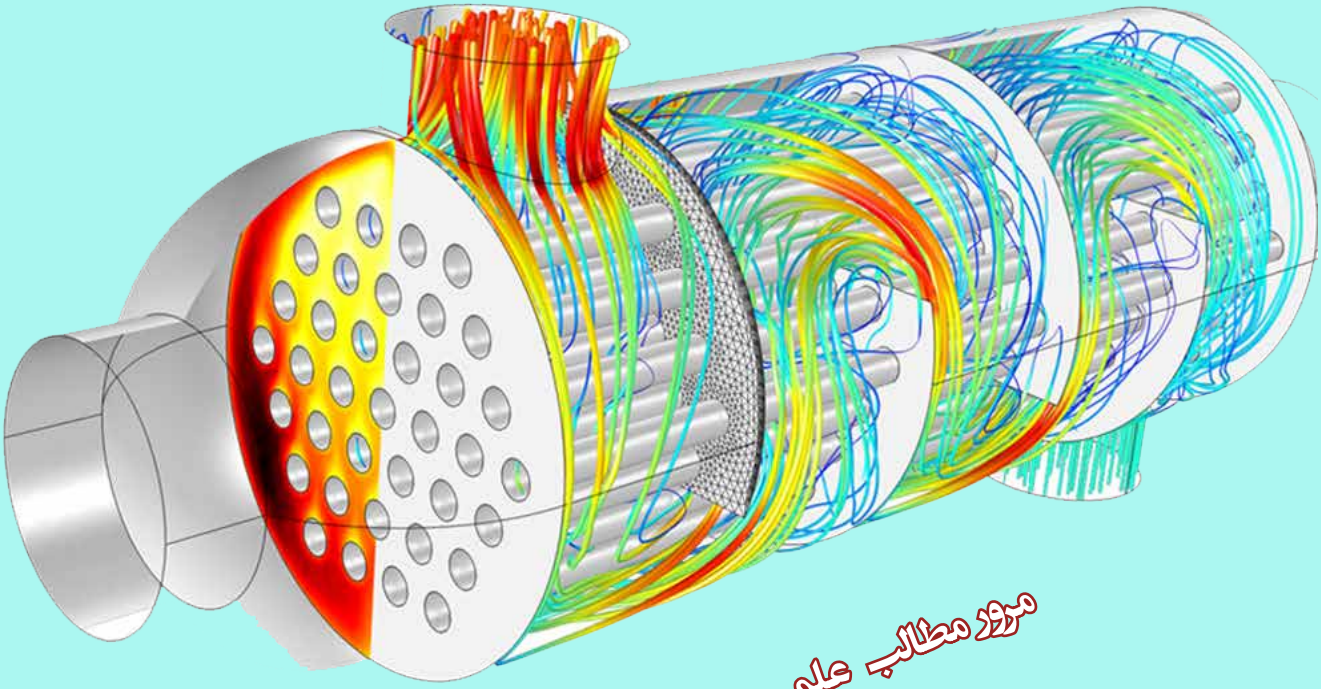


مرور مطالب علمی جدید

مبدل‌های حرارتی متداول برای گرمایش و سرمایش محصولات غذایی

عمار صالحی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

amar.salehi@ut.ac.ir

چکیده

مرسوم‌ترین فرآیندهای موجود در یک کارخانه فرآوری مواد غذایی، گرم کردن و سرد کردن مواد غذایی است. معمولا در صنایع غذایی مدرن و صنعتی، عملیات‌های واحد[1] نظیر سردسازی (تبرید)[2]، انجماد، ضد عفونی (استریلیزه) حرارتی[3]، خشک کردن[4] و تبخیر وجود دارد. این عملیات‌های واحد، باعث ایجاد انتقال حرارت بین یک محصول و محیط کشت[5] گرمایشی و سرمایشی می‌گردد. گرمایش و سرمایش مواد غذایی برای جلوگیری از فساد میکروبی و آنزیمی ضروری است. علاوه بر این، زمانی که مواد غذایی تحت گرمایش یا سرمایش قرار داده می‌شوند، به آن‌ها خواص حسی دلخواه رنگ، طعم و بافت منتقل می‌گردد. مطالعه و بررسی فرآیند انتقال حرارت از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا پایه و اساسی برای درک نحوه‌ی کارکرد فرآیندهای غذایی مختلف ارائه می‌کند.

انواع گسترده و مختلفی از تجهیزات انتقال حرارت برای کاربردهای غذایی[6] وجود دارد. در این بخش، برخی از مبدل‌های حرارتی متداول در صنایع مواد غذایی را بررسی خواهیم کرد.

