

## بررسی انواع روش‌های فرایند تغليظ انجامدی در فرآورده‌های لبنی

محمدجواد ایوانی<sup>۱</sup>، سارا سهراب وندی<sup>۲</sup>، محسن عاطفی<sup>۱</sup>، آمنه نعمت‌اللهی<sup>۳</sup>

- ۱- کمیته تحقیقات دانشجویان، انسستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
۲- استادیار گروه تحقیقات صنایع غذایی، انسستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
۳- نویسنده مسئول: کمیته تحقیقات دانشجویان، انسستیتو 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

لغليظ انجامدی فرایندی است که با انجام بخشی از آب موجود در فرآورده و در مرحله بعد با حذف کريستال‌های يخ ايجاد شده سبب افزایش غلظت مواد غذایی مایع می‌شود. علت افزایش توجه به روش لغليظ انجامدی آن است که فرآورده‌های لبنی حاوی ترکیبات حساس به حرارت مانند پروتئین‌ها و عوامل ايجاد کننده‌ی عطر و طعم هستند. با اين حال لغليظ انجامدی فرآورده‌های لبنی دارای محدودیت‌ها و مشکلاتی نظير افزایش غلظت کازئین و پروتئین‌های آب پنیر، افزایش تدریجي غلظت و گرانروی شیر، کاهش سرعت رشد کريستال‌های يخ و افت قابل توجه چربی و لاكتوز طی فرایند است. بنابراین مقاله حاضر به بررسی انواع روش‌های لغليظ انجامدی در فرآورده‌های لبنی می‌پردازد.

**واژگان کلیدی:** پروتئین‌های آب‌پنیر، لغليظ انجامدی، لبنیات

### مقدمه

آب). روش يادشده با کمترین ميزان مصرف انرژی همراه است اما معایي نظير قيمت بالاي غشاها، هزينه بالاي نگهداري و نياز به تعويض و شست و شوي مداوم، استفاده از آن را محدود می‌کند (۵-۶).

لغليظ انجامدی (Cry concentration) "به دليل حفظ بيشينه مواد مغذي و مواد موثر در طعم و رايجه" يكی از با كيفيت ترين روش‌های لغليظ شناخته شده است. اما به دلایلی مانند مصرف انرژی و هزینه زياد دستگاهی، نياز به تميزکردن و نگهداري بيشتر در مقایسه با سایر روش‌ها نظير اسمز معکوس (Reverse osmosis) و تبخير (Evaporation) كمتر مورد استفاده قرار گرفته است. مشاهدات نشان می‌دهند که اين روش قابلیت‌هایي نظير انجام پدیده لغليظ بدون افزایش دما و قابلیت جداسازی ذرات با اندازه‌های مختلف (تا رسیدن به بيشينه ماده خشك محلول معادل ۰.۵٪) را دارد. لغليظ انجامدی در واقع نوعی فرایند آب‌زدي (Dehydration) به شمار می‌آيد که قابلیت نگهداري و پرهیزگاری های حسي و تغذیه‌ای مواد غذایی (به دليل اثر حفاظتی دمای پایین بر ویتامین‌ها، پروتئین‌های حساس

در فراوری مواد غذایی از پدیده لغليظ به طور گستردگی برای ايجاد کريستال، خشك کردن و پالايش غشایي (Filtration) استفاده می‌شود. در لغليظ مواد غذایي عواملی نظير کاهش ميزان انرژي مصرفی، نگهداري مواد مغذي و عطر و طعم اوليه ماده غذایي، افزایش کارايی فرایند و کاهش افت فرآورده از اهميت فراوانی برخوردار است (۱-۳). گستردگی و نياز فراوان به لغليظ، منجر به ايجاد و توسعه روش‌های مختلف به منظور لغليظ مواد غذایي شده است که از متداول ترين روش‌های موجود می‌توان به پدیده لغليظ با استفاده از تبخير اشاره نمود. روش تبخير علاوه بر مصرف نسبتاً زياد انرژي، سبب آسيب گرمایي به ماده غذایي و کاهش كيفيت فرآورده می‌شود؛ بنابراین برای فرآوری ترکیبات حساس به گرما مناسب نخواهد بود. با اين حال امكان دست‌يابي به غلظت‌های بالا (مواد جامد محلول بيش از ۰.۵٪) توسيط فرایند تبخير وجود دارد (۴). نيز به منظور لغليظ مواد غذایي می‌توان از روش پالايش غشایي استفاده نمود به طوری که با استفاده از غشاهاي خاص (با اندازه مناسب) لغليظ فرآورده انجام می‌شود (به دليل جداسازی

