مقدمه‌ای بر مهندسی فرآیندهای غذایی

پدیدآورنده

پ. ج. اسمیت

استاد صنایع غذایی دانشگاه لینکلن انگلستان

برگردانندگان

ناصر [illegible]

دانشیار صنایع غذایی دانشکده کشاورزی

دانشگاه صنعتی اصفهان

مولود نورانی

دانشجوی دکتری صنایع غذایی دانشکده کشاورزی

دانشگاه صنعتی اصفهان

علی فروهر

کارشناس ارشد صنایع غذایی دانشکده کشاورزی

سمیه بهفر

دانشجوی دکتری صنایع غذایی دانشکده کشاورزی

دانشگاه فردوسی مشهد

www.ketab.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

شماره کتاب ۱۴۹ گروه کشاورزی ۴۱

مقدمه‌ای بر مهندسی فرآیندهای غذایی

پدیدآورنده	پ. ج. اسمیت
برگردانندگان	ناصر همدمی، مولود نورانی، علی فروهر، سمیه بهفر
ویراستار علمی	جلال دهقانیان
ویراستار ادبی	محبوبه شمس
صفحه‌آرا	منا مرتضایی
طراح جلد	مرضیه خردمند
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ اول	زمستان ۱۳۹۵
شمارگان	۵۰۰ جلد
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۸۲۵۷-۱۲-۷
قیمت	۳۵۰۰۰۰ ریال

سرشناسه	: اسمیت، پیتر جی، ۱۹۴۰ - م. Smith, P. G. (Peter Geoffrey)
عنوان و نام پدیدآور	: مقدمه‌ای بر مهندسی فرآیندهای غذایی/ پدیدآورنده پ. ج. اسمیت؛ برگردانندگان ناصر همدمی... [و دیگران].
مشخصات نشر	: اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	: بیست و دو، ۶۶۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
فروست	: دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر؛ ۱۴۹. گروه کشاورزی؛ ۴۱.
شابک	: 978-600-8257-12-7
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Introduction to food process engineering ,2nd. ed, c2011.
یادداشت	: برگردانندگان ناصر همدمی، مولود نورانی، علی فروهر، سمیه بهفر
یادداشت	: کتاب حاضر در سال ۱۳۹۳ تحت عنوان «درآمدی بر مهندسی فرایندهای غذایی» با ترجمه محمدحسن ایکانی توسط انتشارات سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران فیپا گرفته است.
یادداشت	: واژه‌نامه.
عنوان دیگر	: درآمدی بر مهندسی فرایندهای غذایی.
موضوع	: مواد غذایی-- صنعت و تجارت Food industry and trade
شناسه افزوده	: همدمی، ناصر، ۱۳۵۰ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز انتشارات
رده بندی کنگره	: الف/۴د۵۴TP۳۷۰ ۱۳۹۵
رده بندی دیویی	: ۶۶۴
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۶۱۸۰۵۸

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - مرکز نشر - کدپستی: ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ تلفن: ۱۰-۳۳۹۱۲۵۰۹ (۰۳۱) دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۵۲ برای خرید اینترنتی کلیه کتاب‌های منتشره مرکز نشر می‌توانید به وبگاه http://publication.iut.ac.ir مراجعه و یا مستقیما از کتابفروشی مرکز نشر واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمائید.

www.ketab.ir

پیشگفتار ویرایش اول

در حال حاضر در دانشگاه‌های بریتانیا و دیگر نقاط دنیا دوره‌های تحصیلی زیادی در مقطع کارشناسی مرتبط با مواد غذایی ارایه می‌شود که به طور ویژه در زمینه فناوری و مهندسی مواد غذایی هستند و یا اینکه دارای بخش مهمی در این ارتباط می‌باشند. کتاب پیش رو، کتاب جدیدی در زمینه مهندسی فرایند مواد غذایی است که به شکل ساده و در عین حال از نظر علمی بسیار دقیق به اصول فناوری می‌پردازد و می‌تواند هدایت‌کننده (مقدمه‌ای، سرآغازی) به متون تخصصی‌تر برای مطالعه‌های پیشرفته‌تر باشد. این کتاب می‌تواند توسط دانشجویانی که لزوماً پیش‌زمینه علمی بالایی ندارند نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مطالب کتاب برای افراد مرتبط با صنعت غذا که تمایل به فهم بیشتر اصول فرآیندهایی که با آنها کار می‌کنند، دارند، مناسب است. مهندسی فرآیند مواد غذایی یک علم کمی می‌باشد و مطالب این کتاب نیز از دیدگاه کمی و ریاضی نوشته شده‌اند، نه اینکه فقط به طور ساده به توصیف فرآوری مواد غذایی پرداخته شود. هدف از این کار، این است که به خوانندگان این اطمینان داده شود که توانایی استفاده از تجزیه و تحلیل‌های ریاضی برای فرآیندهای غذایی را دارند. نکته مهم‌تر اینکه تعداد زیادی مسائل و مثال‌های کاربردی همراه با حل آنها آورده شده است. ریاضیات لازم برای خواندن و استفاده از این کتاب، محدود به حساب دیفرانسیل و انتگرال مقدماتی و ساده‌ترین نوع معادله دیفرانسیل است. این کتاب، حاصل ۱۵ سال تجربه تدریس فناوری و مهندسی مواد غذایی به دانشجویان مقاطع مختلف (دیپلم، کارشناسی و کارشناسی ارشد) می‌باشد. از جمله دلایل طرح‌ریزی این کتاب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تأکید بر اهمیت ترمودینامیک و انتقال حرارت به‌عنوان عنصرهای کلیدی در فرآوری مواد غذایی
- تأکید بر شباهت انتقال گرما، جرم و تکانه (مومنتوم) و فراهم کردن امکان دسترسی ساده به اصول این مفاهیم اساسی
- توسعه تئوری انتقال جرم که در مطالعه‌های فرآوری مواد غذایی، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است و به روشی که صحیح و به‌آسانی قابل اجرا باشد، بسیار کم درک شده است.

www.ketab.ir

- وارد کردن استفاده از غشا در این فهرست و بنابراین گسترش فهرست متداول عملیات واحدی که در کتاب‌های درسی دانشجویان کارشناسی مورد بحث قرار می‌گیرد.
- معرفی تیمار مناسب برای مشخصه‌یابی مواد جامد غذا و فرآوری و مدیریت آنها.