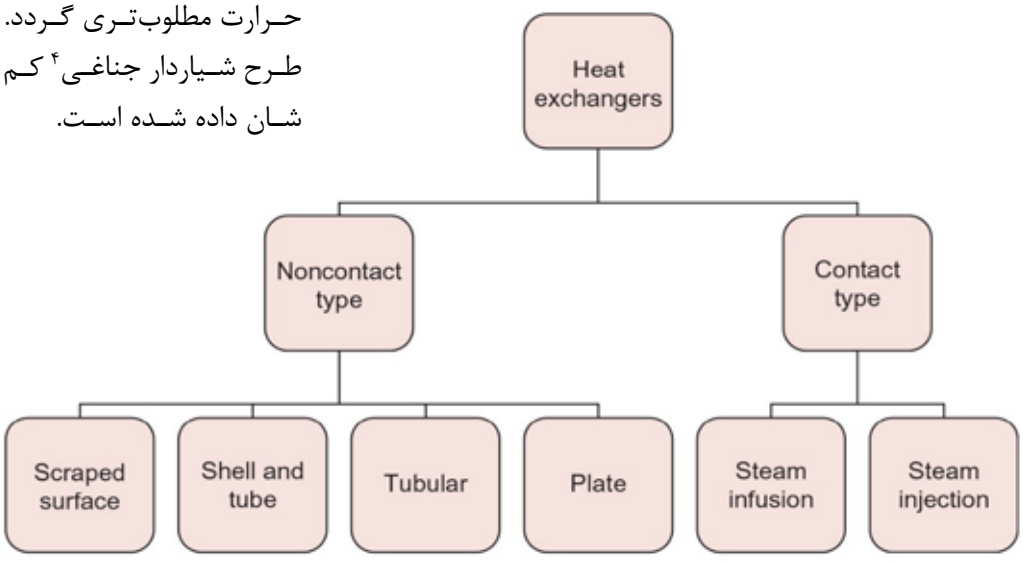
1. unit operations
2. refrigeration
3. freezing
4. thermal sterilization
5. medium
6. food applications

۱. مبدل حرارتی صفحه‌ای

در یک کارخانه فرآوری مواد غذایی، سرمایش و گرمایش مواد غذایی در تجهیزاتی به نام مبدل‌های حرارتی انجام می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، مبدل‌های حرارتی می‌توانند به مبدل‌های تماسی و غیرتماسی دسته‌بندی شوند. در مبدل‌های حرارتیِ نوع غیر تماسی، همان‌گونه که از نام آن پیداست، محصول و محیط گرمایش و سرمایش به صورت فیزیکی از طریق یک دیواره نازک از یکدیگر جدا شده شده‌اند. اما از طرف دیگر، در مبدل‌های حرارتی نوع تماسی، یک تماس فیزیکی مستقیم بین محصول و جریان‌های گرمایش و سرمایش وجود دارد. برای مثال، در یک سیستم تزریق بخار[1]، بخار به صورت مستقیم به منظور گرم کردن محصول به داخل آن تزریق می‌شود. در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، یک صفحه‌ی فلزی نازک، جریان محصول را از جریان گرمایش یا سرمایش جدا نگه می‌دارد در حالی که اجازه می‌دهد انتقال حرارت بدون هیچ‌گونه اختلاطی انجام گیرد. ما در بخش‌های زیر، برخی از مبدل‌های حرارتی متداول در صنایع مواد غذایی را بررسی خواهیم کرد.

مبدل حرارتی صفحه‌ای بیش از ۷۰ سال پیش اختراع شد و کاربرد وسیعی در صنایع لبنیات، غذا و نوشیدنی دارد. طرحواره‌ای از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای درشکل ۲ نمایش داده شده است. این مبدل حرارتی از یک سری صفحات موازی نزدیک به هم از جنس فولاد ضد زنگ که در یک بدنه‌ی (قاب) فشرده شده، تشکیل شده است. واشرهایی ساخته شده از لاستیک طبیعی یا مصنوعی، لبه‌های این صفحه و ورودی‌ها را محکم به هم می‌چسباند تا از بروز اختلاط مایعات جلوگیری کند. این واشرها به هدایت کردن جریان‌های گرمایش یا سرمایش و جریان‌های محصول به داخل شکاف‌های متناوب مربوطه کمک می‌کنند. مسیر و جهت جریان محصول در مقابل جریان سرمایش/گرمایش می‌تواند یا به صورت جریان موازی[2] (در جهت یکسان) یا به صورت جریان مخالف[3] (در خلاف جهت) نسبت به همدیگر باشند.

صفحات مورد استفاده در مبدل حرارتی صفحه‌ای، از فولاد ضد زنگ ساخته شده‌اند: الگوهای خاصی روی صفحات، پِرِس شده است تا موجب افزایش تلاطم در جریان محصول و همچنین دستیابی به انتقال حرارت مطلوب‌تری گردد. نمونه‌ای از یک الگو، یک طرح شیاردار جناغی[4] کم عمق است که در شکل ۳ شان داده شده است.