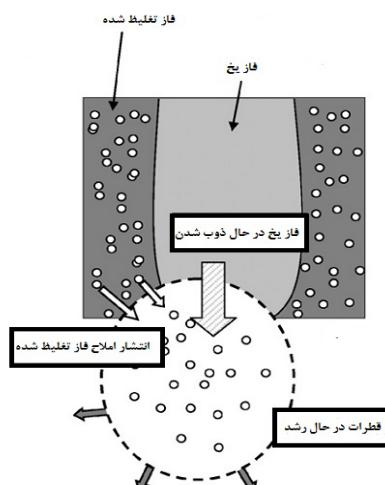
### انواع روش‌های تغليظ انجمادی

**تغليظ انجمادی پيش‌رونده (Progressive cryoconcentration):** طراحی اين روش به گونه‌ای است که از تشكيل کريستال‌های کوچک يخ جلوگيري کرده و منجر به تشكيل کريستال‌های بزرگ روی سطوح بسيار باريک مخازن کريستاله شدن (Crystalization vessels) (Crystallization vessels) می‌شود. از مزاياي اين روش می‌توان به سهولت فرآيند جdasازی و کاهش هزينه‌ها اشاره نمود (۱۹، ۳). اصول روش تغليظ انجمادی پيش‌رونده مختلف از ساير روش‌ها است (۱۸، ۱۷) و نوعی کريستاله شدن ذوبی بهشمار می‌آيد که با نوسانات متناوب دما، رشد کريستال‌ها را امكان‌پذير می‌نماید به‌طوری که با کاهش اوليه‌ی دما، کريستال‌هایی با اندازه‌های مختلف تشکيل می‌شوند و سپس تناوب‌های دمایی منجر به ذوب مجدد کريستال‌های کوچک و الحال آن‌ها به صورت ايجاد کريستال‌های بزرگ‌تر می‌شود (۲۰). در گذشته از اين روش برای تغليظ سوسپانسيون‌های دارای مواد معلق با اندازه کوچک و همين طور اهداف تجزيه‌ای استفاده شده است (۲۱). در شكل ۲ انواع روش‌های تغليظ انجمادی به طور خلاصه آورده شده است.

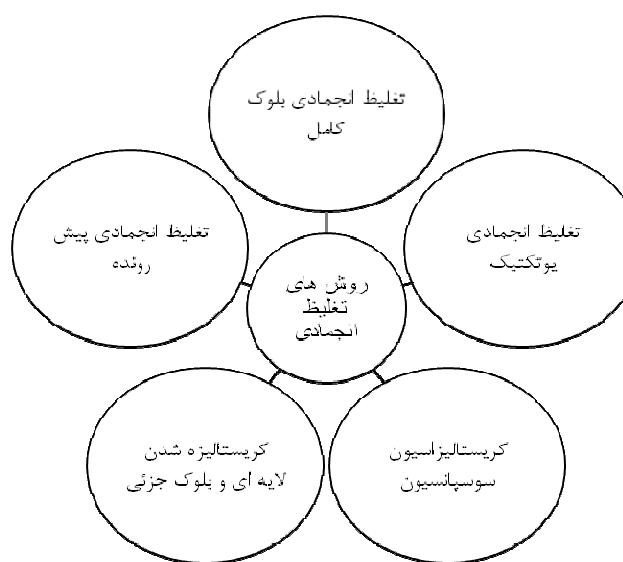
به گرما و پلي فنل‌ها) را دارد. نيز دمای پايین فرایند از رشد ميكروي جلوگيري نموده به‌طوری که اين موضوع سبب افزایش کيفيت فراورده می‌شود (۷، ۹-۱۳). تاکنون مطالعات زيادي در مورد فرایند تغليظ انجمادی و اثر آن بر تركيبات اصلی شير (پروتئين، لاكتوز و چربی) انجام شده است (۱۵، ۱۴). از ديدگاه ترموديناميکي، تغليظ انجمادی يك فرایند جdasازی بخش‌های جامد و مایع به‌شمار می‌آيد که بر اساس تفاوت در دمای کريستاله شدن سبب جdasازی مولکول‌ها از يك‌ديگر می‌شود (۱۶). نمای کلي تغليظ

انجمادی در شكل ۱ نشان داده است.

