بسم الله الرحمن الرحيم
إنه من سليمان وإنه

دانشکده مهندسی شیمی

مدلسازی ریاضی فرآیند خشک‌کن انجمادی

حمید رضا اصغری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی شیمی - گرایش طراحی، شبیه سازی و کنترل فرآیندها

شهریور ۱۳۸۵

به نام خدا

دانشکده مهندسی شیمی

مدلسازی ریاضی فرآیند خشک‌کن انجمادی

دانشجو: حمید رضا اصغری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی شیمی - گرایش طراحی، شبیه سازی و کنترل فرآیندها

اساتید راهنما:

دکتر نوراله کثیری

دکتر سید حسن هاشم آبادی

شهریور ۱۳۸۵

تقدیم به :

پدر عزیز و مادر فداکارم

که مشوق اصلی من در ادامه تحصیل بودند.

با تشکر از :

اساتید گرامی

آقای دکتر کثیری

آقای دکتر هاشم آبادی

که راهنمای من در انجام این پایان‌نامه بودند.

چکیده

در این کار ابتدا مطالعه جامعی بر مفاهیم, شناخت, مکانیسم و کاربردهای خشک‌کن انجمادی انجام شده است. سپس مدلهای ریاضی قبلی خشک‌کن انجمادی بررسی شدند. در بخش اصلی ابتدا برای مقایسه دفع رطوبت پیوندی در مرحله اولیه خشک‌کردن در شرایط حرارتی مختلف برای اشکال هندسی تیغه ای، استوانه ای و کروی شکل مدلسازی انجام شده است تا اهمیت شکل هندسی و نوع شرایط حرارتی بر مقدار دفع رطوبت پیوندی مشخص شود. در اینحالت نتیجه گرفته شد که مقدار دفع رطوبت پیوندی به‌ترتیب در نمونه کروی, استوانه ای و تیغه ای شکل بیشتر است. در ادامه با مدلسازی در محیط خشک‌کن پارامترهای کلیدی و اثر شرایط عملیاتی در طراحی برمبنای کاهش هزینه‌ها بررسی شدند. سپس با انجام مدلسازی دقیقتر در حالت ناپایا, حل تحلیلی برای معادلات مدل انجام شد. در نهایت برای سیستم استوانه ای مدلسازی انجام شد که با بکاربردن تغییر متغییرهای خاصی, معادلات جدید با استفاده از روش Crank-Nicolson گسسته شدند. در تمام حالات از نرم‌افزار Matlab برای نوشتن برنامه محاسبات استفاده شده است. از مهمترین نتایج محاسبات به‌مواردی اشاره شده است که عبارتند از: زمان خشک‌شدن ارتباط مستقیمی با مربع ضخامت جسم دارد. به‌دلیل کنترل‌شوندگی فرایند با انتقال جرم و ارتباط معکوس ضریب انتقال جرم با فشار, با افزایش فشار در محیط خشک‌کن زمان خشک‌شدن بیشتر شده است. به‌دلیل افزایش انتقال جرم توسط نفوذ گرمایی یا اثر Sorret, زمان خشک‌شدن کمتر شده است. در محدوده های کم تغییر فاز, زمان خشک‌شدن کمتر ولی در محدوده های بیشتر, بدلیل تجمع جرم و حرارت, زمان خشک‌شدن بیشتر شدند. در انتها پیشنهاداتی برای کارهای تحقیقاتی آینده ارائه شده است.