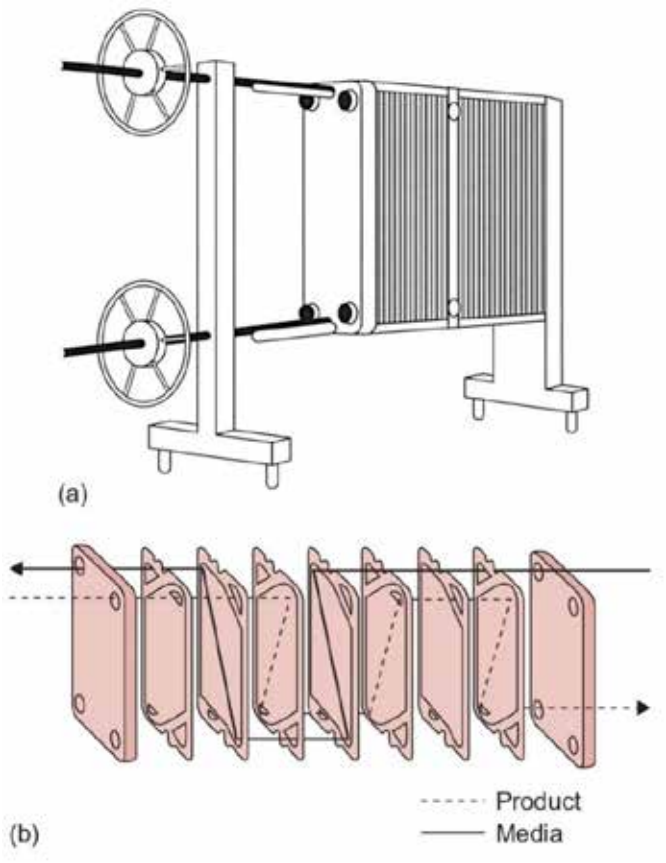
شکل ۱: طبقه‌بندی مبدل‌های حرارتی متداول

1. steam-injection
2. parallel flow
3. Counter flow
4. herringbone ribbed

مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای بـرای مـواد غذایـیِ نوشـیدنیِ[1] کـم سـرعت (Pa s ۵>) مناسـب هسـتند. در صـورت وجـود مـواد جامـد معلـق، قطـر معـادل ذرات بایـد کمتـر از ۰/۳ سـانتی‌متر باشـد. ذرات درشـت‌تر می‌تواننـد در طـول نقـاط ارتبـاط صفحـه کاهـش یابنـد و در قسـمت گرمایـش "سـوخته شـوند".

در مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای در مقیـاس صنعتـی، نرخ‌هـای جریـان محصـول اغلـب ۵۰۰۰ تـا ۲۰۰۰۰ kg/h بـه دسـت می‌آیـد. در هنـگام اسـتفاده از مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای، بایـد نهایـت دقـت را بـرای بـه حداقل رسـاندن رسـوب[2] موجـود در مـواد غذایـی نوشـیدنی، هماننـد پروتئین‌هـای شـیر در سـطح صفحه‌هـا بـه کار بسـت. ایـن رسـوب کـه جـرم گرفتگـی[3] نیـز نامیـده می‌شـود، نـرخ انتقـال حـرارت از محیـط گرمایـش بـه محصـول را کاهـش خواهـد داد. عـلاوه بـر آن، افـت فشـار در بیـش از یـک دوره زمانـی اتفـاق خواهـد افتـاد. در نهایـت، ایـن فرآینـد متوقـف می‌گـردد و صفحه‌هـا تمیـز می‌شـوند. بـرای محصـولات لبنـی کـه نیازمنـد اسـتفاده بـا دمـای بسـیار بـالا اسـت، مـدت زمـان فرآینـد معمـولا محـدود بـه سـه الـی چهـار سـاعت می‌شـود. مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای دارای مزایـای زیر هسـتند:

* نگـه‌داری از ایـن مبدل‌هـای حرارتـی بسـیار سـاده اسـت و بـرای انجـام بازرسـی سـطح محصـول، بـه سـرعت و سـادگی قابـل جداسـازی هسـتند.
* مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای، یـک طـرح بهداشـتی بـرای کاربردهـای غذایـی دارد.
* ظرفیـت آن‌هـا بـه سـادگی می‌توانـد بـا اضافـه کـردن صفحـات بیشـتر بـه چارچـوب، افزایـش یابـد.
* بـا مبدل‌هـای حرارتـی صفحـه‌ای می‌توانیـم بـا سـرمایه‌ای کمتـر نسـبت بـه دیگـر مبدل‌هـای حرارتـی نـوعِ غیـر تماسـی، محصـول را تـا یـک درجـه سـانتی‌گراد دمـای محیـط مجـاور، گـرم یـا سـرد کنیـم.



شکل ۲: (a) مبدل حرارتی صفحه‌ای
(b) طرحواره نمای جریان سیال بین صفحات

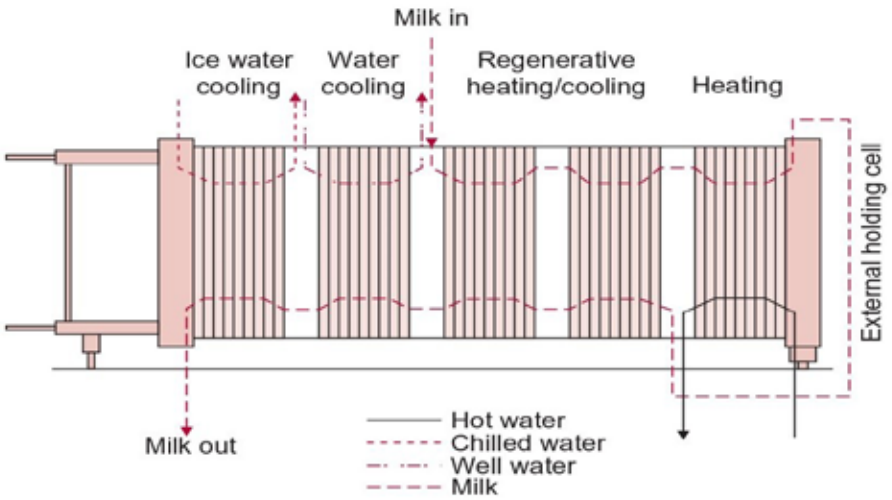
شکل ۳: الگوهای پِرِس شده روی صفحات مورد استفاده در یک مبدل حرارتی.

