....۱۰۰

۴-۱۲-شکل: نمودار تغییرات جرم بر حسب زمان.....۱۰۰
۴-۱۳-شکل: نمودار تغییرات دما در حالت بی بعد.....۱۰۳
۴-۱۴-شکل: منحنی تغییرات دما بر حسب زمان.....۱۰۳
۴-۱۵-شکل: نمودار تغییرات رطوبت ماده در حالت بی بعد.....۱۰۴

چکیده:

در این تحقیق، خشک شدن یک ذره منفرد در هوا با شرایط ثابت توسط مدل های لامپ ساده و توسعه یافته و همچنین روش گسترش یافته، شبیه سازی شده است. در مدل های پیشنهادی با حل همزمان معادلات بقا جرم و انرژی، توزیع رطوبت و دمای ماده در حین خشک شدن پیش بینی می گردند.

مدل لامپ توسعه یافته که ساده تر از مدل های توزیع یافته است بر اساس روش تقریب چند جمله ای(polynomial Approximation) و همچنین روش تقریب هرمیت(Hermit Approximation) پیشنهاد شده و با توجه به مقادیر معلوم رطوبت و دمای اولیه ماده، رطوبت و دمای ماده در هر لحظه در حین خشک شدن مشخص می گردد. نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از حل دقیق تحلیلی مقایسه می گردند. در مدل های لامپ کلاسیک ساده دما و رطوبت ماده در کل جسم به صورت یکنواخت و فقط به صورت تابعی از زمان بیان می گردد. در نتیجه این نوع مدل ها تقریبی بوده و فقط برای اجسام کوچک مورد استفاده قرار می گیرند. در روش های لامپ توسعه یافته این محدودیت برطرف می گردد.

در این تحقیق به منظور اعتبار سنجی مدل های ارائه شده نتایج حاصل از مدل هابا نتایج حاصل از روش دقیق تحلیلی مقایسه شده اند. جهت حل مدل ها از خصوصیات فیزیکی هویج در مختصات استوانه ای و کارتزین و نیز از خصوصیات فیزیکی نخودسبز جهت مقایسه مدل ها و نیز میزان خطای هر مدل برنامه ای در محیط MATLAB نوشته شد که این برنامه دما و رطوبت پیش بینی شده توسط مدل های تقریبی لامپ ارائه شده را با نتایج حاصل از مدل دقیق تحلیلی مقایسه می کنند.

نتایج این تحقیق نشان می دهند که در سیستم های کارتزین(تیغه) و استوانه ای روش های P.A و هرمیتH11/H00 و در سیستم کروی روش های P.A و هرمیتH21/H00 جواب های یکسان و دقیق تر از مدل های تقریبی دیگر در مقایسه با روش دقیق تحلیلی به دست می دهند. همچنین روش لامپ ساده دارای بیشترین خطاست. همچنین نتایج نشان می دهند که مدل های لامپ در پیش بینی دما دقیق تر از پیش بینی رطوبت عمل می کنند. مقدار خطای نسبی روش هایH21/H00,P.A در مختصات کروی به ترتیب ۰.۲۵۷۳۳٤ و۰.۱۸۳۳۵٤ درصد و خطای نسبی روش هایH11/H00,P.A در مختصات استوانه ای به ترتیب ۰.۰۰۹۵۸ و ۰.۰۰۹۵۸ و در مختصات کارتزین ۰.۱۷۱۵۱٤ و ۰.۰٤۳٦۱٤ می باشند.

کلید واژه: خشک کردن، انتقال جرم و حرارت، مدل لامپ توسعه یافته، دما، رطوبت

اول:

مقدمه

مقدمه:

خشک کردن یکی از مهمترین فرآیندها در حوزه مهندسی شیمی می باشد و در اکثر واحدهای صنعتی حداقل یک واحد خشک کن وجود دارد. بطور کلی خشک کردن جامدات یعنی خارج کردن مقدار کمی آب یا مایعات از ماده ی جامد،تا مقدار مایع باقی مانده به حد قابل قبولی برسد.این فرایند معمولا آخرین مرحله یک سری عملیات است و محصول آن اغلب آماده بسته بندی نهایی است[۲۳].