بنابراین در مقاله حاضر به بررسی انواع روش‌های تغليظ انجمادی در فراورده‌های لبنی پرداخته می‌شود.



شکل ۱. نمای کلي فرایند تغليظ انجمادی (۲)



شکل ۲. انواع روش‌های تغليظ انجمادی

سرعت حذف گرما و انتشار جرم (Mass diffusion) دارد (۲۹-۳۱)، به طوری که با افزایش سرعت حذف گرما و انتقال جرم در فرآورده، نرخ هسته‌زایی افزایش یافته و کریستال‌های کوچک تری تولید می‌شود، بنابراین به دلیل کاهش افت ماده موثر، بیشینه حفظ مواد رایج‌های وجود دارد. پژوهش‌هایی در مورد اثر تغليظ انجمادی بر میزان پروتئین‌ها و لاکتوز انجام شده است. گزارشات Best و Vasada (۱۹۹۳) در زمینه کارایی تغليظ انجمادی در تغليظ شیر پس چرخ (Skim milk)، شیر کامل (Whole milk)، پروتئین‌های آب پنیر و ماده باقی مانده پشت غشا (Permeate) نشان داد بیشترین غلظت به دست 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 ۲۶ مرتبط در زمان‌های تغليظ به ترتیب ۴۰، ۳۰، ۲۴ و ساعت بود. با توجه به این که 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 تغليظ دارد. احتمالاً کازئین، تراویده آب پنیر (Whey permeate) و لاکتوز کریستاله شده عوامل محدود کننده‌ای به منظور دست‌یابی به بیشینه غلظت در این روش هستند. نیز تعیین شد که گرانروی زیاد عامل مهمی در روش تغليظ انجمادی بلوك کامل به شمار می‌آید و با میزان تغليظ رابطه‌ی وارون دارد (۳۳).

Chung و Hartel در سال ۱۹۹۳ پژوهشی در مورد فرایند سردکردن نزدیک به دمای بحرانی قبیل 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).

**تغليظ انجمادی به روش کریستاله شدن لایه‌ای و بلوك**  
جزئی: این نوع تغليظ انجمادی، روش جدید و کارآمدی است که در سال ۲۰۰۷ توسط Aider و همکارانش با هدف بهبود تغليظ لاکتوسرم (Lacto serum) معرفی شد. اساس عمل اين نوع تغليظ، ورود سوسپانسیون مایع به يك محفظه‌ی کريستاله‌کننده (Crystallizer Chamber) مجهر به لوله‌های سرمزا است به طوری که کريستاله‌شدن به تدریج از مرکز محلول آغاز می‌شود (۱). با توجه به ضریب هدایت گرمایی بالای يخ نسبت به آب، با افزایش مقدار يخ در مرکز

تغليظ انجمادی يوتکتیک: به روسي گفته می‌شود که برای جداسازی نمک‌های غير آلی از محلول آبی از دماهای بسیار پایین استفاده می‌شود (۱۳). يوتکتیک يك محلول ناهمنگ، دمایی است که در آن دما، تمام اجزای محلول به حالت جامد است و هیچ جزء مایع وجود ندارد. میزان این دما به ترکیب، نوع و بر هم‌کنش مواد تشکیل دهنده بستگی دارد. در نقطه‌ی يوتکتیک آب آزاد وجود ندارد و از این رو دو عامل گرانش و تفاوت چگالی مواد محلول، نیروی حرکه جداسازی به شمار می‌آيد. مزایای این روش مصرف انرژی کم و خلوص بسیار بالا است (۲۲-۲۴).

**تغليظ انجمادی بلوك کامل** (Complete Block Cryoconcentration): در این روش پس از انجماد کامل ماده غذایی، يخ زدایی با کمک نیروی گرانشی (Gravitational-thawing assisted) 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، به طوری که سبب کاهش دمای ماده محبوس شده در يخ شد (۷). تغليظ انجمادی بلوك کامل روشی مناسب برای غذاهای مایع (به دلیل حفظ بیشینه مواد مغذی و ویژگی‌های حسی) است (۱، ۷، ۱۴).