& فهرست مطالب

فصل اول: شناخت، مکانیسم و کاربرد خشک‌کن انجمادی ۱

۱-۱- معرفی خشک‌کن انجمادی ۲

۱-۲- تاریخچه ای از کاربرد خشک‌کن انجمادی ۳

۱-۳- کاربرد خشک‌کن انجمادی ۴

۱-۴- مزایا و معایب خشک‌کن انجمادی ۴

۱-۵- اجزای داخلی یک خشک‌کن انجمادی ۶

۱-۶- اقدامات معین برای خشک‌کردن ۷

۱-۷- مراحل مختلف فرآیند ۸

۱-۷-۱- تصعید ۹

۱-۷-۲- مکانیزم خشک شدن ۹

۱-۷-۲-۱- خشک شدن اولیه ۱۰

۱-۷-۲-۲- خشک شدن ثانویه ۱۰

۱-۸- زمان خشک‌کردن ۱۳

۱-۹- پدیده های ویژه در زمان خشک‌شدن ۱۴

۱-۱۰- انتقال جرم و حرارت در مواد متخلخل ۱۶

۱-۱۱- معرفی خشک‌کنهای انجمادی ۱۷

۱-۱۲- بررسی کلی تجهیزات ۲۱

۱-۱۳- مکانیزمهای کنترل و بهینه سازی ۲۸

۱-۱۴- انجماد و آماده سازی مواد برای خشک شدن انجمادی ۳۳

فصل دوم: مقدمه ای بر مدلسازی ۳۸

۲-۱- هدف از مدلسازی	۳۹
۲-۲- مراحل دستیابی به مدل ریاضی	۳۹
۲-۳- مروری بر مدلسازی های انجام شده	۴۰
فصل سوم: مدلسازی تحلیلی خشک‌کن انجمادی	۴۴
۳-۱- مدلسازی مرحله ثانویه فرایند خشک‌کن انجمادی برای اشکال هندسی و شرایط حرارتی مختلف	۴۵
۳-۲- مدلسازی ریاضی فرآیند خشک‌کن انجمادی در حالت پایا و ناپایا ,و توجه به حل تحلیلی برای آن	۵۴
۳-۳- بررسی اهمیت ترم ناپایداری و شار جابجایی در انتقال حرارت و جرم	۶۸
۳-۴- بررسی پدیده های انتقال خاص در انتقال حرارت و جرم	۷۸
فصل چهارم: مدلسازی عددی خشک کن انجمادی	۱۰۸
۴-۱- مدلسازی در سیستم استوانه‌ای	۱۰۹
۴-۲- روش حل عددی برای حل مسایل مرزی متحرک	۱۲۳
۴-۳- روش حل برای سیستم استوانه ای	۱۲۴
فصل پنجم: بحث و بررسی نتایج محاسبات	۱۳۵
فصل ششم:پیشنهادات	۱۶۰
مراجع و منابع	۱۶۳

& فهرست اشکال

شکل (۱-۱) شماتیکی از اجزای داخلی خشک‌کن انجمادی	۶
شکل (۱-۲) شماتیکی از اجزای داخلی خشک‌کن انجمادی	۷
شکل (۱-۳) شماتیکی از مراحل اصلی خشک‌کردن انجمادی	۱۲
شکل (۱-۴) شماتیک میکروسکوپی از فرآیند دفع آب	۱۲
شکل (۱-۵) مدلهای عمومی استفاده شده برای ساختار مواد متخلخل	۱۶
شکل (۱-۶) شماتیکی از خشک‌کن انجمادی آزمایشگاهی	۱۷
شکل (۱-۷) شماتیکی از خشک‌کن انجمادی تونلی	۱۸
شکل (۱-۸) شماتیک انواع سیستمهای گرمایش و سرمایش	۲۲
شکل (۱-۹) روشهای تماس سینی حاوی محصول باصفحات گرما دهنده	۲۳
شکل(۱-۱۰) سیستمهای جذب بخار آب	۲۶
شکل (۱-۱۱) رشد کریستال یخ	۳۲
شکل (۱-۱۲) منحنی انجماد محلول رقیق نمک طعام	۳۵
شکل (۳-۱) شماتیک ساده تیغه، استوانه و کره	۴۶
شکل (۴-۱) شماتیکی از فرایند در یک نیم استوانه	۱۱۰
شکل (۴-۲) المانی از جسم استوانه ای و ترمهای جرم و حرارت	۱۱۳
شکل (۵-۱) مقایسه زمان خشک شدن برای دو مدل	۱۳۸
شکل (۵-۲) مقایسه زمان خشک شدن بین مدلها و داده های تجربی	۱۳۹
شکل (۵-۳) اثر عایق و دما ثابت برای انتهای بخش منجمد بر زمان خشک شدن	۱۴۰
شکل (۵-۴) اثرضخامت نمونه بر زمان خشک شدن	۱۴۱
شکل (۵-۵) تغییرات غلظت بخار آب در فصل مشترک	۱۴۱
شکل (۵-۶) تغییرات دمای کل نمونه در زمان خشک شدن	۱۴۲