1. liquid foods
2. deposition
3. fouling

* مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، فرصت‌هایی برای حفظ انرژی به وسیله بازتولید[1] مهیا می‌کنند.

همان‌گونه که در یک طرحواره ساده در شکل ۴ نشان داده شده است، یک ماده غذایی نوشیدنی در بخش گرمایش تا دمای پاستوریزه شدن یا هر دمای مورد نظر دیگری گرم می‌شود؛ سپس این سیالِ گرم شده، قسمتی از گرمای خود را در بخش بازتولید به مایع خام ورودی منتقل می‌کند. جریان سرد تا دمایی گرم می‌شود که انرژی اضافیِ کمی برای رسیدن به دمای مورد نظر لازم دارد. وجود صفحات اضافی برای فرآیند بازتولید ضروری است، هرچند هزینه سرمایه اضافی ممکن است بسیار سریع به وسیله کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران گردد. یک فرایند بازتولیدِ دو مرحله‌ای واقعی برای پاستوریزه کردن آب انگور در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از آنکه آبمیوه‌ی آغازگر[2] تا دمای ۸۸ درجه سانتی‌گراد (موقعیت A) گرم شد، به طرف بخش بازتولید (وارد شدن در موقعیت B) و از میان یک چرخه نگه‌دارنده[3] گذرانده شد. در این بخش، آبمیوه گرمای خودش را در آبمیوه‌ی خامِ ورودی (در موقعیت C) که در دمای ۳۸ درجه وارد مبدل می‌شود، آزاد می‌کند. دمای آبمیوه خام تا ۷۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (در موقعیت D) و دمای آبمیوه آغازگر تا ۵۳ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (در موقعیت E).

در این مثال، بازتولید [(۷۳-۳۸)/(۸۸-۳۸)]×۱۰۰ یا ۷۰ درصد می‌باشد، زیرا آبمیوه خام ورودی بدون استفاده از محیط گرمایش خارجی، تا ۷۰ درصد از دمای پاستوریزه شدن نهایی‌اش گرم شد. آبمیوه‌ای که تا دمای ۷۳ درجه سانتی‌گراد گرم شد، از بخش گرمایش عبور می‌کند و دمای آن با استفاده از آبی داغ با دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد به عنوان محیط گرمایش، تا ۸۸ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود. سپس آبمیوه‌ی گرم شده به منظور پیش گرمایش[4] آبمیوه خام ورودی، به بخش بازتولید پمپ می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد. فرآیند سرمایشِ آبمیوه پاستوریزه گرم با استفاده از آب شهری، آب سرد و یا گلیکول[5] چرخشی انجام می‌شود. باید توجه داشته باشیم که در این مثال، حرارت کمی لازم است که از آبمیوه پاستوریزه کاسته شود و به وسیله فرآیند بازتولید، بار سرمایش افزایش می‌یابد.



شکل ۴: یک پاستوریزه کننده صفحه‌ای پنج مرحله‌ای برای فرآوری شیر

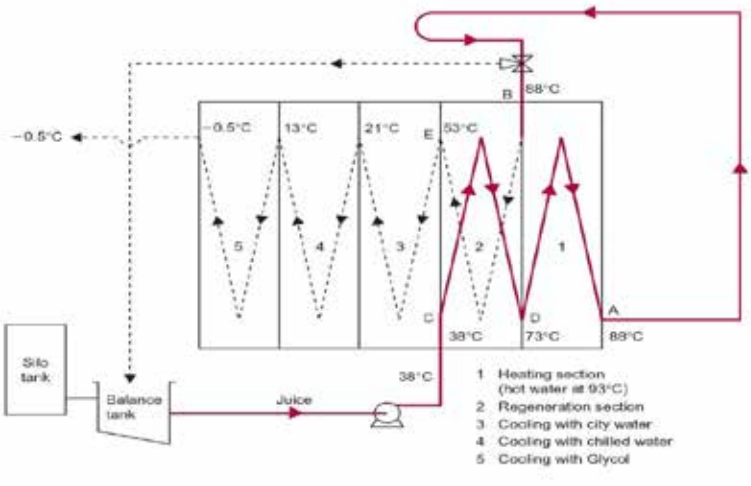
1. regeneration
2. starter
3. holding loop
4. preheats
5. glycol

۲. مبدل حرارتی لوله‌ای

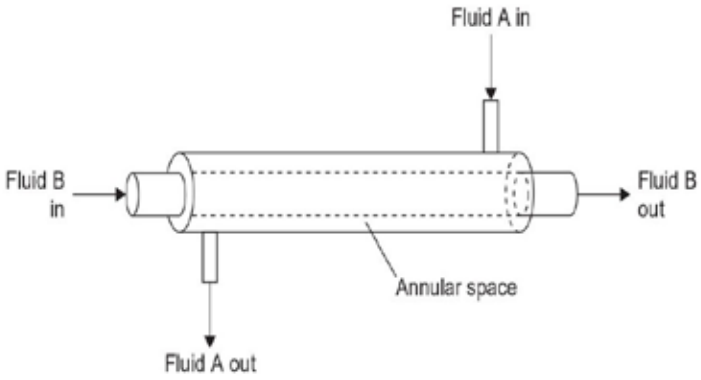
ساده‌ترین نوع مبدل حرارتی غیرتماسی، یک مبدل حرارتی دولوله‌ای است که شامل یک لوله است که به صورت هم مرکز در داخل یک لوله دیگر قرار داده شده است. هر دو جریان سیال به ترتیب در فضای حلقوی و در داخل لوله جریان دارند.

