

بررسی انواع روش های فرایند تغلیظ انجمادی در فرآورده های لبنی

محمدجواد ایوانی^۱، سارا سهراب وندی^۲، محسن عاطفی^۱، آمنه نعمت‌الهی^۳

۱- کمیته تحقیقات دانشجویان، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار گروه تحقیقات صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۳- نویسنده مسئول: کمیته تحقیقات دانشجویان، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: amene.nematollahi@gmail.com

چکیده

تغلیظ انجمادی فرایندی است که با انجماد بخشی از آب موجود در فرآورده و در مرحله بعد با حذف کریستال‌های یخ ایجاد شده سبب افزایش غلظت مواد غذایی مایع می‌شود. علت افزایش توجه به روش تغلیظ انجمادی آن است که فرآورده‌های لبنی حاوی ترکیبات حساس به حرارت مانند پروتئین‌ها و عوامل ایجاد کننده‌ی عطر و طعم هستند. با این حال تغلیظ انجمادی فرآورده‌های لبنی دارای محدودیت‌ها و مشکلاتی نظیر افزایش غلظت کازئین و پروتئین‌های آب پنیر، افزایش تدریجی غلظت و گرانی‌روی شیر، کاهش سرعت رشد کریستال‌های یخ و افت قابل توجه چربی و لاکتوز طی فرایند است. بنابراین مقاله حاضر به بررسی انواع روش‌های تغلیظ انجمادی در فرآورده‌های لبنی می‌پردازد.

واژگان کلیدی: پروتئین‌های آب پنیر، تغلیظ انجمادی، لبنیات

مقدمه

آب). روش یادشده با کم‌ترین میزان مصرف انرژی همراه است اما معایبی نظیر قیمت بالای غشاهای، هزینه بالا، نگهداری و نیاز به تعویض و شست و شوی مداوم، استفاده از آن را محدود می‌کند (۵-۹).

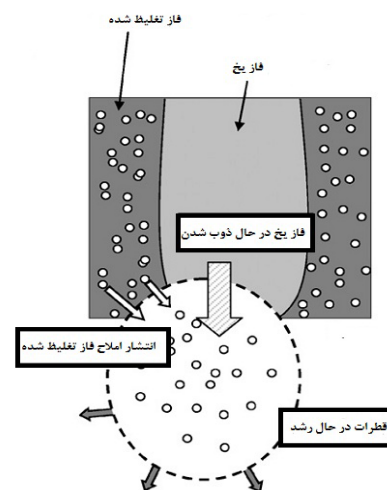
تغلیظ انجمادی (Cry concentration) "به دلیل حفظ بیشینه مواد مغذی و مواد موثر در طعم و رایحه" یکی از با کیفیت‌ترین روش‌های تغلیظ شناخته شده است. اما به دلایلی مانند مصرف انرژی و هزینه زیاد دستگاهی، نیاز به تمیز کردن و نگهداری بیش‌تر در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر اسمز معکوس (Reverse osmosis) و تبخیر (Evaporation) کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. مشاهدات نشان می‌دهند که این روش قابلیت‌هایی نظیر انجام پدیده تغلیظ بدون افزایش دما و قابلیت جداسازی ذرات با اندازه‌های مختلف (تا رسیدن به بیشینه ماده خشک محلول معادل ۵۰٪) را دارد. تغلیظ انجمادی در واقع نوعی فرایند آب‌زدایی (Dehydration) به شمار می‌آید که قابلیت نگهداری ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای مواد غذایی (به دلیل اثر حفاظتی دمای پایین بر ویتامین‌ها، پروتئین‌های حساس