شکل (۵-۷) تغییرات دمای کل نمونه در زمان خشک شدن ۱۴۳

شکل (۵-۸) اثر ناپایداری بر زمان خشک شدن ۱۴۴

شکل (۵-۹) مقایسه زمان خشک شدن در فشار Pa ۱۳۳ ۱۴۵

شکل (۵-۱۰) مقایسه زمان خشک شدن در فشار Pa ۲۶۶ ۱۴۵

شکل (۵-۱۱) اثر قطر نمونه بر زمان خشک شدن در نمونه استوانه ۱۴۶

شکل (۵-۱۲) اثر قطر نمونه بر زمان خشک شدن در نمونه کروی ۱۴۷

شکل (۵-۱۳) اثر دمای سطح نمونه بر زمان خشک شدن در نمونه استوانه ای ۱۴۸

شکل (۵-۱۴) اثر ترکیب نسبی بخار آب بر زمان خشک شدن ۱۴۹

شکل (۵-۱۵) تغییرات فشار جزیی بخار آب بر سطح چگالنده ۱۵۱

شکل (۵-۱۶) مقدار تبرید بخار آب بر سطح چگالنده ۱۵۲

شکل (۵-۱۷) تغییرات سرعت پمپاژ ۱۵۲

شکل (۵-۱۸) تغییرات سرمای تبرید ۱۵۳

شکل (۵-۱۹) اثر شار جابجایی در زمان خشک شدن در سیستم پایدار ۱۵۴

شکل (۵-۲۰) اثر ناپایداری در زمان خشک شدن ۱۵۵

شکل (۵-۲۱) اثر Sorret در زمان خشک شدن ۱۵۶

شکل (۵-۲۲) اثر تغییر فاز در محدوده کم بر زمان خشک شدن در نمونه تیغه ای ۱۵۶

شکل (۵-۲۳) اثر تغییر فاز در محدوده بیشتر در زمان خشک شدن در نمونه کروی ۱۵۷

شکل (۵-۲۴) تغییرات دمای فصل مشترک ۱۵۹

& فهرست جداول

جدول (۴-۱) تبدیل مختصات محورها در وضعیت اول ۱۲۵

جدول (۴-۲) تبدیل مختصات توابع در وضعیت اول ۱۲۶

جدول (۴-۳) تبدیل مختصات محورها در وضعیت دوم ۱۲۶

جدول (۴-۴) تبدیل مختصات توابع در وضعیت دوم ۱۲۷

جدول (۵-۱) درصد رطوبت در آغاز مرحله ثانویه بر حسب کیلو گرم ۱۳۶

جدول(۵-۲) مقادیر پارامترها برای آنالیز خشک شدن Skim milk ۱۵۸

علائم:

A_c مساحت انتقال حرارت m^2

b ضریب سرعت خشک شدن $\frac{m}{s^{.5}}$

C_m ظرفیت نفوذی جرمی $\frac{m^3}{kg}$

c_p ظرفیت نفوذی جریانی $\frac{1}{pa}$

C_p ظرفیت گرمایی ویژه $\frac{J}{kg\ ^oK}$

C_{sw}مقدار رطوبت پیوندی نسبت به مقدار جامد اولیه

C_w غلظت بخار آب $\frac{kg}{m^3}$

C_t غلظت کل $\frac{kg}{m^3}$

D_w ضریب انتقال جرم درون نمونه $\frac{m^2}{s}$

$D_{w,in}$ ضریب انتقال جرم درون نمونه بین بخار و گاز خنثی $\frac{m^2}{s}$

F_{up} فاکتور شکل برای گرم کننده بالای جسم

h ضریب انتقال حرارت جابجایی $\frac{W}{m^2\ ^oK}$

h_w ضریب انتقال حرارت جابجایی بین محیط خشک کن و سطح جسم $\frac{W}{m^2\ ^oK}$

H ارتفاع نمونه تیغه ای و استوانه ای شکل m

$H_{transfer}$ گرمای تغییر فاز $\frac{W}{m^3}$

ΔH_f سرمای تبرید $\frac{J}{kg}$

ΔH_d گرمای دفع آب پیوندی $\frac{J}{kg}$

ΔH_s گرمای نهان تصعید $\frac{J}{kg}$

ΔH_v گرمای نهان تبخیر $\frac{J}{kg}$

k ضریب انتقال هدایت گرمایی $\frac{W}{m\,^oK}$

$k_{d,1}$ ثابت دفع رطوبت پیوندی $\frac{1}{s}$

k_m ضریب هدایت جرمی $\frac{m^2}{s}$

k_p ضریب انتقال حرارت بین سطح گرم کننده پایین جسم تا انتهای بخش منجمد $\frac{W}{m^2\,^oK}$

K_g ضریب انتقال جرم در محیط خشک کن $\frac{kg}{pa\,s}$

K_p ضریب جریان $\frac{kg}{m\,pa\,s}$

m ضخامت جسم L

J_o تابع درجه صفرم بسل

J_c شار جرمی $\frac{kg}{m^2\,s}$

J_{diff} شار جرمی نفوذی $\frac{kg}{m^2\,s}$

J_{filt} شار جرمی Filtration $\frac{kg}{m^2\,s}$

J_q شار نفوذ حرارتی $\frac{W}{m^2}$

m : مکان فصل مشترک m

که برای نمونه تیغه ای X و برای نمونه های استوانه ای و کروی R_f برای مکان فصل مشترک معرفی شده اند.

m_i جرم یخ kg

m_w^o شدت جرم بخار آب $\frac{kg}{s}$

M_w جرم مولکولی آب $\frac{kg}{kmol}$

n شمارنده

N تعداد سینی های حاوی نمونه

N_{in} شار گاز خنثی $\frac{kg}{m^2 s}$

N_w شار بخار آب $\frac{kg}{m^2 s}$

q شار ثابت $\frac{W}{m^2}$

Q_v سرعت پمپاژ $\frac{m^3}{s}$

P فشار Pa

R شعاع نمونه m

R_f شعاع بخش منجمد m

R_g ثابت عمومی گازها $\frac{J}{kmol\ ^oK}$

t زمان خشک شدن s

t_1 زمان خشک شدن مرحله اولیه s

t_2 زمان خشک شدن مرحله ثانویه s

T دما ^oK

T^o دمای اولیه قبل از آغاز خشک شدن ^oK

T_L دمای انتهای لایه منجمد ^oK

T_w دمای دیواره خشک کن ^oK

T_{Lp} دمای گرم کننده پایین جسم ^oK

T_{Up} دمای گرم کننده بالای جسم ^oK

w_o وزن رطوبت اولیه در آغاز مرحله ثانویه kg

W_o وزن رطوبت اولیه بر حجم نمونه در آغاز مرحله ثانویه $\frac{kg}{m^3}$

W_2 وزن رطوبت بر حجم نمونه در مرحله ثانویه $\frac{kg}{m^3}$

W_H مقدار رطوبت پیوندی بر حجم نمونه $\frac{kg}{m^3}$

V_d حجم محفظه خشک کن m^3

V_{cd} حجم محفظه سیستم تبرید m^3

X مکان فصل مشترک m

y طول نمونه در جهت عمق نمونه تیغه ای شکل m

y_w : کسر وزنی بخار آب

یونانی:

a ضریب نفوذ گرمایی $\frac{m^2}{s}$

a_p ضریب جریان $\frac{m^2}{s}$

d ضریب گرادیان دما $\frac{1}{^oK}$

ε تخلخل

l_1 بردار ویژه برای جمله اول در توزیع دما

r دانسیته $\frac{kg}{m^3}$

s ثابت بولتزمن $\frac{W}{m^{2\,o}K^4}$

w درصد تغییر فاز

∇ گرادیان نسبت به مکان $\frac{1}{m}$

Δ اختلاف هر پارامتر که واحدش بر اساس همان پارامتر است.