این جریان‌ها ممکن است در یک جهت یکسان (جریان موازی) یا در خلاف جهت یکدیگر (جریان مخالف) در جریان باشند. شکل ۶ نمودار شماتیک یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با جریان مخالف است.

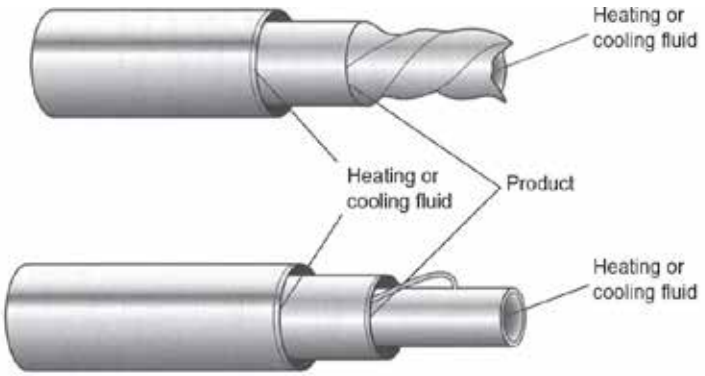
نوع دیگری از یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با تغییراتی جزئی، یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای است که در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این نوع مبدل حرارتی، محصول در فضای حلقوی داخلی جریان دارد در حالی که محیط گرمایش/سرمایش در لوله داخلی و فضای حلقوی خارجی در جریان است. داخلی‌ترین لوله ممکن است برای ایجاد تلاطم و انتقال حرارت بهتر، دارای موانعی با طراحی ویژه باشد. برخی از کاربردهای صنعتیِ خاصِ مبدل‌های حرارتی سه لوله‌ای عبارتند از: گرمایش آب پرتغال کنسانتره از دمای چهار درجه سانتی‌گراد به دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد و سپس سرمایش آن به دمای چهار درجه سانتی‌گراد، سرمایش آب شستشوی پنیر کوتاژ از دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد به دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد با آب خنک، و سرمایش میکس بستنی از دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد به نیم درجه سانتی گراد با



شکل ۵: یک سیستم بازتولید دو راهه مورد استفاده در فرآوری آب انگور.



شکل ۶: نمایش شماتیک یک مبدل حرارتی لوله‌ای



شکل ۷: نمایش شماتیک یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای

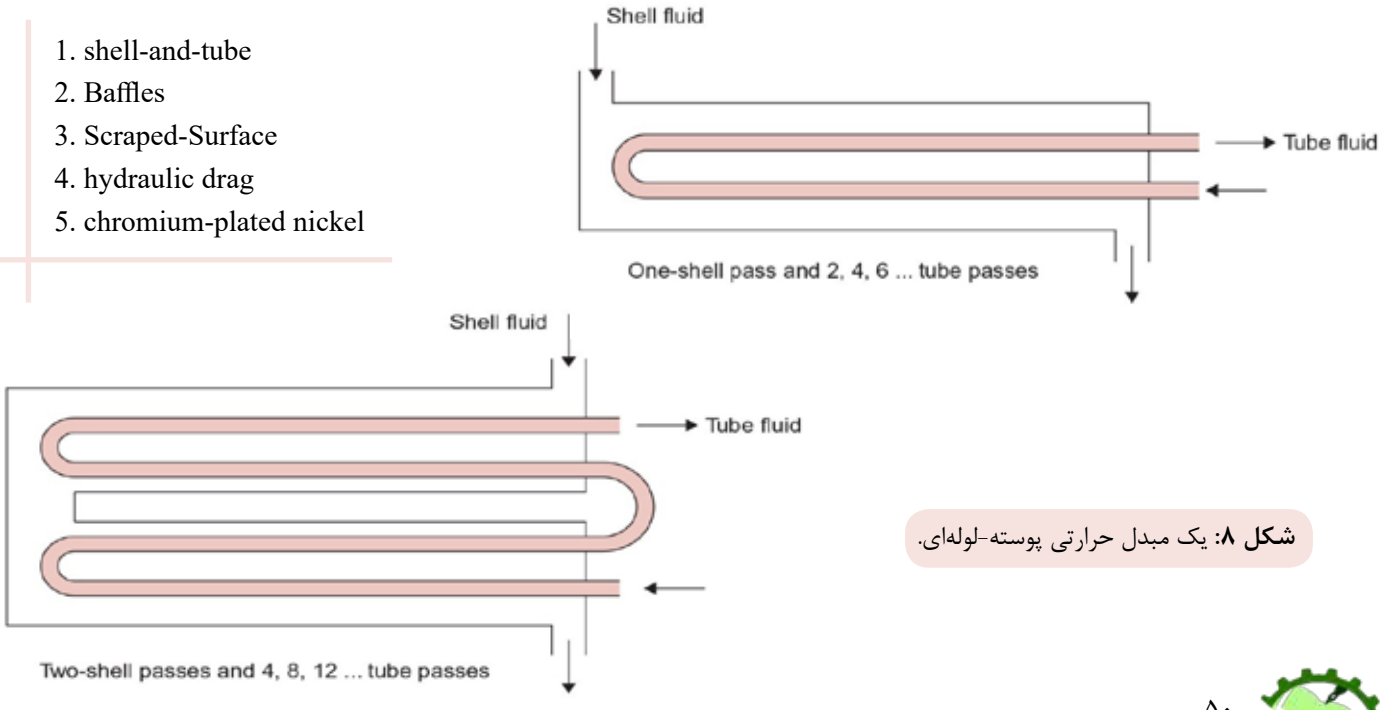
۳. مبدل حرارتی صفحه زدوده[۳]