در فراوری مواد غذایی از پدیده تغلیظ به طور گسترده برای ایجاد کریستال، خشک کردن و پالایش غشایی (Filtration) استفاده می‌شود. در تغلیظ مواد غذایی عواملی نظیر کاهش میزان انرژی مصرفی، نگهداری مواد مغذی و عطر و طعم اولیه ماده غذایی، افزایش کارایی فرایند و کاهش افت فرآورده از اهمیت فراوانی برخوردار است (۱-۳). گسترده‌ی و نیاز فراوان به تغلیظ، منجر به ایجاد و توسعه روش‌های مختلف به منظور تغلیظ مواد غذایی شده است که از متداول‌ترین روش‌های موجود می‌توان به پدیده غلیظ با استفاده از تبخیر اشاره نمود. روش تبخیر علاوه بر مصرف نسبتاً زیاد انرژی، سبب آسیب گرمایی به ماده غذایی و کاهش کیفیت فرآورده می‌شود؛ بنابراین برای فرآوری ترکیبات حساس به گرما مناسب نخواهد بود. با این حال امکان دست‌یابی به غلظت‌های بالا (مواد جامد محلول بیش از ۵۰٪) توسط فرایند تبخیر وجود دارد (۴). نیز به منظور تغلیظ مواد غذایی می‌توان از روش پالایش غشایی استفاده نمود به طوری که با استفاده از غشاهای خاص (با اندازه مناسب) تغلیظ فرآورده انجام می‌شود (به دلیل جداسازی

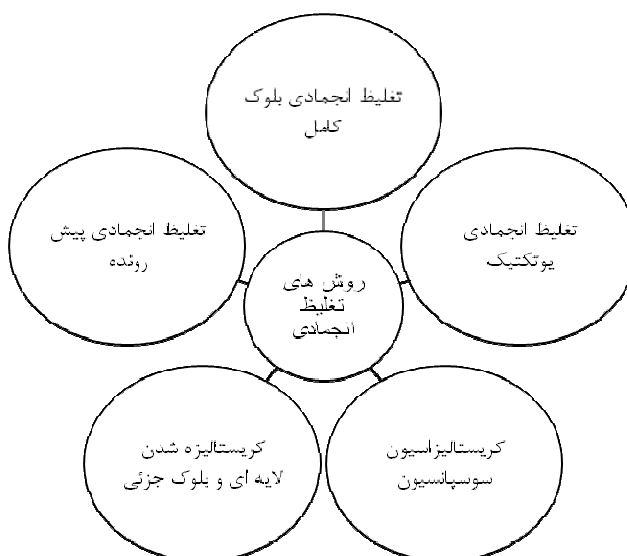
انواع روش‌های تغلیظ انجمادی

تغلیظ انجمادی پیش‌رونده (Progressive cryoconcentration): طراحی این روش به گونه‌ای است که از تشکیل کریستال‌های کوچک یخ جلوگیری کرده و منجر به تشکیل کریستال‌های بزرگ روی سطوح بسیار باریک مخازن کریستاله شدن (Crystallization vessels) می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به سهولت فرآیند جداسازی و کاهش هزینه‌ها اشاره نمود (۱۹، ۳). اصول روش تغلیظ انجمادی پیش‌رونده متفاوت از سایر روش‌ها است (۱۸، ۱۷) و نوعی کریستاله شدن ذوبی به‌شمار می‌آید که با نوسانات متناوب دما، رشد کریستال‌ها را امکان‌پذیر می‌نماید به‌طوری‌که با کاهش اولیه دما، کریستال‌هایی با اندازه‌های متفاوت تشکیل می‌شوند و سپس تناوب‌های دمایی منجر به ذوب مجدد کریستال‌های کوچک و الحاق آن‌ها به صورت ایجاد کریستال‌های بزرگ‌تر می‌شود (۲۰). در گذشته از این روش برای تغلیظ سوسپانسیون‌های دارای مواد معلق با اندازه کوچک و همین‌طور اهداف تجزیه‌ای استفاده شده است (۲۱). در شکل ۲ انواع روش‌های تغلیظ انجمادی به طور خلاصه آورده شده است.

به گرما و پلی فنل‌ها) را دارد. نیز دمای پایین فرایند از رشد میکروبی جلوگیری نموده به‌طوری‌که این موضوع سبب افزایش کیفیت فرآورده می‌شود (۷-۹، ۱۳). تاکنون مطالعات زیادی در مورد فرایند تغلیظ انجمادی و اثر آن بر ترکیبات اصلی شیر (پروتئین، لاکتوز و چربی) انجام شده است (۱۵، ۱۴). از دیدگاه ترمودینامیکی، تغلیظ انجمادی یک فرایند جداسازی بخش‌های جامد و مایع به‌شمار می‌آید که بر اساس تفاوت در دمای کریستاله شدن سبب جداسازی مولکول‌ها از یک‌دیگر می‌شود (۱۶). نمای کلی تغلیظ انجمادی در شکل ۱ نشان داده شده است. بنابراین در مقاله حاضر به بررسی انواع روش‌های تغلیظ انجمادی در فرآورده‌های لبنی پرداخته می‌شود.