فرآیند خشک کردن یکی از روش‌های اصلی نگهداری موادی است که به علت رطوبت بالا فساد-پذیر، تخریب‌پذیر و یا واکنش پذیرند. فرآیند خشک کردن فرآیندی پیچیده شامل انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت می‌باشد. این فرآیند سبب تغییرات برگشت‌ناپذیر تخریبی و غیرتخریبی در خواص فیزیکی، شیمیایی و ظاهر مواد همچون رنگ، ویسکوزیته و در برخی موارد شکست هیدروکربن‌ها می‌شود، که این تغییرات ممکن است باعث افت کیفیت محصول شوند. به همین دلیل خشک کردن هر محصولی نیازمند انتخاب بهترین روش در حالت بهینه است، تا کمترین افت کیفیت در محصول موردنظر ایجاد شده و عملیات در کمترین زمان ممکن انجام شود[۳۵،۳۰]. خشک کردن سهم قابل توجهی از کل انرژی مورد نیاز در فرآیند تولید را (تقریباً ۱۲%) مصرف می‌کند. برای نمونه برای یک خشک‌کن مجزا، هزینه انرژی محاسبه شده در مقایسه با هزینه کلی حدود ۷۰%-۶۰ می‌باشد [۸].

جامدات خشک شده به اشکال مختلفی هستند-پولک مانند،دانه ای(گرانول)،بلوری،پودری،صفحه ای یا ورق های پیوسته و خواص آنها بسیار متنوع است.مایعی که تبخیر میشود ممکن است روی سطح جامد باشد.مثل خشک کردن بلورهای نمک،همچنین ممکن است کاملا درون جامد باشد.یا ممکن است مقداری از آن درون جامد و مقداری دیگر بیرون آن باشد.خوراک بعضی خشک کن ها مایع است که جامد درون آن بصورت ذرات محلول وجود دارد[۲۳].

آب یا مایع ممکن است توسط نیروهای مکانیکی نظیر سانتریفیوژ ، فشار و... و یا بوسیله حرارت دادن و تبخیر از جسم جامد مرطوب خارج گردد. در اینجا بحث خشک کردن محدود به خشک کردن با تبخیر حرارتی می باشد. خشک کردن مکانیکی به مراتب ارزانتر از تبخیر می باشد. بنابراین توصیه می شود تا جایی که ممکن است قبل از ورود مواد به داخل خشک کن رطوبت آن به صورت مکانیکی خارج گردد.

این فرایند یک عملیات اصلی در صنایع شیمیایی، کشاورزی، بیوتکنولوژی، غذایی، پلیمر، سرامیک، دارویی، خمیر وکاغذسازی، مواد معدنی و چوب می باشد [٢٤].

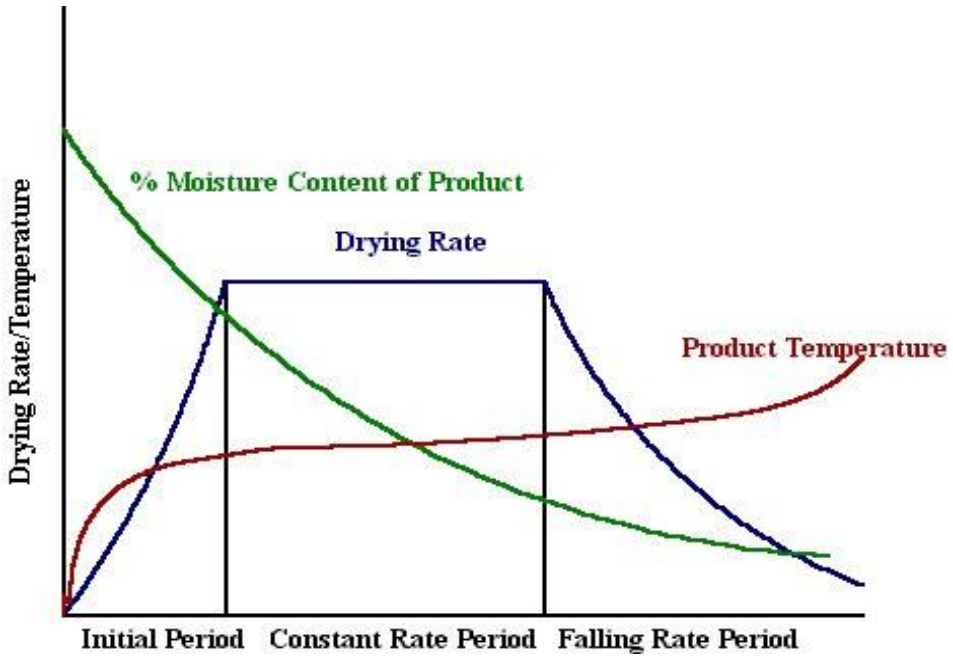
در صنایع غذایی هدف از خشک کردن، ذخیره سازی طولانی مدت مواد غذایی، حداقل کردن نیاز های انبارداری و بسته بندی وکاهش هزینه های حمل و نقل می باشد. عملیات خشک کردن تاثیر زیادی بر روی کیفیت محصول و قیمت آن می گذارد. کیفیت محصول غذایی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرایند خشک کردن در آن رخ می دهد بستگی دارد. درجه ی حرارت، زمان و فعالیت آبی[1] در حین فرایند خشک کردن بر روی کیفیت محصول نهایی اثر گذار است. دماهای پائین اثر مثبتی بر روی کیفیت محصول دارد، ولی زمان فرایند را نیز طولانی تر می کند. در فعالیت آبی پائین، رشد میکروارگانیسم ها کند یا متوقف می شود ولی سرعت اکسیداسیون لیپید نیز افزایش می یابد. واکنش های قهوه ای شدن غیرآنزیمی یا مایلارد در فعالیت آبی متوسط(٠.٧-٠.٦)به حداکثر می رسد، بنابراین باید سریعا از این دامنه فعالیت آبی عبور کند.