یک نوع مبدل حرارتی متداول دیگری که در صنایع غذایی برای کاربردهایی نظیر گرمایش مواد غذایی نوشیدنی در سیستم‌های تبخیر مورد استفاده قرار میگیرد، مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای[۱] است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، یکی از جریان‌های مایع در داخل لوله جاری می‌شود در حالی که جریانِ مایعِ دیگر به داخل پوسته و روی لوله‌ها پمپ می‌شود. ما می‌توانیم با حفظ جریان مایع در طرف پوسته، به جای آنکه به صورت موازی با میله‌ها در جریان باشد، روی آن‌ها جاری شود و در نتیجه به نرخ‌های بالاتری از انتقال حرارت دست یابیم. موج‌گیرهایی[۲] (منحرف کننده‌های جریان سیال) که در طرف پوسته قرار داده شده‌اند، الگوی جریان متقاطع را ایجاد می‌کند. با توجه به نوع طراحی، یک عبور از لوله یا بیشتر می‌تواند انجام گیرد. مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله‌ای نشان داده شده در شکل ۸، دارای یک عبور از پوسته همراه با دو عبور از لوله، و دو عبور از پوسته همراه با چهار عبور از لوله می‌باشد.

در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای مرسوم، انتقال حرارت به یک جریان مایع، تحت تاثیر کشش آبی[۴] و مقاومت گرمایی ناشی از لایه انباشته شده یا رسوب روی دیواره‌ی لوله، قرار می‌گیرد. در صورتی که سطح داخلی دیواره لوله به وسیله ابزارهای مکانیکی مناسب، به صورت مداوم زدوده یا خراشیده شود، این مقاومت گرمایی می‌تواند به حداقل برسد. عمل زدودن یا خراشیدن، انتقال حرارتِ سریعی را به یک حجمِ محصولِ نسبتاً کوچک، میسر می‌کند. یک مبدل حرارتی صفحه زدوده که در فرآوری غذایی مورد استفاده قرار گرفته است به صورت شماتیک در شکل ۹ نمایش داده شده است.

سطوح تماس غذایی یک سیلندر صفحه زدوده از فولاد ضد زنگ (نوع ۳۱۶)، نیکل خالص، نیکل سخت آبکاری شده‌ی کروم[۵] یا دیگر مواد مقاوم در برابر خوردگی ساخته می‌شوند. روتور داخلی شامل تیغه‌هایی است که به وسیله لایه پلاستیکی یا پلاستیک قالب‌گیری شده پوشیده شده‌اند (شکل ۹).

1. shell-and-tube
2. Baffles
3. Scraped-Surface
4. hydraulic drag
5. chromium-plated nickel



شکل ۸: یک مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای.

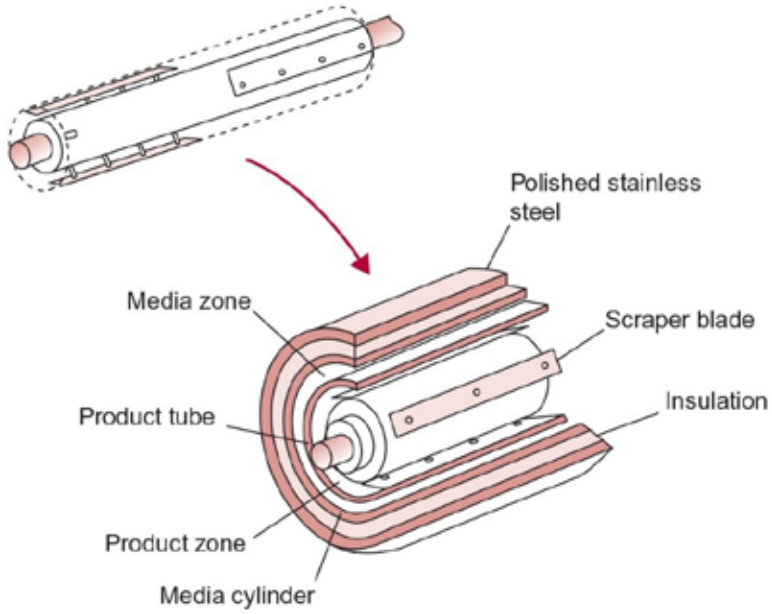
سرعت روتور بین ۱۵۰ دور در دقیقه تا ۵۰۰ دور در دقیقه متغیر است. اگرچه سرعت چرخش بالاتر، انتقال حرارتی بهتری را ایجاد می‌کند اما ممکن است کیفیت محصول فرآوری شده را از طریق خیس شدن[1] احتمالی، تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، باید سرعت روتور و فضای حلقوی بین روتور و سیلندر، برای محصولی که در حال فرآوری است با دقت زیادی انتخاب گردد.

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، سیلندر که محتوی محصول و روتور است در یک غلاف خارجی محصور شده است. محیط گرمایش/سرمایش به این غلاف خارجی عرضه می‌شود.