شکل ۱. نمای کلی فرایند تغلیظ انجمادی (۲)



شکل ۲. انواع روش‌های تغلیظ انجمادی

سرعت حذف گرما و انتشار جرم (Mass diffusion) دارد (۲۹-۳۱)، به‌طوری‌که با افزایش سرعت حذف گرما و انتقال جرم در فرآورده، نرخ هسته‌زایی افزایش یافته و کریستال‌های کوچک‌تری تولید می‌شود، بنابراین به‌دلیل کاهش افت ماده موثر، بیشینه حفظ مواد رایحه‌ای وجود دارد. پژوهش‌هایی در مورد اثر تغلیظ انجمادی بر میزان پروتئین‌ها و لاکتوز انجام شده است. گزارشات Best و Vasada (۱۹۹۳) در زمینه کارایی تغلیظ انجمادی در تغلیظ شیر پس چرخ (Skim milk)، شیر کامل (Whole milk)، پروتئین‌های آب پنیر و ماده باقی مانده پشت غشا (Permeate) نشان داد بیش‌ترین غلظت به‌دست آمده در خصوص شیر پس چرخ، شیر کامل، پروتئین‌های آب پنیر و ماده باقی مانده پشت غشا به ترتیب برابر ۴۰٪، ۴۴٪، ۴۶/۵٪ و ۵۱٪ بر پایه وزن مرطوب در زمان‌های تغلیظ به ترتیب ۴۰، ۳۰، ۲۴ و ۲۶ ساعت بود. با توجه به این‌که شیر پس چرخ دارای بیش‌ترین مقدار کازئین و ماده باقی مانده پشت غشا دارای بیش‌ترین مقدار لاکتوز است، نتیجه‌گیری شد که میزان لاکتوز و پروتئین‌های آب پنیر در فرآورده رابطه‌ی مستقیمی با میزان تغلیظ دارد. احتمالاً کازئین، تراویده آب پنیر (Whey permeate) و لاکتوز کریستاله شده عوامل محدود کننده‌ی به منظور دستیابی به بیشینه غلظت در این روش هستند. نیز تعیین شد که گرانروی زیاد عامل مهمی در روش تغلیظ انجمادی بلوک کامل به شمار می‌آیند و با میزان تغلیظ رابطه‌ی وارون دارد (۳۳).

Hartel و Chung در سال ۱۹۹۳ پژوهشی در مورد فرایند سردکردن نزدیک به دمای بحرانی قبل از هسته‌زایی انجام دادند و دریافتند افزایش میزان پروتئین‌های آب پنیر سبب افزایش دمای بحرانی سردکردن می‌شود. نیز لاکتوز تاثیر بسیار کمی بر هسته‌زایی در دمای سرد کردن بحرانی دارد (۳۲).

تغلیظ انجمادی به روش کریستاله‌شدن لایه‌ای و بلوک جزئی: این نوع تغلیظ انجمادی، روش جدید و کارآمدی است که در سال ۲۰۰۷ توسط Aider و همکارانش با هدف بهبود تغلیظ لاکتوسرم (Lacto serum) معرفی شد. اساس عمل این نوع تغلیظ، ورود سوسپانسیون مایع به یک محفظه‌ی کریستاله‌کننده (Crystallizer Chamber) مجهز به لوله‌های سرمازا است به‌طوری‌که کریستاله‌شدن به‌تدریج از مرکز محلول آغاز می‌شود (۱). با توجه به ضریب هدایت گرمایی بالای یخ نسبت به آب، با افزایش مقدار یخ در مرکز

تغلیظ انجمادی یوتکتیک: به روشی گفته می‌شود که برای جداسازی نمک‌های غیر آلی از محلول آبی از دماهای بسیار پایین استفاده می‌شود (۱۳). یوتکتیک یک محلول ناهمگن، دمایی است که در آن دما، تمام اجزای محلول به حالت جامد است و هیچ جزء مایعی وجود ندارد. میزان این دما به ترکیب، نوع و برهم‌کنش مواد تشکیل دهنده بستگی دارد. در نقطه‌ی یوتکتیک آب آزاد وجود ندارد و از این رو دو عامل گرانش و تفاوت چگالی مواد محلول، نیروی محرکه جداسازی به‌شمار می‌آیند. مزایای این روش مصرف انرژی کم و خلوص بسیار بالا است (۲۴-۲۲، ۱۳).