**كريستاليزه شدن سوسپانسیونی** (Suspension crystallization): کريستاله شده سوسپانسیونی روش مناسبی به منظور تغليظ فرآورده‌های با اندازه‌ی بسیار کوچک مواد محلول به شمار می‌آید، زیرا تغليظ اين‌گونه مواد به دلیل حساسیت رایحه آن‌ها در سایر روش‌ها مشکل است. از آن‌جاکه این روش به دستگاه‌های پیچیده‌ای نظری تبادل گر حرارتی با سطح خراشند (برای تولید کريستال‌های اولیه)، مخازنی برای کريستاله شدن مجدد يخ (Recrystallization vessel for ice growth) و برج‌های شست‌وشو برای جداسازی بلورهای يخ نیاز دارد (۱، ۳، ۲۵).

كريستاله شدن سوسپانسیونی يك روش پرهزینه تغليظ انجمادی به شمار می‌آید. از این روش برای استخراج مواد با ارزش افزوده‌ی بالا نظری قهقهه استفاده می‌شود (۲۶).

اولین بار از روش کريستاله شدن انجمادی به منظور تغليظ مواد لبنی در آزمایشگاه استفاده شد و سپس به منظور بررسی راه کارهای افزایش سرعت رشد کريستال‌های يخ و بهینه‌سازی شرایط تغليظ انجمادی مورد توجه قرار گرفت (۲۷، ۲۸). نتایج اين پژوهش‌ها نشان دادند که سرعت هسته‌زایی و رشد کريستال‌ها ارتباط مستقیمی با

و تشابه سرعت جريان همرفت سبب توقف کريستاله شدن می شود.

از اين روش برای تغليظ شير، شربت‌ها و استخراج تركيبات معطر از انگور استفاده می‌شود.<sup>(۸)</sup>

**انجماد زدایي:** انجماد زدایي بخش مهمی از فرایند تغليظ انجمادي است که به روش‌های مختلفي انجام می‌شود. يکی از بهترین روش‌های انجماد زدایي "انجماد زدایي به کمک مايكرويو" است. اهمیت اين روش به دليل کارابی آن به منظور تغليظ پروتئين و مواد جامد حاوي رطوبت کم است. با اين حال، انجماد زدایي به کمک مايكرويو تاثير منفی بر برخی پروتئين‌های مواد غذائي دارد، به طوری که تجمع تراكمی پروتئين‌ها مخصوصاً بتلاكتوگلوبولين و آلفا لاكتوبومين (داراي خاصيت کف‌کنندگی و امولسيفارى) را تقويت کرده و موجب دنا توره شدن آن‌ها می‌شود. نيز، افزایش غلظت یون پتاسيم حین جداسازی سبب تشديد دنا توراسيون اين دو نوع پروتئين می‌شود. به همين دليل استفاده از روش مايكرويو همراه با ساير روش‌ها مانند به کارگيري نيري گرانش يا گريز از مرکز می‌تواند سبب کاهش افت مواد محلول در اين مرحله شده و کارابي فرایند را تا حد زیادي افزایش دهد.<sup>(۱۴)</sup>

در جدول ۱ انواع روش‌های تغليظ انجمادي، ويژگی‌ها و کاربردهای آن‌ها به طور خلاصه آورده شده است.

فرآورده، سرعت کريستاله شدن هم به تدریج افزایش خواهد یافت. در اين روش مقدار کل مواد جامد محلول می‌تواند به ۳۵٪ بر پایه وزن مرتبط (يعني اندکی کمتر از آن‌چه که در کريستاله شدن سوسپانسيوني گزارش شد) برسد. در آزمایشات مشاهده شد چنان‌چه تغليظ بيشه از حد (برای رسیدن به درصد بالاتری از ماده خشک محلول) انجام پذيرد مقدار پروتئين بهطور ناگهاني افزایش (به ميزان ۱۹/۸۷٪ بر پایه وزن مرتبط) می‌يابد. دانسته شده است پروتئين‌های آب‌پنير توسيعي زيادي در ايجاد پيوندهای هيذرۇزنى با مولکول‌های آب دارند. بنابراین با افزایش غلظت پروتئين‌ها، مقدار آب قابل انجماد کاهش يافته و طی فرایند جداسازی فاز مایع غلبيظتر می‌شود، نيز فاز يخ زده غنى از پروتئين باقى خواهد ماند. اين نتيجه ضعف بزرگی برای روش کريستاله شدن لايهاي و بلوك جزئي به حساب می‌آيد ولی با تنظيم کمی مقدار فرآورده مورد استفاده به منظور انجماد زدایي، می‌توان افت فرآورده را کاهش داد.<sup>(۳۴، ۳۵)</sup>