محیطی که به صورت متداول استفاده می‌شود شامل بخار، آب گرم، آب نمک و یا یک ماده سردکننده. دمای معمولی مورد استفاده جهت فرآوری محصولات در مبدل‌های حرارتی صفحه زدوده، در محدوده ۳۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد است.

عمل اختلاط ثابت که در مبدل حرارتی صفحه زدوده انجام می‌شود، اغلب برای بهبود یکنواختی مزه، رنگ، عطر و خواص مربوط به بافت محصول، مطلوب است.

از جمله کاربردهای مبدل‌های حرارتی صفحه زدوده در صنایع فرآوری غذایی می‌توان به گرمایش، پاستوریزه کردن، استریلیزه کردن، ویپینگ[2]، ژله‌ای کردن[3]، امولسیون کردن[4]، خمیرسازی[5] و متبلور کردن[6] اشاره کرد. مایعاتی که در یک محدوده وسیع از گرانروی قرار دارند و قابلیت پمپ شدن دارند، در این نوع از مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ برای مثال آبمیوه‌ها، سوپ‌ها، کنسانتره مرکبات، کره بادام زمینی، لوبیای پخته، رب گوجه فرنگی و مربا.



شکل ۹: یک مبدل حرارتی صفحه زدوده به همراه یک بخش برش خورده که اجزاء گوناگونی را نشان می‌دهد.

1. maceration
2. whipping
3. gelling
4. emulsifying
5. plasticizing
6. crystallizing

۴. مبدل حرارتی تزریق بخار

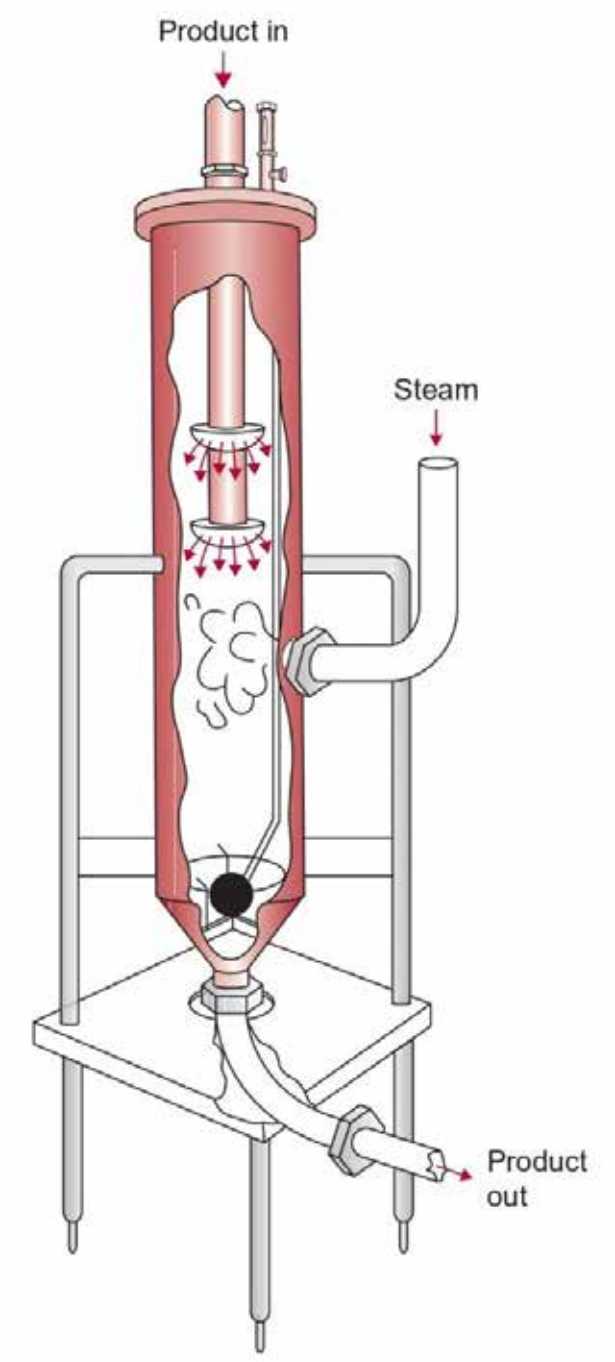
مبدل حرارتی تزریق بخار، تماس مستقیم بین بخار و محصول را فراهم می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، محصول در حالت مایع به قسمت فوقانی مبدل حرارتی پمپ می‌شود و سپس در ورقه‌های نازک اتاقک گرمایش جریان می‌یابد. گرانروی مایع، اندازه پخش‌کننده‌ها[1] را تعیین می‌کند.

محصولاتی که حاوی ذرات ریزی چون تکه‌های سبزیجات، قطعات گوشت و برنج هستند، می‌توانند با پخش‌کننده‌هایی با طراحی مخصوص مورد استفاده قرار گیرند. انتقال حرارت با نرخ‌های بالا زمانی به دست می‌آید که بخار، با قطراتِ کوچکِ ماده غذایی در تماس باشد.

دمای محصول، به دلیل تراکم بخار به سرعت افزایش پیدا می‌کند. محصولات گرم شده به همراه بخار متراکم از اتاقک انتهایی آزاد می‌شوند. برای دستیابی به پخت مطلوب، یک مقدار مشخص از مایع در انتهای اتاقک باقی می‌ماند.