تغلیظ انجمادی بلوک کامل (Complete Block Cryoconcentration): در این روش پس از انجماد کامل ماده غذایی، یخ زدایی با کمک نیروی گرانشی (Gravitational-thawing assisted) انجام می‌شود و بخش‌های منجمد به شکل ترکیبات جامد از بین مایع عبور می‌کنند. با کنترل دمای بهینه ذوب می‌توان کارایی این نوع فرایند را تا ۹۰٪ افزایش داد، به‌طوری‌که سبب کاهش دمای ماده محبوس شده در یخ شد (۷). تغلیظ انجمادی بلوک کامل روشی مناسب برای غذاهای مایع (به دلیل حفظ بیشینه مواد مغذی و ویژگی‌های حسی) است (۱۴، ۷، ۱).

کریستالیزه شدن سوسپانسیونی (Suspension crystallization): کریستاله شده سوسپانسیونی روش مناسبی به منظور تغلیظ فرآورده‌هایی با اندازه‌ی بسیار کوچک مواد محلول به شمار می‌آید، زیرا تغلیظ این‌گونه مواد به دلیل حساسیت رایحه آن‌ها در سایر روش‌ها مشکل است. از آن‌جاکه این روش به دستگاه‌های پیچیده‌ای نظیر تبادل گر حرارتی با سطح خراشنده (برای تولید کریستال‌های اولیه)، مخازنی برای کریستاله شدن مجدد یخ (Recrystallization vessel for ice growth) و برج‌های شست‌وشو برای جداسازی بلورهای یخ نیاز دارد (۲۵، ۳، ۱) کریستالی شدن سوسپانسیونی یک روش پرهزینه تغلیظ انجمادی به‌شمار می‌آید. از این روش برای استخراج مواد با ارزش افزوده‌ی بالا نظیر قهوه استفاده می‌شود (۲۶).

اولین بار از روش کریستاله‌شدن انجمادی به منظور تغلیظ مواد لبنی در آزمایشگاه استفاده شد و سپس به منظور بررسی راه کارهای افزایش سرعت رشد کریستال‌های یخ و بهینه‌سازی شرایط تغلیظ انجمادی مورد توجه قرار گرفت (۲۸، ۲۷). نتایج این پژوهش‌ها نشان دادند که سرعت هسته‌زایی و رشد کریستال‌ها ارتباط مستقیمی با

و تشابه سرعت جریان همرفت سبب توقف کریستاله شدن می شود.

از این روش برای تغلیظ شیر، شربت ها و استخراج ترکیبات معطر از انگور استفاده می شود (۸).

انجماد زدایی: انجماد زدایی بخش مهمی از فرایند تغلیظ انجمادی است که به روش های مختلفی انجام می شود. یکی از بهترین روش های انجماد زدایی "انجماد زدایی به کمک مایکروویو" است. اهمیت این روش به دلیل کارایی آن به منظور تغلیظ پروتئین و مواد جامد حاوی رطوبت کم است. با این حال، انجماد زدایی به کمک مایکروویو تاثیر منفی بر برخی پروتئین های مواد غذایی دارد، به طوری که تجمع تراکمی پروتئین ها مخصوصاً بتالاکتوگلوبولین و آلفا لاکتوبومین (دارای خاصیت کف کنندگی و امولسیفایری) را تقویت کرده و موجب دناتوره شدن آن ها می شود. نیز، افزایش غلظت یون پتاسیم حین جداسازی سبب تشدید دناتوراسیون این دو نوع پروتئین می شود. به همین دلیل استفاده از روش مایکروویو همراه با سایر روش ها مانند به کارگیری نیروی گرانش یا گریز از مرکز می تواند سبب کاهش افت مواد محلول در این مرحله شده و کارایی فرایند را تا حد زیادی افزایش دهد (۱۴).

در جدول ۱ انواع روش های تغلیظ انجمادی، ویژگی ها و کاربردهای آن ها به طور خلاصه آورده شده است.