فصول ۱ و ۲، با تعریف اهداف مهندسی فرآیند، تشریح رویکرد ریاضی و تحلیلی برای طراحی و بهره‌برداری از فرآیندها و مقرر کردن استفاده از واحدهای SI، پس‌زمینه‌ای را به منظور مطالعه کمی فرآوری مواد غذایی ایجاد می‌کنند. بیشتر مواردی که در کتاب مورد توجه قرار گرفته‌اند، با فهم کامل سیستم SI، ساده‌تر می‌شوند. مفاهیم مهم ترمودینامیکی در فصل ۳ معرفی شده‌اند و این فصل، در واقع زیربنای بخش‌های موازنه انرژی و انتقال حرارت و بنابراین، رکن اصلی فرآوری مواد غذایی است. فصل ۴، در رابطه با موازنه جرم و انرژی می‌باشد و بر روش‌های مورد نیاز برای حل مسائل متمرکز شده است. بیشتر حجم این بخش را مثال‌های عددی گرفته‌شده از طیف گسترده‌ای از عملیات، به خود اختصاص داده است.

در فصل ۵، مفاهیم انتقال حرارت، جرم و تکانه (مومنتوم) معرفی شده است و شباهت انتقال حرارت، جرم و تکانه (مومنتوم) مورد تأکید قرار می‌گیرد. این فصل، مقدمه‌ای برای سه فصل بعدی است که در نخستین فصل، جریان سیال‌های غذایی بیان می‌شود و اهمیت جریان خطی در فرآوری مواد غذایی مورد تأکید قرار می‌گیرد. همچنین در این فصل با این هدف که خوانندگان قادر به استفاده از مدل‌های رئولوژیکی برای داده‌های آزمایشگاهی شوند و اهمیت این مدل‌ها را در شرایط مکانیکی و ساختاری دریابند، به رئولوژی مواد غذایی پرداخته می‌شود. در فصل بعدی، انتقال حرارت که قلب بسیاری از عملیات فرآوری مواد غذایی است، بیان می‌شود و اصول اساسی آن با جزییات مورد بررسی قرار می‌گیرد و با مثال‌های کاربردی زیادی نشان داده می‌شود. فصل بعد، مربوط به انتقال جرم است که بیشتر به‌عنوان یک موضوع دشوار شناخته می‌شود. در بیشتر متون مربوط به مواد غذایی، انتقال جرم، بسیار ناچیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و از این رو، از نظریه انتقال جرم در تجزیه و تحلیل فرآیندهای غذایی، کمتر استفاده شده است. فصل ۸، برای جبران این مسأله در نظر گرفته شده است و روش استفاده از انتقال جرم، در فصل ۹، جایی که اصول رطوبت‌سنجی توضیح داده می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

عملیات نگهداری اصلی در فصول ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بررسی می‌شوند. فصل ۱۰، در رابطه با استریلیزه کردن تجاری مواد غذایی است و در آن، اصول مدل‌های عمومی و ریاضی آورده شده است و بر توضیح روشنی از روش‌های محاسبات تأکید می‌شود. نگهداری در دمای پایین موضوع فصل بعدی می‌باشد که در آن به اصول چرخه تبرید، تبخیر و خشک کردن پرداخته می‌شود. فرآوری مواد غذایی ذره‌ای، بیشتر نادیده گرفته می‌شود و فصل ۱۳، تلاشی برای

www.ketab.ir

جبران این کاستی است. در این فصل، مشخصه‌یابی ذره‌های مجزا مورد توجه قرار گرفته، روابط مربوط به فعل و انفعالات ذره-سیال توسعه داده شده است و شناورسازی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ زیرا شناورسازی، یک روش فرآوری اساسی با کاربرد گسترده در بسیاری از عملیات واحد است. در انتها، در فصل ۱۴، به فرآیندهای مخلوط کردن و جداسازی فیزیکی که شامل قسمت مهم جداسازی با استفاده از فراپالایش و اسمز معکوس است، پرداخته می‌شود.

www.ketab.ir

پیشگفتار ویرایش دوم

در ویرایش دوم، دوم فصل به کتاب اضافه شده است. در فصل ۱۵، به برخی از عملیات انتقال جرم که در صنایع غذایی استفاده می‌شوند، ولی همیشه به‌عنوان فرآیندهای غذایی اصلی مورد توجه قرار نمی‌گیرند پرداخته می‌شود. این عملیات عبارت‌اند از: تقطیر (شامل عملیات مداوم و غیرمداوم)، تراوش (با استخراج جامد-مایع) و استخراج با سیال فوق بحرانی که فرآیندی با اهمیت فراوان و روزافزون در صنعت غذاست. در مورد تقطیر و تراوش، طرح کلی تئوری مربوط به آن، همراه با مثال‌های کاربردی مشروح به منظور توضیح روش‌های گرافیکی معمولی که برای تعیین تعداد مراحل ایده‌آل یا تعادل استفاده می‌شوند، آورده می‌شود.