تفاوت دمایی محصول در ورودی و خروجی اتاقک گرمایش ممکن است در حد ۵/۵ درجه سانتی‌گراد کم باشد، مثلا در بوزدایی[2] از شیر (۷۶/۷ تا ۸۲/۲ درجه سانتی‌گراد) و یا ممکن است در حد ۹۶/۷ درجه سانتی‌گراد زیاد باشد، مثلا در استریلیزه کردن پودینگ برای بسته‌بندی ضد عفونی شده (۴۸/۹ تا ۱۴۵/۶ درجه سانتی‌گراد).

گاهی اوقات، آبی که در اثر تراکم بخار به محصول اضافه می‌شود، بسیار مطلوب است، مخصوصا اگر کل فرآیند نیازمند اضافه شدن آب باشد. در غیر این صورت، آبِ اضافه شده در فرآیند تراکم را می‌توان ازطریق پمپ کردن مایع گرم شده به داخل یک سیستم خنک‌کننده خلأ، تخلیه کرد.



شکل ۱۰: یک مبدل حرارتی تزریق بخار

1. spreaders
2. deodorizing

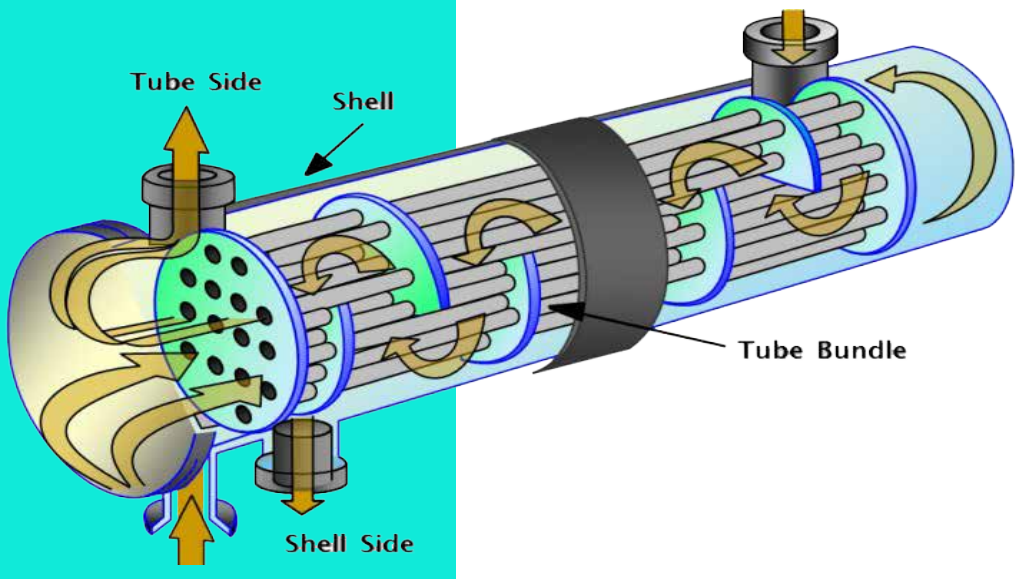
میـــزان آبِ اضافـــه شـــده‌ی ناشـــی از فراینـــد تراکـــم را می‌تـــوان از طریـــق اندازه‌گیـــری دمـــای محصـــول وارد شـــده بـــه مبـــدل حرارتـــی و دمـــای محصـــول خـــارج شـــده از خنک‌کننـــده خـــلأ، محاســـبه نمـــود.

ایـــن نـــوع مبـــدل حرارتـــی در فرآینـــد پخـــت و یـــا اســـتریلیزه کـــردن طیـــف گســـترده‌ای از محصـــولات، نظیـــر: ســـوپ‌های کنســـانتره، شـــکلات، پنیـــر فـــرآوری شـــده، میکس‌هـــای بســـتنی، پودینگ‌هـــا، مرباهـــای میوه‌جـــات و شـــیر، کاربـــرد دارد.

۵. سخن پایانی

در بخش‌هـــای پیشـــین، انـــواع مختلـــف مبدل‌هـــای حرارتـــی متـــداول را مـــورد بحـــث قـــرار دادیـــم. بدیهـــی اســـت کـــه پیـــش از طراحـــی و ارزیابـــی هـــر نـــوع تجهیـــزات مبـــدل حرارتـــی، وجـــود درکـــی پایـــه از مکانیـــزم انتقـــال حـــرارت، چـــه در مـــواد غذایـــی و چـــه در مـــواد مـــورد اســـتفاده در ســـاختِ تجهیـــزات فـــرآوری مـــواد غذایـــی، بســـیار ضـــروری اســـت.

طیـــف وســـیعی از مـــواد غذایـــی بـــا اســـتفاده از مبدل‌هـــای حرارتـــی، فـــرآوری می‌شـــوند. ایـــن مـــواد، مشـــکلات خـــاص و اغلـــب پیچیـــده‌ای در ارتبـــاط بـــا انتقـــال حـــرارت ایجـــاد می‌کننـــد.



نویسندگان:

R. Paul Singh
Department of Biological and Agricultural Engineering and Department of Food Science and Technology
University of California Davis, California

Dennis R. Heldman
Department of Food Science and Technology and Department of Food, Agricultural and Biological Engineering
The Ohio State University, Columbus, Ohio