فرآورده، سرعت کریستاله شدن هم به تدریج افزایش خواهد یافت. در این روش مقدار کل مواد جامد محلول می تواند به ۳۵٪ بر پایه وزن مرطوب (یعنی اندکی کمتر از آنچه که در کریستاله شدن سوسپانسیونی گزارش شد) برسد. در آزمایشات مشاهده شد چنانچه تغلیظ بیش از حد (برای رسیدن به درصد بالاتری از ماده خشک محلول) انجام پذیرد مقدار پروتئین به طور ناگهانی افزایش (به میزان ۱۹/۸۷٪ بر پایه وزن مرطوب) می یابد. دانسته شده است پروتئین های آب پنیر توانایی زیادی در ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول های آب دارند. بنابراین با افزایش غلظت پروتئین ها، مقدار آب قابل انجماد کاهش یافته و طی فرایند جداسازی فاز مایع غلیظ تر می شود، نیز فاز یخ زده غنی از پروتئین باقی خواهد ماند. این نتیجه ضعف بزرگی برای روش کریستاله شدن لایه ای و بلوک جزئی به حساب می آید ولی با تنظیم کمی مقدار فرآورده مورد استفاده به منظور انجماد زدایی، می توان افت فرآورده را کاهش داد (۳۵، ۳۴، ۱۴).

مواردی نظیر "کاهش افت ماده خشک هنگام جداسازی فازهای با چگالی متفاوت" و "کارایی مطلوب تر در انتقال دما در لایه ای مرزی" از ویژگی های این روش به حساب می آید. مشخص شده است هر چه تفاوت چگالی های مواد تغلیظ شده بیش تر باشد، جداسازی کامل تر و آسان تر انجام می شود. در این روش یکسان شدن غلظت مواد در بخش مایع و جامد

جدول ۱. ویژگی ها و کاربرد انواع روش های تغلیظ انجمادی

منبع	کاربرد	ویژگی	روش
۱۷-۲۱	تغلیظ محصولات دارای مواد محلول نسبتاً کوچک / هدف تجزیه ای	تشکیل و جداسازی آسان کریستال ها / هزینه کمتر	تغلیظ انجمادی پیش رونده
۱۳	جداسازی نمک های غیر آلی از محلول آبی	مصرف انرژی کم / خلوص بسیار بالا / توزیع یکسان اندازه ذرات	تغلیظ انجمادی یوتکتیک
۱، ۷، ۱۴	تغلیظ غذاهای مایع	حفظ مواد مغذی و ویژگی های حسی	تغلیظ انجمادی بلوک کامل
۲۵، ۲۶	استخراج مواد با ارزش افزوده بالا مانند قهوه	پرهزینه ترین روش	کریستاله شدن سوسپانسیونی
۸	تغلیظ شیر، شربت ها و استخراج ترکیبات آروماتیک از انگور	کاهش درصد افت ماده خشک هنگام جداسازی فازها با چگالی متفاوت / کارایی بالاتر و بهتر در انتقال دما در لایه مرزی	تغلیظ انجمادی به روش کریستاله شدن لایه ای و بلوک جزئی

نتیجه‌گیری

افزایش میزان تشکیل کریستال‌ها و دستیابی به شرایط تعادل گرمایی بهینه (به منظور آسان‌تر کردن جداسازی)، بحث اصلی در تغلیظ انجمادی مواد غذایی به‌ویژه فرآورده‌های لبنی است، به طوری که فرایند تغلیظ انجمادی در کم‌ترین زمان و هزینه‌ی ممکن انجام شود. موضوع مهم دیگر رابطه مهم تاثیر ترکیب ماده‌ی غذایی (یعنی مقدار افت کازئین و پروتئین‌های آب پنیر) بر مراحل تغلیظ انجمادی است. بنابراین کاربرد این روش با توجه به مقدار بالای لاکتوز و چربی در بخش منجمد (بیش‌تر از فاز محلول غلیظ شده) ماده غذایی، سبب افت فرآورده می‌شود. نیز دانسته شده است که گرانروی زیاد و غلظت بالای کازئین نوعی عامل محدودکننده برای تغلیظ انجمادی انواع محصولات لبنی به شمار می‌آیند و غلظت پروتئین‌های آب پنیر شیر دارای رابطه وارون با سرعت رشد یخ است، به طوری که با افزایش غلظت آن‌ها، سرعت رشد کریستال‌ها کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی در شیر پس چرخ و شیر کامل، روش کریستاله‌شدن سوسپانسیونی نسبت به روش تغلیظ انجمادی بلوک جزئی، کارآمدتر و راندمان تغلیظ آن بالاتر است. در نهایت حفظ ارزش بیولوژی، تغذیه‌ای و کیفیت پروتئین طی تولید و نگهداری فرآورده از مهم‌ترین فاکتورها به شمار می‌آیند.