Γ فاکتور شکل که برای نمونه تیغه ای $\Gamma = 0$, برای نمونه استوانه ای $\Gamma = 1$ و برای نمونه کروی $\Gamma = 2$ است.

اندیس ها:

۱ نشانه مرحله اولیه خشک شدن

۲ نشانه مرحله ثانویه خشک شدن

cy نشانه نمونه استوانه ای شکل

cd سطح چگالنده

ch محفظه خشک کن

d لایه خشک

e موثر

f لایه منجمد

fm فصل مشترک

i یخ

in گاز اینرت

s سطح جسم

sl نشانه نمونه تیغه ای شکل

sp نشانه نمونه کروی شکل

w بخار آب

مقدمه

خشک‌کردن قدیمی‌ترین فرایند جداسازی و یکی از فرایندهای صنعتی با گستردگی زیاد به‌خصوص در صنایع شیمیایی، کشاورزی، بیوتکنولوژی، غذایی، پلیمر، سرامیک، داروسازی، کاغذسازی و غیره است که فرآیند پیچیده ای همراه با تغییرات فیزیکی و شیمیایی است که مهمترین آنها انقباض، بادکردن، تغییر رنگ، طعم و بافت نمونه با انجام واکنشات شیمیایی و بیوشیمی است که هدف از آن کاهش رطوبت تا حداقل ممکن برای کاهش واکنشات شیمیایی, نگهداری و کاهش هزینه حمل‌ونقل مواد است.

یک نوع خشک‌کن که زیاد شناخته شده نیست خشک‌کن انجمادی است. چون مکانسیم اصلی در این خشک‌کن، تصعید رطوبت منجمد در دما و فشار عملیاتی کمتر از نقطه سه گانه آب است، بنابراین روش مناسبی برای خشک‌کردن موادی که حساسیت بالایی نسبت به دما حتی در دماهای متوسط دارند، می‌باشد. اما به دلیل سرعت پایین خشک‌شدن, هزینه‌های عملیاتی و مصرف انرژی آن زیاد است. خشک‌کن انجمادی در صنایع دارویی، غذایی، پزشکی، شیمیایی، بیوتکنولوژی، گیاه‌شناسی، کشاورزی، متالورژی، باستان‌شناسی و غیره کاربرد وسیعی دارد.

خشک‌کن انجمادی اولین بار به صورت خیلی ساده توسط Altman Richard در ۱۸۹۰ استفاده شد. او برای خشک‌کردن مواد منجمد از یک دسیکاتور و پمپ خلا استفاده نمود. در ۱۹۳۸ کمپانی Nestle تولید قهوه و نسکافه را با ساخت خشک‌کن انجمادی به‌صورت صنعتی آغاز نمود. در ۱۹۴۲ استفاده از آن در آمریکا در زمینه نظامی توسعه یافت. در زمان جنگ جهانی دوم زمینه مساعدی برای رشد این صنعت ایجاد شد, اما به دلیل هزینه‌های عملیاتی بالا برای مواد خاصی به‌خصوص برای نگهداری پلاسمای خون, مواد غذایی و دارویی استفاده می‌شد. در سال ۱۹۴۹ پنی‌سیلین توسط W.E.Folsdorf با این روش تولید شد. از نیمه دوم سال ۱۹۶۰ تولید صنایع خشک‌کن انجمادی با توجه به کاربرد وسیع آن در صنایع مختلف گسترش یافت. هم اکنون خشک‌کن انجمادی بیشتر در ایالات متحده, کانادا, فرانسه, آلمان, ایتالیا, اسپانیا, روسیه و آمریکای

لاتین ساخته می‌شود. مهمترین و قدیمی ترین شرکتهای تولید کننده خشک‌کن انجمادی VirTis و Telstar هستند.