بسیاری از غذاهای خشک شده، قبل از مصرف باز آبپوشی[2] می شوند. ساختار، چگالی و اندازه ی ذره ی یک ماده ی غذایی خشک شده در حل شدن آن در آب یا بازآبپوشی نقش مهمی را ایفا می کند. کاهش اندازه ذرات و افزودن امولسیفایرهایی چون لسیتین یا عوامل فعال کننده ی سطحی موجب سهولت باز آبپوشی می شود. عواملی مانند پف کردن، خلاء، کف کردن، دمای سطح، انجام فرایند در دمای پائین، تجمع و بهم چسبندگی ذرات و پوشش سطحی بر ساختار، چگالی و بازآبپوشی غذا تاثیر می گذارد[٣].

در خشک کردن محصولات غذایی و محصولات فن‌آوری‌های زیستی، پدیده‌های انتقال داخلی در ذره، نقش مهمی را در طراحی و عملیات خشک‌کن‌ها برعهده دارند. از آنجایی که اندازه‌گیری خواص داخلی ذره در طی فرآیند خشک کردن بسیار مشکل است، مدل‌های ریاضی از ابزارهای مهم برای رسیدن به این هدف هستند[٤١].برای مثال اندازه‌گیری دمای ذره در طی فرآیند خشک شدن می‌تواند در تشخیص اینکه فرآیند توسط انتقال انرژی (مقاومت خارجی) یا انتقال جرم (مقاومت داخلی) کنترل شده، به ما کمک کند. اگر دمای ذره با دمای حباب تر هوای اطراف ذره برابر باشد، نشان دهنده آن است که انتقال انرژی کنترل‌کننده فرآیند می‌باشد و اگر دمای ذره به دمای حباب خشک هوای اطراف برسد، انتقال جرم کنترل‌کننده فرآیند است. زمانی که انتقال انرژی از محیط اطراف به ذره جامد عامل

[1] Water activity
[2] rehydrated

محدودکننده باشد، خشک شدن با نرخ ثابت[1] اتفاق می‌افتد و زمانی که انتقال رطوبت داخلی به سطح ذره جامد عامل محدودکننده باشد، نرخ خشک شدن به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد و به صورت خشک شدن با نرخ نزولی[2] تعریف می‌شود. وجود هر یک ازاین دو فرآیند به پارامترهای زیادی مانند نوع ماده، محتوای رطوبت آن، جذب سطحی هم دما، ضریب نفوذ و سایر ضرایب انتقال وابسته است[۱٤]. شکل (۱-۱) منحنی خشک شدن را در سه دوره مختلف نشان می‌دهد: مرحله گرم شدن ذرات، مرحله نرخ ثابت خشک شدن و مرحله نرخ نزولی خشک شدن.



شکل ۱-۱- منحنی خشک شدن[۱۲]

پارامتری تحت عنوان رطوبت بحرانی وجود دارد، رطوبت بحرانی[3] رطوبتی است که در آن دوره خشک شدن با نرخ ثابت پایان می‌یابد که در واقع رطوبتی است که در کمتر از آن، مایع انتقال یافته از داخل جامد آنقدر نیست که بتواند فیلم پیوسته یا تقریباً پیوسته‌ای از مایع روی سطح به وجود آورد.اگر رطوبت اولیه جامد کم‌تر از مقدار بحرانی باشد، دوره خشک شدن با نرخ ثابت وجود ندارد.