رشد تقاضا برای مواد غذایی ایمن‌تر و با کیفیت بهتر سبب پژوهش روی روش‌هایی که به همگی آنها فناوری فرآوری حداقلی گفته می‌شود، شده است. اصول برخی از این روش‌ها در فصل ۱۶ شرح داده می‌شود و شامل حرارت‌دهی اهمیک، حرارت‌دهی با میدان الکتریکی پالسی (PEF)، حرارت‌دهی با فرکانس رادیویی (RF)، فرآوری با فشار بالا، پرتوتابی و اولتراسونیک است. محتوای تعدادی از فصول، به‌روز و یا اصلاح شده است. روش‌های اندازه‌گیری دما، به‌ویژه جزییات انواع مختلف ترموکوپل‌های مورد استفاده، به فصل ۷ اضافه شده است. بخش جدیدی در رابطه با کاربرد انتقال جرم در بسته‌بندی مواد غذایی به فصل ۸ افزوده شده و اطلاعات مربوط به نفوذپذیری فیلم‌های بسته‌بندی نیز ارایه شده است. قسمت مربوط به خشک‌کن انجمادی (فصل ۱۲) به طور قابل توجهی افزایش یافته و استفاده از مدل‌های انتقال جرم و حرارت در پیش‌بینی زمان خشک کردن، به آن اضافه شده است. بخش مربوط به شناورسازی در فصل ۱۳ بازنویسی شده و اطلاعات بیشتری در رابطه با تخمین ضرایب انتقال جرم و حرارت در بسترهای شناور مورد استفاده در فرآیندهای غذایی ارایه شده است. افزون بر این تغییرها، فرصتی به دست آمد تا تمامی مثال‌های کاربردی و مسائل کتاب مرور شوند و تعدادی از خطاهای ویرایش نخست، اصلاح شوند. لیست منابع برای مطالعه بیشتر در پایان هر فصل در صورت لزوم، به‌روز شده است.

www.ketab.ir

پیشگفتار برگردانندگان

یکی از نیازهای اصلی بشر، نیاز به غذاست. با گذشت زمان و افزایش جمعیت، حجم تولید و تقاضا برای مواد غذایی افزایش یافته است و با توجه به مباحثی همچون مدیریت انرژی و سرمایه، راهی جز تولید اصولی و علمی مواد غذایی، پیش روی جوامع نیست. در همین راستا تولید محصول‌های جدید و بازسازی فرآیند محصول‌های قدیمی‌تر به روش آزمون و خطا جایگاهی ندارد و باید با استفاده از کوتاه‌ترین، مطمئن‌ترین و اصولی‌ترین روش، این هدف محقق شود. در اینجا توجه به اصول تولید از یک‌سو و انجام محاسبه‌ها و تجزیه و تحلیل فرآیندها از سوی دیگر به صورت هم‌گام، کارگشاست. کتاب حاضر با استفاده از اصول پایه‌ای ترمودینامیک، تعادل، طراحی و تجزیه و تحلیل سیستم‌ها، نخست خواننده را با مقدمات ضروری در این زمینه آشنا می‌کند و سپس با بیان پیش‌بینی تولید و طراحی تجهیزات، به محاسبات مربوط به انرژی همچون انتقال انرژی در فرآیندهای حرارتی و انجماد می‌پردازد. از سوی دیگر، توجه به انتقال جرم و بررسی اصول فنی و ریاضی روش‌های فرآوری مواد غذایی مانند خشک کردن، سرمایش، اختلاط، رطوبت‌سنجی و ... مواد غذایی می‌تواند نیاز صنعت غذا و همچنین نیاز دانشجویان صنایع غذایی را در دروس تخصصی و محاسباتی خود برطرف کند. به طور کلی می‌توان گفت که این کتاب به فناوری تولید مواد غذایی از جنبه مهندسی فرآیند تولید، نگاهی جامع و در عین حال، به دور از برخی پیچیدگی‌ها داشته است و بنابراین می‌تواند پاسخی به چالش‌های پیش روی مهندسان صنعت غذا در راستای علمی‌سازی طراحی و تولید محصول‌های جدید باشد.

در پایان لازم می‌دانیم از تلاش‌های اعضای محترم مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان که در جایگزینی واژه‌ها و تسهیل به نتیجه رساندن این امر، اهتمام زیادی داشتند، قدردانی کنیم و توفیقات روزافزون را برای ریاست محترم این بخش و سایر همکارانشان مسئلت نماییم.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱: مقدمه‌ای بر مهندسی صنایع غذایی ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۲: ابعاد، کمیت‌ها و آحاد ۵

۲-۱ ابعاد و آحاد ۵

۲-۲ تعاریف برخی کمیت‌های دینامیکی اصلی ۷

۲-۲-۱ سرعت و اندازه سرعت ۷

۲-۲-۲ شتاب ۸

۲-۲-۳ نیرو و اندازه حرکت ۸

۲-۲-۴ وزن ۹

۲-۲-۵ فشار ۱۰

۲-۲-۶ کار و انرژی ۱۱

۲-۲-۷ توان ۱۲

۲-۳ تجزیه و تحلیل ابعادی ۱۳

۲-۳-۱ سازگاری ابعادی ۱۳

۲-۳-۲ تحلیل ابعادی ۱۴

مسائل ۱۵

۳: ترمودینامیک و تعادل ۱۷

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۱-۱ دما و قانون صفرم ترمودینامیک ۱۸