برای افزایش کارایی این فرایند بهتر است از روش‌هایی با صرفه اقتصادی بیش‌تر، به منظور بازیابی مجدد یخ استفاده شود تا حداقل افت مواد جامد به دست آید، بهینه‌سازی انتقال گرما و نرخ برش در سیستم‌ها انجام شود و تا حد ممکن مولکول‌های بزرگ مانند کازئین و پروتئین‌های آب پنیر با روش‌هایی نظیر فراپالایش حذف شوند و سپس فرایند تغلیظ انجمادی انجام شود.

سپاسگزاری

این مقاله از طرح دانشجویی کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی شهیدبهشتی استخراج شده‌است.

References

- Min SG. Effect of ice recrystallization on freeze concentration of milk solutes in a lab-scale unit. *Food Sci Biotechnol* 2006;15 (2): 196-201.
- Sánchez J, Ruiz Y, Auleda J, Hernández E, Raventós M. Review. Freeze concentration in the fruit juices industry. *Food Sci Technol Int* 2009; 15(4): 303-15.
- Miyawaki O, Liu L, Shirai Y, Sakashita S, Kagitani K. Tubular ice system for scale-up of progressive freeze-concentration. *J Food Eng* 2005; 69(1): 107-13.
- Heldman DR, Lund DB. The Beginning, current, and future of food engineering: A perspective. *Food Eng Interfaces* 2011: 3-18.
- Güell C, Davis RH. Membrane fouling during microfiltration of protein mixtures. *J Membrane Sci* 1996; 119(2): 269-84.
- Jiratananon R, Chanachai A. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. *J Membrane Sci* 1996; 111(1): 39-48.
- Aider M, de Halleux D. Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology. *LWT-Food Sci Technol* 2008; 41(10): 1768-75.
- Shafiur Rahman M, Ahmed M, Chen XD. Freezingmelting process and desalination: review of present status and future prospects. *Int j nucl desalination* 2007; 2(3): 253-64.
- Song W, Su Y, Chen X, Ding L, Wan Y. Rapid concentration of protein solution by a crossflow electro-ultrafiltration process. *Sep Purif Technol* 2010; 73(2): 310-18.
- Ziegler J, Vogt T, Miersch O, Strack D. Concentration of dilute protein solutions prior to sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. *Anal Bioch* 1997; 250(2): 257.
- Nakagawa K, Maebashi S, Maeda K. Freeze-thawing as a path to concentrate aqueous solution. *Sep Purif Technol* 2010; 73(3): 403-8.
- Habib B, Farid M. Freeze concentration of milk and saline solutions in a liquid-solid fluidized bed: Part II. Modelling of ice removal. *Chem Eng Process: Process Intensification* 2008; 47(4): 539-47.
- Himawan C, Vaessen R, Kramer H, Seckler M, Witkamp G. Dynamic modeling and simulation of eutectic freeze crystallization. *J cryst growth* 2002; 237: 2257-63.
- Aider M, de Halleux D, Melnikova I. Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its