رطوبت بحرانی فقط خاصیت ماده‌ای که باید خشک شود نیست بلکه برحسب ضخامت ماده، آهنگ خشک شدن و مقاومت انتقال گرما و انتقال جرم در جامد تغییر می‌کند. با کاهش ضخامت ماده،

[1] Constant rate
[2] Falling rate
[3] Critical moisture

رطوبت بحرانی کمتر می‌شود زیرا مقاومت‌های داخلی نسبتاً کم می‌شوند و مقاومت‌های خارجی آهنگ خشک شدن را در یک دوره طولانی کنترل می‌کنند [۲۳].

اگر مقدار رطوبت اولیه جسم جامد که تحت شرایط پایا خشک می‌شود بیشتر از مقدار رطوبت بحرانی آن جسم باشد ($X_0 > X_c$)، نرخ خشک شدن این جسم ثابت خواهد بود زیرا خارج شدن رطوبت از سطح این جسم عیناً مانند خارج شدن آب از سطح آزاد ماده در همان شرایط است. و اگر محتوای رطوبت اولیه جسم جامد از رطوبت بحرانی آن کمتر باشد ($X_0 < X_c$) و جسم در شرایط پایا خشک شود، با پیشروی فرایند خشک شدن، نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد زیرا مقاومت داخلی در مقابل انتقال آب در داخل جسم بزرگتر از مقاومت خارجی انتقال آب از جسم می‌باشد و خشک شدن به اصطلاح در دوره آهنگ نزولی اتفاق می‌افتد [۲۷].

با توجه به اینکه هزینه عمده خشک کن ها هزینه عملیاتی آنها است و نه هزینه سرمایه گذاری اولیه، استفاده از خشک کن های صنعتی با بازده حرارتی بالا از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد از سویی عوامل زیادی وجود دارد که حضور این فرایند را در صنایع مختلف پر رنگ می کند.

از جمله مهمترین دلایلی که خشک کردن مواد را امری ضروری میکند میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

استفاده راحت از مواد جامد در مراحل بعدی فرآیندها
ذخیره و نگهداری مناسب
کاهش هزینه های حمل ونقل
رسیدن به کیفیت مطلوب

روشن است که وجود یک روش ساده جهت طراحی همه خشک کن ها غیر ممکن است. بنابراین جهت طراحی یک خشک کن و یا آنالیز یک خشک کن موجود لازم است به معادلات اساسی انتقال جرم، حرارت و مومنتوم ، همراه با شناخت خواص مواد رجوع کرد.

حرارت می تواند با مکانیسم های جابجایی، هدایت و یا تشعشع انتقال یابد. حدود ۸۵ درصد از خشک کن های صنعتی از نوع جابجایی با هوای داغ یا گازهای حاصل از احتراق می باشند. در حدود ۹۹ درصد از کاربردها خشک کردن شامل حذف آب به عنوان رطوبت می باشد[۲٤].

انتقال همزمان جرم از سطح وحرارت به سطح جسم، حرکت جامد مرطوب درون خشک کن، مکانیزم های مختلف انتقال رطوبت درون جسم و چروکیدگی از مهمترین مسایل در ارتباط با خشک کردن یک جسم می باشند.

مهمترین عاملی که در شروع یک فرآیند خشک کردن لازم است، تأمین گرمای نهان تبخیر جهت تبخیر رطوبت موجود در ماده می‌باشد. با توجه به قیمت سوخت و ارزش گرمایی آن، توجه به نرخ انرژی مصرفی در انواع فرآیندهای خشک کردن بسیار مهم و حیاتی می‌باشد[۲۵]. از آنجا که گرمای نهان تبخیر آب بالا است و ذاتا بازده حرارتی هوای داغ به عنوان محیط خشک کننده پائین است ، این فرآیند دارای مصرف انرژی بالایی بوده و از لحاظ مصرف انرژی با فرآیندهایی مثل تقطیر در رقابت می باشد. بر اساس آمارهای موجود میزان مصرف سالانه انرژی در عملیات خشک کردن در صنایع مختلف در کشورهای آمریکا، کانادا و فرانسه ۱۰ تا ۱۵ درصد و در دانمارک و آلمان ۲۰ تا ۲۵ درصد کل مصرف انرژی صنایع می باشد. میزان مصرف انرژی مربوط به فرآیندهای خشک کردن در صنایع از کمتر از ۵ درصد تا ۳۵ درصد (در عملیات کاغذ سازی) گزارش شده است[۲٤].