در سال ۱۹۶۸ به‌صورت رسمی اولین بار موضوع خشک‌کن انجمادی توسط Thomas A. Jennings معرفی شد. به‌طوریکه او در ژوین ۱۹۷۸ مقاله ها و نوشته های خود را در اولین سمینار فرایند خشک‌کن انجمادی ارایه داد. هر ساله برای شناسایی توسعه این صنعت سمینارها و کنفرانسهایی برقرار می‌شود. همچنین هر ماه یک شماره از مجله INSIGHT توسط Thomas A. Jennings را که شامل پیشرفت در زمینه خشک‌کن انجمادی می‌باشد, منتشر می‌شود.

در سالهای اخیر بررسی پیشرفتهای حاصل در زمینه خشک‌کن انجمادی سازماندهی شده است. به‌دلیل گستردگی کاربرد انواع خشک‌کن انجمادی در صنایع مختلف وضعیتی مناسبی برای انجام پژوهشهای مختلف در زمینه‌های مختلف فعالیتهای تجربی، مدلسازی، شبیه‌سازی، بهبود و اصلاح فرآیند برای کاهش زمان خشک‌شدن همراه با حفظ کیفیت محصول و کاهش هزینه‌های عملیاتی وجود دارد. نتایج این مطالعات علاوه بر کنفرانسهای بین‌المللی عمومی خشک‌کنها در کنفرانسهای بین‌المللی تخصصی ارایه می‌شود. به‌طوریکه هر ساله در یکی از کشورهایی که در زمینه خشک‌کن انجمادی فعالیت می‌کنند, سمیناری توسط انجمن بین المللی خشک‌کن انجمادی برگزار می‌شود که گسترش و نوآوریهای ایجاد شده در این زمینه ارایه می‌شود.

این پایان‌نامه از هفت فصل تشکیل شده است. در فصل اول مطالعه جامعی بر مفاهیم اولیه, شناخت, مکانیسم و کاربرد خشک‌کن انجمادی انجام شده است. در فصل دوم مدل‌های خشک‌کن انجمادی مورد بررسی قرار گرفته شدند. در فصل سوم برای خشک‌کن انجمادی بررسی تحلیلی انجام شده است. به‌این‌ترتیب که در ابتدا برای مقایسه دفع رطوبت پیوندی در شرایط عملیاتی مختلف برای اشکال هندسی مختلف, مدلسازی انجام شده است تا اهمیت شکل هندسی و نوع شرایط عملیاتی مشخص شود. همچنین مدلسازی در شرایط پایا انجام شده است تا با توجه به عوامل موثر در سرعت خشک‌شدن تاثیر شکل هندسی بر زمان خشک‌شدن مقایسه شود. در ادامه با مدلسازی در محیط خشک‌کن پارامترهای کلیدی در طراحی خشک‌کن و اثر شرایط

عملیاتی در طراحی برمبنای کاهش هزینه‌ها بررسی شده‌اند. در ادامه با انجام مدلسازی دقیقتر در حالت ناپایدار و توجه به پدیده های خاص, حل تحلیلی برای معادلات مدل, برای سه شکل هندسی در مرحله اولیه انجام شده است. در فصل چهارم برای یک سیستم استوانه‌ای مدلسازی انجام شده است که با بکاربردن تغییر متغییرهای خاصی, معادلات جدید با استفاده از روش کرانک نیکلسون گسسته شده و سپس برنامه انجام محاسبات با زبان Matlab نوشته شده است. در فصل پنجم نتایج محاسبات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در فصل ششم بر مبنای مطالعات انجام شده پیشنهاداتی برای کارهای آتی در این زمینه ارایه شده است.