مواردی نظير "کاهش افت ماده خشک هنگام جداسازی فازهای با چگالی متفاوت" و "کارابي مطلوب‌تر در انتقال دما در لايه‌ی مرزی" از ويژگی‌های اين روش به حساب می‌آيد. مشخص شده است هر چه تفاوت چگالی‌های مواد تغليظ شده بيشتر باشد، جداسازی كامل‌تر و آسان‌تر انجام می‌شود. در اين روش يكسان‌شدن غلظت مواد در بخش مایع و جامد

جدول ۱. ويژگی‌ها و کاربرد انواع روش‌های تغليظ انجمادي

روش	ويژگی	كاربرد	منبع
تغليظ انجمادي پيش روته	تشكيل و جداسازی آسان کريستال‌ها / هزينه کمتر	تغليظ محصولات داراي مواد محلول	۱۷-۲۱
تغليظ انجمادي يوتکتิก	صرف انرژي کم / خلوص بسيار بالا / توزيع يكسان اندازه ذرات	جدا سازی نمک‌های غير آلي از محلول آبی	۱۳
تغليظ انجمادي بلوك كامل	حفظ مواد مغذی و ويژگی‌های حسي	تغليظ غذاهای مایع	۱، ۷، ۱۴
کريستاله شدن سوسپانسيوني	پرهزينه‌ترین روش	استخراج مواد با ارزش افزوده بالا مانند قهقهه	۲۵، ۲۶
تغليظ انجمادي به روش کريستاله	کاهش درصد افت ماده خشک هنگام جداسازی فازها با چگالی متفاوت / کارابي بالاتر و بهتر در انتقال دما در لايه مرزی	تغليظ شير، شربت‌ها و استخراج تركيبات آروماتيك از انگور	۸

به طور کلی در شیر پس چرخ و شیر کامل، روش کریستاله‌شدن سوسپانسیونی نسبت به روش تغليظ انجمادی بلوک جزئی، کارامدتر و راندمان تغليظ آن بالاتر است. در نهايٰت حفظ ارزش بیولوژی، تغذیه‌ای و کيفیت پروتئین طی تولید و نگهداری فرآورده از مهم‌ترین فاكتورها به شمار می‌آيند.

برای افزایش کارایی اين فرایند بهتر است از روش‌های با صرفه اقتصادی بیشتر، به منظور بازیابی مجدد یخ استفاده شود تا حداقل افت مواد جامد به دست آيد، 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 تغليظ انجمادی انجام شود.

### سپاسگزاری

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

### نتیجه‌گیری

افزایش میزان تشکیل کریستال‌ها و دست‌یابی به شرایط تعادل گرمایی بهینه (به منظور آسان‌تر کردن جداسازی)، بحث اصلی در تغليظ انجمادی مواد غذایی به‌ویژه فرآورده‌های لبنی است، به طوری که فرایند تغليظ انجمادی در کم‌ترین زمان و هزینه‌ی ممکن انجام شود. موضوع مهم دیگر رابطه مهم تاثیر ترکیب ماده‌ی غذایی (يعني مقدار افت کازئین و پروتئین‌های آب پنیر) بر مراحل تغليظ انجمادی است. بنابراین کاربرد اين روش با توجه به مقدار بالای لاكتوز و چربی در بخش منجمد (بیشتر از فاز محلول غليظ شده) ماده‌ی غذایی، سبب افت فرآورده می‌شود. نيز دانسته شده است که گرانروی زياد و غلطت بالاي کازئين نوعی عامل محدودکننده برای تغليظ انجمادی انواع محصولات لبنی به شمار می‌آيند و غلطت پروتئین‌های آب پنیر شير داري رابطه وارون با سرعت رشد یخ است، به‌طوری که با افزایش غلطت آن‌ها، سرعت رشد کریستال‌ها کاهش می‌يابد.

## 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, Aulesta 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.
- Jiraratananon 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.
- Shafiu 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 KNO<sub>3</sub>-HNO<sub>3</sub> 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 multiplate 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 MJ<sup>1</sup>, Sohrabvandi S<sup>2</sup>, Atefi M<sup>1</sup>, Nematollahi A<sup>\*3</sup>

- 
- 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.