۳-۱-۲ مقیاس دما ۱۹

۳-۱-۳ گرما، کار و آنتالپی ۲۱

۳-۱-۴ تعاریف دیگر ۲۲

۳-۲ فاز گازی ۲۲

www.ketab.ir

۳-۲-۱ تئوری سینتیک گازها ۲۲
۳-۲-۲ گازهای کامل ۲۳
۳-۲-۳ فشار بخار ترکیب خالص ۲۷
۳-۲-۴ فشار جزیی و حجم ترکیب خالص ۲۹
۳-۳ تغییر فاز مایع-بخار ۳۲
۳-۳-۱ تبخیر و میعان ۳۲
۳-۳-۲ هم‌دما و دماهای بحرانی ۳۴
۳-۳-۳ تعریف گاز و بخار ۳۵
۳-۳-۴ تعادل مایع-بخار ۳۶
۳-۴ قانون اول ترمودینامیک ۴۱
۳-۵ ظرفیت گرمایی ۴۳
۳-۵-۱ ظرفیت گرمایی در حجم ثابت ۴۴
۳-۵-۲ ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ۴۵
۳-۵-۳ ارتباط بین ظرفیت گرمایی برای یک گاز کامل ۴۷
۳-۵-۴ ارتباط بین فشار، حجم و دما در گازها ۴۷
۳-۶ قانون دوم ترمودینامیک ۴۹
۳-۶-۱ پمپ حرارتی و سرمایش ۵۰
۳-۶-۲ پیامدهای قانون دوم ۵۱
مسائل ۵۲
منابع مورد استفاده ۵۴

۴: موازنه جرم و انرژی ۵۵
۴-۱ تجزیه و تحلیل فرآیند ۵۶
۴-۲ موازنه جرم ۵۶
۴-۲-۱ موازنه جرم کلی ۵۷
۴-۲-۲ غلظت و ترکیب ۵۷
۴-۲-۳ موازنه جرم ترکیب‌ها ۶۰
۴-۲-۴ جریان برگشتی و جریان جانبی ۶۳
۴-۳ معادله انرژی در جریان پایا ۶۶
۴-۴ اطلاعات ترموشیمیایی ۶۸

www.ketab.ir

۴-۴-۱ ظرفیت گرمایی ۶۸
۴-۴-۲ گرمای نهان تبخیر ۷۷
۴-۴-۳ گرمای نهان ذوب ۷۷
۴-۴-۴ جداول بخار ۷۷
۴-۵ موازنه انرژی ۸۰
مسائل ۸۵
منابع مورد استفاده ۸۷

۵: اصول فرآیندهای سرعتی ۸۹

۵-۱ مقدمه ۸۹
۵-۲ انتقال حرارت ۹۰
۵-۳ انتقال مومنتوم ۹۱
۵-۴ انتقال جرم ۹۲
۵-۵ ویژگی‌های انتقال ۹۲
۵-۵-۱ هدایت حرارتی ۹۲
۵-۵-۲ ویسکوزیته ۹۳
۵-۵-۳ ضریب انتشار ۹۳
۵-۶ شباهت بین انتقال حرارت، جرم و مومنتوم ۹۴
منابع مورد استفاده ۹۶

۶: جریان سیال‌های غذایی ۹۷

۶-۱ مقدمه ۹۸
۶-۲ اصول اساسی ۹۸
۶-۲-۱ سرعت و مقدار جریان ۹۸
۶-۲-۲ آزمایش رینولدز ۹۹
۶-۲-۳ اصل پیوستگی ۱۰۳
۶-۲-۴ بقای انرژی ۱۰۴
۶-۳ جریان خطی در یک خط لوله ۱۰۷
۶-۴ جریان آشفته در یک خط لوله ۱۰۹
۶-۵ اندازه‌گیری فشار و سیال ۱۱۳
۶-۵-۱ مانومتر ۱۱۳

www.ketab.ir

۶-۵-۲ اوریفیس‌متر ۱۱۵
۶-۵-۳ ونتوری‌متر ۱۱۸
۶-۶ پمپ کردن مایع‌ها ۱۱۹
۶-۶-۱ پمپ سانتریفیوژی ۱۲۲
۶-۶-۲ پمپ‌های جابه‌جایی مثبت ۱۲۴
۶-۶-۳ ارتفاع مکش مثبت خالص ۱۲۵
۶-۶-۴ طراحی بهداشتی ۱۲۵
۶-۷ جریان غیرنیوتنی ۱۲۶
۶-۷-۱ مقدمه ۱۲۶
۶-۷-۲ تنش، کرنش و جریان ۱۲۶
۶-۸ مدل‌های رئولوژیکی مستقل از زمان ۱۲۹
۶-۸-۱ جامدهای ویسکوز ۱۲۹
۶-۸-۲ سیال‌های نیوتنی ۱۲۹
۶-۸-۳ سیال‌های بینگهام ۱۳۰
۶-۸-۴ قانون توان ۱۳۲
۶-۸-۵ جریان خطی سیال‌های قانون توان ۱۳۶
۶-۸-۶ سایر مدل‌های مستقل از زمان ۱۳۹
۶-۹ مدل‌های رئولوژیکی وابسته به زمان ۱۴۰
۶-۱۰ ویسکوالاستیسیته ۱۴۲
۶-۱۰-۱ مقدمه ۱۴۲
۶-۱۰-۲ ساختارهای مکانیکی توصیفی رئولوژی ۱۴۳
۶-۱۱ اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی ۱۴۸
۶-۱۱-۱ اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیک ۱۴۸
۶-۱۱-۲ اندازه‌گیری رئولوژیکی برای سیال‌های غیرنیوتنی ۱۴۹
مسائل ۱۵۳
منابع مورد استفاده ۱۵۶