- functional properties: Impact of processing conditions. *Innovative Food Sci Emerg Technol* 2009; 10(3): 334-41.
15. Habib B, Farid M. Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid–solid fluidized bed heat exchanger. *Chem Eng Process: Process Intensification* 2006; 45(8): 698-710.
 16. Aider M, Halleux Dd, Akbachea A. Whey cryoconcentration and impact on its composition. *Food Sci Technol* 2000.
 17. Bae S, Miyawaki O, Arai S. Control of freezing front structure and its effect on the concentration efficiency in the progressive freeze-concentration. *Cryobiol Cryotechnol* 1994; 40: 29-32.
 18. Gu X, Suzuki T, Miyawaki O. Limiting Partition Coefficient in Progressive Freeze-concentration. *J Food Sc* 2006; 70(9): 546-51.
 19. Atwood GR. Studies in melt crystallization. separation & purification reviews. 1972 ;1(1): 297-369.
 20. Gilbert SW. Melt crystallization: Process analysis and optimization. *AICHEJ* 1991; 37(8): 1205-18.
 21. Shapiro J. Freezing-out, a safe technique for concentration of dilute solutions. *Sci* 1961; 133(3470): 2063-64.
 22. Vaessen R, Seckler M, Witkamp GJ. Eutectic freeze crystallization with an aqueous KNO₃-HNO₃ solution in a 100-L cooled-disk column crystallizer. *Ind Eng Chem Res* 2003; 42(20): 4874-80.
 23. Stepakoff G, Siegelman D, Johnson R, Gibson W. Development of a eutectic freezing process for brine disposal. *Desalination*. 1974; 15(1): 25-38.
 24. Van der Ham F, Witkamp G, De Graauw J, Van Rosmalen G. Eutectic freeze crystallization: Application to process streams and waste water purification. *Chem Eng Process: Process Intensification* 1998; 37(2): 207-13.
 25. Okawa S, Ito T, Saito A. Effect of crystal orientation on freeze concentration of solutions. *Int Journal Refrigerat* 2009; 32(2): 246-52.
 26. Braddock R, Marcy J. Freeze concentration of pineapple juice. *J Food Sci* 1985; 50(6): 1636-39.
 27. Qin FGF, Russell AB, Chen XD, Robertson L. Ice fouling on a subcooled metal surface examined by thermo-response and electrical conductivity. *J Food Eng* 2003; 59(4): 421-9.
 28. Hartel R, Espinel L. Freeze concentration of skim milk. *J Food Eng* 1993; 20(2): 101-20.
 29. Dickey LC, Craig JC, Radewonuk ER, McAloon AJ, Holsinger VH. Low temperature concentration of skim milk by direct freezing and vacuum evaporation. *J Dairy Sci* 1995; 78(6): 1369-76.
 30. Zhang Z, Hartel RW. A multilayer freezer for freeze concentration of liquid milk. *J Food Eng* 1996; 29(1): 23-38.
 31. Habib B, Farid M. Freeze concentration of milk and saline solutions in a liquid–solid fluidized bed: Part I. Experimental. *Chem Eng Process: Process Intensification* 2007; 46(12): 1400-11.
 32. Hartel R, Chung M. Contact nucleation of ice in fluid dairy products. *J Food Eng* 1993; 18(3): 281-96.
 33. Aider M, Ounis WB. Skim milk cryoconcentration as affected by the thawing mode: gravitational vs. microwave-assisted. *Int J Food Sci Technol* 2012.
 34. Aider M, de Halleux D, Melnikova I. Skim milk whey cryoconcentration and impact on the composition of the concentrated and ice fractions. *Food Bioprocess Technol* 2009; 2(1): 80-88.
 35. Hernández E, Raventós M, Auleda J, Ibarz A. Concentration of apple and pear juices in a multi-plate freeze concentrator. *Innovative Food Sci Emerg Technol* 2009; 10(3): 348-55.
 36. Aider M, De Halleux D, Akbache A. Whey cryoconcentration and impact on its composition. *J Food Eng* 2007; 82(1): 92-102.

Study of different methods of freeze concentration technology in dairy products

Eivani MJ¹, Sohrabvandi S², Atefi M¹, Nematollahi A^{*3}

- 1- Students' Research Committee, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
- 2- Assistant Prof, Dept. of Food Technology Research, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences, Food Science and Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
- 3- *Corresponding author: Students' Research Committee, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: Amene.nematollahi@gmail.com

Abstract

Freeze concentration is a process of concentrating liquid products by freezing the water content and subsequently removing the so-formed ice crystals from the food system. In dairy processing, this technology offers the advantage of minimizing the heat abuse of sensitive milk components, such as proteins and flavors. It thus provides an opportunity for producing dairy ingredients with enhanced functional and organoleptic qualities. By freeze concentration, skim milk has been concentrated up to 40wt% total solids (TS) and whole milk up to 44wt% TS. Lactose and lipids are more concentrated in the ice fraction than in the concentrated fraction. Proteins (casein and whey protein) decrease the ice growth rate and the high viscosity is a limiting factor for the freeze concentration of both skim milk and whole milk. In this study, the most important studies relating to the suspension, block and layer freeze concentration of milk are summarized, analyzing results and indicating how freeze concentration process efficiency of dairy products can be improved.

Keywords: Freeze concentration, Dairy products, Whey, Skim milk, Whole milk.