فن‌آوری خشک کردن از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین شکل آن یعنی استفاده از انرژی گرمایی خورشید شروع شده و امروزه به صورت استفاده از خشک‌کن‌های سینی‌دار، خشک‌کن‌های تونلی، خشک‌کن-های پاششی، خشک‌کن‌های بستر سیالی، خشک‌کن‌های تبخیری، خشک‌کن‌های استوانه‌ای دوار، خشک‌کن‌های انجمادی، خشک‌کن‌های رطوبت‌گیری اسمزی، خشک‌کن‌های ماکروویو و دی‌الکتریک، ادامه یافته است. هر یک از خشک‌کن‌های ذکر شده در بالا، خصوصیات مربوط به خود را دارد [۳٦،۲۵].

با توجه به مصرف شدید انرژی و بیش از نیم قرن تحقیق در دانشگاه‌ها و صنایع، هنوز هم خشک کردن مواد یک تکنیک علمی محسوب می‌شود و این موضوع به این دلیل است که فرآیند خشک کردن یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهاست و در نتیجه هنوز هم دشواری‌ها و نواقص در توصیف ریاضی پدیده-های همزمان انتقال جرم، حرارت و مومنتوم در این فرآیند وجود دارد[۲۵].

در خشک کردن یک ذره مرطوب، دو فرآیند به طور همزمان اتفاق می‌افتد[۲۵]:

انتقال انرژی از محیط پیرامون به ذره در حال خشک شدن جهت تبخیر رطوبت سطحی که این مرحله به شرایط خارجی مانند دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت، فشار و سطح ظاهری ذره وابسته است.

انتقال رطوبت از داخل ذره به سطح خارجی آن و سپس تبخیر رطوبت که این مرحله تابعی از خواص فیزیکی ذره جامد، دما و محتوای رطوبت آن می‌باشد.

نرخ خشک شدن در انواع خشک‌کن‌ها توسط سرعت عملیات ذکر شده در بالا کنترل می‌شود. در طی فرآیند خشک شدن هر یک از مراحل بالا می‌تواند یک فاکتور محدودکننده برای خشک شدن محسوب شود، اگرچه هر دو فرآیند بطور همزمان در طی فرآیند خشک شدن رخ می‌دهد.

مدلسازی دفع رطوبت از مواد مرطوب در حین خشک شدن مواد فرآیندی پیچیده شامل در نظر گرفتن همزمان معادلات انتقال جرم و حرارت می‌باشد. مدلسازی این فرآیند پیچیده نیازمند توسعه معادلات بدست آمده از قوانین پایستگی می‌باشد که منجر به دسته‌ای از معادلات غیرخطی می‌شوند. در خشک‌کن‌ها این معادلات شامل پارامترهای بیشماری مانند پارامترهای طراحی، پارامترهای عملیاتی و پارامترهای فیزیکی ماده می‌باشد که اندازه‌گیری و یا سنجیدن مقدار برخی از این پارامترها بسیار مشکل می‌باشد. بسیاری از مدل‌های پیشنهادی از فرض‌های ساده کننده زیادی جهت حل معادلات حاکم بر سیستم استفاده می‌کنند، همچنین برای حل عددی این معادلات فرضیات دیگری را نیز در نظر می‌گیرند که ممکن است در تجزیه و تحلیل فرآیند خشک کردن و یا آنچه که در طراحی صنعتی نیاز است، صحت نداشته باشند.

در مجموع مشخصه های منحصر به فرد زیر فرآیند خشک کردن را به مقوله ای جذاب وچالش برانگیز برای محققان مبدل نموده است [۲٤] :

تنوع در اندازه مواد جامد از میکرون تا ده ها سانتیمتر.
تخلخل مواد جامد از صفر تا ۹۹ درصد متغیر می باشد.
تنوع زمان خشک شدن از ۰/۲۵ ثانیه (خشک شدن دستمال کاغذی) تا ۵ ماه (خشک شدن نوعی چوب جنگلی) .
ظرفیت خشک کن ها از ۰/۱ کیلوگرم بر ساعت تا ۱۰۰ تن بر ساعت متغیر است.
سرعت محصول درون خشک کن ها از صفر تا ۲۰۰ متر بر دقیقه متغیر است.
دمای خشک کن ها از زیر نقطه سه گانه تا بالاتر از نقطه بحرانی مایع تغییر می نماید.
فشار عملیاتی از ۱ میلی بار تا ۲۵ بار در خشک کن های مختلف تغییر می نماید.
درصد رطوبت محصولات در خشک کن ها متفاوت می باشد. مثلا نمک طعام خشک ۰/۵ درصد، ذغال ۴ درصد ونوعی از شیر خشک در حدود ۸ درصد وزنی رطوبت دارند.