۷: انتقال حرارت در مواد غذایی ۱۵۷

۷-۱ مقدمه ۱۵۹
۷-۲ هدایت ۱۵۹

www.ketab.ir

۷-۲-۱ هدایت پایا در یک تیغه یکنواخت ۱۵۹
۷-۲-۲ هدایت در یک دیوار (تیغه) مرکب ۱۶۳
۷-۲-۳ هدایت شعاعی ۱۶۵
۷-۲-۴ هدایت در یک استوانه مرکب ۱۶۸
۷-۲-۵ انتقال حرارت با هدایت از یک پوسته کروی ۱۷۰
۷-۳ جابه‌جایی (همرفت) ۱۷۱
۷-۳-۱ ضریب انتقال حرارت فیلم ۱۷۱
۷-۳-۲ هدایت و همرفت همزمان ۱۷۳
۷-۳-۳ همرفت شعاعی ۱۷۵
۷-۳-۴ ضخامت بحرانی عایق ۱۷۷
۷-۳-۵ روابط برای ضرایب انتقال حرارت فیلم ۱۷۸
۷-۳-۶ ضریب انتقال حرارت کل ۱۸۱
۷-۴ مبدل‌های حرارتی ۱۸۵
۷-۴-۱ انواع مبدل‌های حرارتی صنعتی ۱۸۵
۷-۴-۲ محاسبه‌های اندازه مبدل‌های حرارتی ۱۸۸
۷-۵ جوشاندن و میعان ۱۹۹
۷-۵-۱ انتقال حرارت طی جوشیدن ۱۹۹
۷-۵-۲ میعان ۲۰۳
۷-۶ انتقال حرارت به سیال‌های غیرنیوتنی ۲۰۵
۷-۷ اصول تابش ۲۰۸
۷-۷-۱ جذب، انعکاس و عبور ۲۰۹
۷-۷-۲ تابش جسم سیاه ۲۱۱
۷-۷-۳ قابلیت انتشار (گسیلندگی) و سطوح واقعی ۲۱۳
۷-۷-۴ انتقال حرارت تابشی ۲۱۴
۷-۷-۵ عوامل نمایش ۲۱۶
۷-۸ حرارت‌دهی مواد غذایی با امواج مایکروویو ۲۱۸
۷-۸-۱ امواج مایکروویو ۲۱۸
۷-۸-۲ تولید امواج مایکروویو ۲۱۹
۷-۸-۳ تبدیل انرژی و سرعت حرارت‌دهی ۲۲۰
۷-۸-۴ آون مایکروویو و طرح صنعتی ۲۲۲

www.ketab.ir

۷-۸-۵ مزایا و کاربردهای حرارت‌دهی با مایکروویو ۲۲۴
۷-۹ اندازه‌گیری دما ۲۲۵
۷-۹-۱ اصول اندازه‌گیری دما ۲۲۵
۷-۹-۲ دماسنج‌های انبساطی ۲۲۶
۷-۹-۳ روش‌های الکتریکی ۲۲۷
۷-۹-۴ آذرسنجی تابشی ۲۳۰
مسائل ۲۳۱
منابع مورد استفاده ۲۳۶
۸: انتقال جرم ۲۳۷
۸-۱ مقدمه ۲۳۸
۸-۲ انتشار مولکولی ۲۴۰
۸-۲-۱ قانون فیک ۲۴۰
۸-۲-۲ ضریب انتشار ۲۴۰
۸-۲-۳ غلظت ۲۴۲
۸-۳ انتقال جرم همرفتی ۲۴۳
۸-۳-۱ تئوری وایتمن ۲۴۴
۸-۳-۲ ضرایب انتقال جرم فیلم ۲۴۵
۸-۳-۳ ضرایب انتقال جرم کل ۲۴۷
۸-۳-۴ جمع کردن ضرایب انتقال جرم فیلم ۲۴۸
۸-۳-۵ مقاومت به انتقال جرم در فرآوری غذا ۲۵۰
۸-۳-۶ تأثیر حلالیت بر ضرایب انتقال جرم ۲۵۱
۸-۳-۷ واحدهای مختلف برای ضرایب انتقال جرم ۲۵۲
۸-۳-۸ واحدهای ثابت هنری ۲۵۴
۸-۴ انتشار دو جزیی ۲۵۵
۸-۴-۱ معادله کلی انتشار ۲۵۵
۸-۴-۲ صورت‌های دیگر معادله کلی انتشار ۲۵۶
۸-۴-۳ انتشار از یک فیلم گازی ایستا ۲۵۶
۸-۴-۴ ذره‌ها، قطره‌ها و حباب‌ها ۲۶۰
۸-۵ روابط برای ضرایب انتقال جرم ۲۶۳

www.ketab.ir

۸-۶ انتقال جرم و بسته‌بندی مواد غذایی ۲۶۶
مسائل ۲۶۸
منابع مورد استفاده ۲۶۹

۹: رطوبت‌سنجی ۲۷۱

۹-۱ مقدمه ۲۷۱
۹-۲ تعریف برخی کمیت‌های اساسی ۲۷۲
۹-۲-۱ رطوبت مطلق ۲۷۲
۹-۲-۲ رطوبت اشباع ۲۷۳
۹-۲-۳ دمای اشباعیت ۲۷۳
۹-۲-۴ رطوبت نسبی ۲۷۳
۹-۲-۵ رابطه میان دمای اشباعیت و رطوبت نسبی ۲۷۴
۹-۲-۶ گرمای مرطوب ۲۷۴
۹-۲-۷ حجم مرطوب ۲۷۵
۹-۲-۸ نقطه شبنم ۲۷۵
۹-۳ دمای حباب خشک و مرطوب ۲۷۵
۹-۳-۱ تعاریف ۲۷۵
۹-۳-۲ معادله حباب مرطوب ۲۷۶
۹-۳-۳ دمای اشباع آدیاباتیک ۲۷۷
۹-۳-۴ رابطه میان دمای حباب مرطوب و دمای اشباع آدیاباتیک ۲۷۸
۹-۴ نمودار رطوبت‌سنجی ۲۷۸
۹-۴-۱ اصول ۲۷۸
۹-۴-۲ اختلاط جریان‌های هوای مرطوب ۲۸۲
۹-۵ کاربرد رطوبت‌سنجی در خشک کردن ۲۸۳
مسائل ۲۸۵

۱۰: فرآیند حرارتی مواد غذایی ۲۸۷

۱۰-۱ انتقال حرارت در شرایط ناپایا ۲۸۸
۱۰-۱-۱ مقدمه ۲۸۸
۱۰-۱-۲ عدد بیوت ۲۸۹
۱۰-۱-۳ تجزیه و تحلیل فشرده ۲۹۰

www.ketab.ir

۱۰-۲ هدایت در شرایط ناپایا ۲۹۱
۱۰-۲-۱ قانون اولیه فوریه برای هدایت ۲۹۱
۱۰-۲-۲ هدایت در صفحه تخت ۲۹۲
۱۰-۲-۳ عدد فوریه ۲۹۵
۱۰-۲-۴ نمودارهای گارنی-لوری ۲۹۵
۱۰-۲-۵ نمودارهای هایسلر ۳۰۰
۱۰-۳ روش‌های نگهداری مواد غذایی با استفاده از حرارت ۳۰۰
۱۰-۳-۱ مقدمه‌ای بر فرآیند حرارتی ۳۰۰
۱۰-۳-۲ پاستوریزاسیون ۳۰۲
۱۰-۳-۳ استریلیزاسیون تجاری ۳۰۴
۱۰-۴ سینتیک رشد میکروبی ۳۰۵
۱۰-۴-۱ زمان [illegible] و ثابت مقاومت حرارتی ۳۰۵
۱۰-۴-۲ کشندگی [illegible] ۳۰۸
۱۰-۴-۳ احتمال فساد ۳۱۰
۱۰-۵ روش عمومی ۳۱۱
۱۰-۶ روش ریاضی ۳۱۵
۱۰-۶-۱ مقدمه ۳۱۵
۱۰-۶-۲ روش تعیین زمان کل فرآیند ۳۱۶
۱۰-۶-۳ انتقال حرارت در فرآیند حرارتی ۳۲۰
۱۰-۶-۴ مقدار F کل فرآیند ۳۲۳
۱۰-۷ اتوکلاو برای فرآیند حرارتی ۳۲۵
۱۰-۷-۱ اتوکلاوهای غیرمداوم ۳۲۵
۱۰-۷-۲ طراحی‌های گوناگون ۳۲۶
۱۰-۷-۳ اتوکلاوهای پیوسته ۳۲۷
۱۰-۸ استریلیزاسیون جریان مداوم و پیوسته ۳۲۸
۱۰-۸-۱ اصول فرآیند UHT ۳۲۸
۱۰-۸-۲ تشریح فرآیند ۳۲۸
مسائل ۳۳۱
منابع مورد استفاده ۳۳۴

www.ketab.ir

۱۱: نگهداری در دمای پایین ۳۳۵
۱۱-۱ اصول نگهداری در دمای پایین ۳۳۶
۱۱-۲ سرعت انجماد و نقطه انجماد ۳۳۷
۱۱-۳ حالت منجمد ۳۴۱
۱۱-۳-۱ ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی منجمد ۳۴۱
۱۱-۳-۲ کیفیت مواد غذایی در حین نگهداری منجمد ۳۴۴
۱۱-۴ تجهیزات انجماد ۳۴۵
۱۱-۴-۱ فریزر صفحه‌ای ۳۴۵
۱۱-۴-۲ فریزر دمشی ۳۴۶
۱۱-۴-۳ فریزر بستر سیال ۳۴۷
۱۱-۴-۴ فریزرهای سطح تراش ۳۴۸
۱۱-۴-۵ فریزرهای تماس و فوق سریع ۳۴۸
۱۱-۵ پیش‌بینی زمان انجماد ۳۵۰
۱۱-۵-۱ معادله پلانک ۳۵۰
۱۱-۵-۲ معادله ناگاکا ۳۵۴
۱۱-۵-۳ مدل استفان ۳۵۵
۱۱-۵-۴ معادله پلانک برای اجسام مکعبی ۳۵۶
۱۱-۶ رفع انجماد ۳۵۸
۱۱-۷ اصول تولید سرما در یخچال ۳۶۰
۱۱-۷-۱ مقدمه ۳۶۰
۱۱-۷-۲ مایع مبرد ۳۶۱
۱۱-۷-۳ اواپراتور ۳۶۲
۱۱-۷-۴ کمپرسور ۳۶۲
۱۱-۷-۵ کندانسور ۳۶۲
۱۱-۷-۶ شیر انبساط یا نازل ۳۶۲
۱۱-۷-۷ چرخه تبرید ۳۶۳
مسائل ۳۶۵
منابع مورد استفاده ۳۶۶
۱۲: تبخیر و خشک کردن ۳۶۷

www.ketab.ir

۱۲-۱ مقدمه‌ای بر تبخیر ۳۶۸
۱۲-۲ تجهیزات تبخیر ۳۶۹
۱۲-۲-۱ تبخیرکننده‌های با گردش طبیعی ۳۶۹
۱۲-۲-۲ تبخیرکننده‌های با گردش اجباری ۳۷۱
۱۲-۲-۳ تبخیرکننده‌های لایه نازک ۳۷۱
۱۲-۳ تعیین اندازه یک تبخیرکننده تک مرحله‌ای ۳۷۳
۱۲-۳-۱ موازنه جرم و انرژی ۳۷۳
۱۲-۳-۲ بازده تبخیرکننده ۳۷۶
۱۲-۳-۳ افزایش نقطه جوش ۳۷۸
۱۲-۴ روش‌های بهبود بازده تبخیرکننده ۳۷۹
۱۲-۴-۱ تراکم‌سازی دوباره بخار ۳۷۹
۱۲-۴-۲ تبخیر چند مرحله‌ای ۳۸۱
۱۲-۴-۳ مثالی از تبخیر چند مرحله‌ای: تغلیظ آب گوجه فرنگی ۳۸۳
۱۲-۵ برآورد اندازه تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای ۳۸۴
۱۲-۶ خشک کردن ۳۸۸
۱۲-۶-۱ مقدمه ۳۸۸
۱۲-۶-۲ فعالیت آبی ۳۹۰
۱۲-۶-۳ اثر فعالیت آبی روی رشد میکروبی ۳۹۱
۱۲-۶-۴ مقدار رطوبت ۳۹۱
۱۲-۶-۵ هم‌دماها و تعادل ۳۹۲
۱۲-۷ خشک کردن غیرمداوم ۳۹۳
۱۲-۷-۱ سرعت خشک کردن ۳۹۳
۱۲-۷-۲ زمان خشک کردن غیرمداوم ۳۹۵
۱۲-۸ انواع خشک‌کن ۳۹۹
۱۲-۸-۱ عملیات غیرمداوم و مداوم ۳۹۹
۱۲-۸-۲ خشک‌کن‌های مستقیم و غیرمستقیم ۴۰۰
۱۲-۸-۳ گردش عرضی و گردش از میان ۴۰۰
۱۲-۸-۴ خشک‌کن سینی‌دار ۴۰۱
۱۲-۸-۵ خشک‌کن تونلی ۴۰۳
۱۲-۸-۶ خشک‌کن چرخان ۴۰۳

www.ketab.ir

۱۲-۸-۷ خشک‌کن بستر سیال ۴۰۳
۱۲-۸-۸ خشک‌کن استوانه‌ای ۴۰۳
۱۲-۸-۹ خشک‌کن پاششی ۴۰۴
۱۲-۹ خشک‌کن انجمادی ۴۰۵
۱۲-۹-۱ مراحل فرآیند خشک کردن انجمادی ۴۰۶
۱۲-۹-۲ پیش‌بینی زمان خشک کردن انجمادی ۴۰۷
مسائل ۴۱۲
منابع مورد استفاده ۴۱۴

۱۳: فرآوری جامدها - ساخت ذره‌ها ۴۱۵

۱۳-۱ ویژگی‌های مواد جامد ذره‌ای ۴۱۷
۱۳-۱-۱ توزیع اندازه ذرات ۴۱۷
۱۳-۱-۲ میانگین اندازه ذرات ۴۱۹
۱۳-۱-۳ شکل ذره ۴۲۲
۱۳-۱-۴ روش‌های تعیین اندازه ذره‌ها ۴۲۴
۱۳-۱-۵ توزیع جرمی ۴۲۶
۱۳-۱-۶ سایر ویژگی‌های ذره ۴۲۹
۱۳-۲ حرکت یک ذره در سیال ۴۳۰
۱۳-۲-۱ سرعت سقوط حد ۴۳۲
۱۳-۲-۲ ضریب کششی ذره ۴۳۴
۱۳-۲-۳ اثر افزایش عدد رینولدز ۴۳۵
۱۳-۳ بسترهای فشرده: رفتار ذره در توده ۴۴۰
۱۳-۴ شناورسازی ۴۴۳
۱۳-۴-۱ مقدمه ۴۴۳
۱۳-۴-۲ کمترین سرعت شناورسازی در شناورسازی متراکم ۴۴۵
۱۳-۴-۳ رفتار بستر شناور گاز-جامد ۴۵۲
۱۳-۴-۴ اختلاط حباب‌ها و ذره‌ها ۴۵۴
۱۳-۴-۵ انتقال جرم و حرارت در شناورسازی ۴۵۷
۱۳-۴-۶ کاربردهای شناورسازی در فرآوری مواد غذایی ۴۶۰
۱۳-۴-۷ بسترهای جهنده ۴۶۴

www.ketab.ir

۱۳-۴-۸ شناورسازی ذره‌ای ۴۶۵
۱۳-۵ جریان دو فازی: انتقال پنوماتیکی (با هوای فشرده) ۴۶۸
۱۳-۵-۱ مقدمه ۴۶۸
۱۳-۵-۲ سازوکار حرکت مواد ۴۶۸
۱۳-۵-۳ رژیم‌های انتقال پنوماتیکی ۴۶۹
۱۳-۵-۴ سیستم‌های انتقال پنوماتیکی ۴۷۰
۱۳-۵-۵ مسائل ایمنی ۴۷۱
۱۳-۶ فرآیند ساخت ذره‌های غذایی ۴۷۱
۱۳-۶-۱ طبقه‌بندی فرآیندهای ساخت ذره‌ها ۴۷۱
۱۳-۶-۲ پیوند ذره ۴۷۷
۱۳-۶-۳ گرانوله کردن با بستر شناور ۴۸۰
۱۳-۶-۴ روش‌های دیگر آگلومره کردن ذره‌ها ۴۸۲
۱۳-۷ کاهش اندازه ۴۸۴
۱۳-۷-۱ سازوکارها و ساختمان ۴۸۴
۱۳-۷-۲ دستگاه‌های کاهش اندازه ۴۸۵
۱۳-۷-۳ روش‌های عملیات ۴۸۷
۱۳-۷-۴ انرژی لازم برای کاهش اندازه ۴۸۸
مسائل ۴۹۳
منابع مورد استفاده ۴۹۶

۱۴: اختلاط و جداسازی ۴۹۷

۱۴-۱ اختلاط ۴۹۸
۱۴-۱-۱ تعاریف و هدف ۴۹۸
۱۴-۱-۲ آمیختگی ۴۹۹
۱۴-۱-۳ شاخص اختلاط و زمان اختلاط ۵۰۱
۱۴-۱-۴ اختلاط مواد مایع ۵۰۷
۱۴-۱-۵ مصرف توان در اختلاط مواد مایع ۵۱۱
۱۴-۱-۶ روابط مربوط به دانسیته و ویسکوزیته مخلوط‌ها ۵۱۵
۱۴-۱-۷ اختلاط جامدها ۵۱۷
۱۴-۱-۸ تجهیزات اختلاط جامدها ۵۱۸

www.ketab.ir

۱۴-۲ فیلتراسیون ۵۲۰
۱۴-۲-۱ مقدمه ۵۲۰
۱۴-۲-۲ تجزیه و تحلیل فیلتراسیون کیک ۵۲۲
۱۴-۲-۳ فیلتراسیون فشار ثابت ۵۲۴
۱۴-۲-۴ تجهیزات فیلتراسیون ۵۲۵
۱۴-۲-۵ کمک‌فیلترها ۵۲۹
۱۴-۳ جداسازی غشایی ۵۲۹
۱۴-۳-۱ مقدمه ۵۲۹
۱۴-۳-۲ اسمز و اسمز معکوس ۵۳۱
۱۴-۳-۳ معادله عمومی غشا ۵۳۲
۱۴-۳-۴ فشار اسمزی ۵۳۴
۱۴-۳-۵ فراپالایش ۵۳۵
۱۴-۳-۶ ویژگی‌ها و ساختار غشا ۵۳۶
۱۴-۳-۷ اشکال مختلف غشا ۵۳۸
۱۴-۳-۸ شار پرمئات ۵۳۹
۱۴-۳-۹ پیش‌بینی شار پرمئات ۵۴۱
۱۴-۳-۱۰ برخی از کاربردهای فناوری غشایی ۵۴۶
مسائل ۵۵۰
منابع مورد استفاده ۵۵۲

۱۵: عملیات انتقال جرم ۵۵۳

۱۵-۱ مقدمه‌ای بر تقطیر ۵۵۴
۱۵-۲ تقطیر غیرمداوم ۵۵۵
۱۵-۲-۱ رابطه تعادل خطی ۵۵۷
۱۵-۲-۲ فراریت نسبی ثابت ۵۵۸
۱۵-۳ مراحل ایده‌آل و تعادل ۵۵۹
۱۵-۴ جداسازی مداوم: روش مک‌کب-تایل ۵۶۲
۱۵-۴-۱ موازنه ماده و انرژی ۵۶۳
۱۵-۴-۲ تعیین خطوط عملیاتی ۵۶۴
۱۵-۴-۳ نسبت جریان برگشتی کمینه ۵۶۹

www.ketab.ir

۱۵-۵ تقطیر با بخار ۵۷۰
۱۵-۶ تراوش ۵۷۲
۱۵-۶-۱ مقدمه ۵۷۲
۱۵-۶-۲ توصیف فرآیند ۵۷۳
۱۵-۶-۳ انواع تجهیزات ۵۷۴
۱۵-۶-۴ تراوش غیرهم‌جهت: معرفی سیستم‌های سه جزیی ۵۷۷
۱۵-۶-۵ روش محاسبه تعداد مراحل ایده‌آل ۵۸۰
۱۵-۷ استخراج با سیال فوق بحرانی ۵۸۵
۱۵-۷-۱ مقدمه ۵۸۵
۱۵-۷-۲ حلالیت فوق بحرانی ۵۸۵
۱۵-۷-۳ توصیف فرآیند ۵۸۶
۱۵-۷-۴ مزایای استخراج با سیال فوق بحرانی ۵۸۷
۱۵-۷-۵ کاربردهای غذایی استخراج با سیال فوق بحرانی ۵۸۸
مسائل ۵۸۹
منابع مورد استفاده ۵۹۱

۱۶: فناوری فرآیندهای حداقلی ۵۹۳

۱۶-۱ مقدمه ۵۹۳
۱۶-۲ حرارت‌دهی اهمیک ۵۹۴
۱۶-۳ حرارت‌دهی با فرکانس‌های رادیویی ۵۹۸
۱۶-۴ حرارت‌دهی با میدان‌های الکتریکی متناوب ۵۹۹
۱۶-۵ فرآوری با استفاده از فشار بالا ۶۰۲
۱۶-۶ پرتوتابی به ماده غذایی ۶۰۶
۱۶-۷ امواج فراصوت ۶۰۹
منابع مورد استفاده ۶۱۱

پیوست‌ها ۶۱۳

پاسخ به مسائل ۶۲۷

واژه‌نامه ۶۳۳

www.ketab.ir