



تحلیل نقش درصد استخراج آرد در بهبود یا تضعیف ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خمیر

منجمد

امید میرزایی تاش^۱

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد ممقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ممقان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: dr.omidmirzaei@gmail.com

خلاصه

این مقاله مروری با تمرکز بر نقش درصد استخراج آرد در تعیین ویژگی‌های خمیر منجمد، به بررسی ارتباط میان ترکیب شیمیایی آرد و رفتار فیزیکی آن در فرآیند انجماد می‌پردازد. درصد استخراج، که نشان‌دهنده نسبت وزنی اجزای باقی‌مانده دانه گندم پس از عملیات آسیاب و الک کردن است، شاخصی بنیادی در تعیین کیفیت آرد محسوب می‌شود و مستقیماً بر میزان سبوس، خاکستر، چربی، فیبر و در نتیجه بر رفتار رئولوژیک خمیر اثر می‌گذارد. با افزایش درصد استخراج، سهم ترکیبات غیرنشاسته‌ای مانند فیبر و مواد معدنی افزایش یافته و به دنبال آن، ویژگی‌هایی نظیر قابلیت جذب آب، توسعه شبکه گلوتن، و ظرفیت نگهداری گاز در خمیر دچار تغییر می‌شود. در شرایط انجماد، این تغییرات ترکیبی با الگوی تشکیل و رشد بلورهای یخ، بازتوزیع آب، تخریب ساختار پروتئینی و تغییر رفتار آنزیمی در خمیر همراه است. مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که درصد استخراج بالا معمولاً باعث افزایش جذب آب، خاکستر و فیبر شده اما در عین حال، انسجام شبکه گلوتنی و قابلیت امتزاج اجزای خمیر را کاهش می‌دهد؛ این مسئله در نهایت به افت حجم نان، کاهش فعالیت تخمیری مخمر و کاهش کیفیت نان حاصل از خمیر منجمد منجر می‌شود. در سوی دیگر، برخی ترکیبات محلول در سبوس از جمله آرابینوگزیلان‌ها، پلی‌ساکاریدهای ضدیخ و ویتامین‌های گروه B می‌توانند اثرات منفی فرایند انجماد را تعدیل کنند و پایداری ساختار خمیر را بهبود بخشند. به منظور کاهش اثرات نامطلوب افزایش درصد استخراج، استفاده از آنزیم‌های اصلاح‌کننده فیبر، امولسیفایرها، کریوپروتکتانت‌ها و روش‌های بهینه‌سازی نرخ انجماد پیشنهاد شده است. افزون بر این، راهبردهایی نظیر پیش‌مرطوب‌سازی سبوس یا به‌کارگیری فناوری‌های نوین نگهداری، مانند انجماد سریع و بسته‌بندی فعال، می‌توانند نقش موثری در حفظ کیفیت خمیر و افزایش طول عمر مفید آن داشته باشند. در پایان، مقاله بر نیاز به انجام مطالعات جامع‌تر و نظام‌مند برای تعیین آستانه‌های بهینه درصد استخراج در تولید محصولات نانی منجمد و درک دقیق‌تر از تعاملات بین اجزای آرد، فرایند انجماد و افزودنی‌ها تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: سبوس، درصد استخراج آرد، امولسیفایر، خمیر منجمد، جذب آب، ساختار گلوتن.



۱. مقدمه

درصد استخراج آرد (RE) یکی از شاخص‌های بنیادین در ارزیابی کیفیت آرد و تعیین عملکرد نهایی محصولات نانی به‌شمار می‌آید. این شاخص، نسبت وزنی بخشی از دانه گندم است که پس از فرایند آسیاب و عبور از الک به آرد نهایی وارد می‌شود و از نظر علمی معیاری برای سنجش میزان استفاده از اجزای مختلف دانه در آرد تولیدی است. در عمل، هرچه درصد استخراج بیشتر باشد، مقدار بیشتری از پوسته، سبوس و جوانه در آرد باقی می‌ماند که موجب افزایش میزان مواد معدنی، فیبر خام، خاکستر و ترکیبات زیست‌فعال می‌شود؛ در مقابل، درصدهای استخراج پایین‌تر منجر به تولید آردهای سفیدتر و با محتوای سبوس کمتر می‌گردند [۱، ۲].

اهمیت این پارامتر تنها به بازده آسیاب محدود نمی‌شود، بلکه مستقیماً با ترکیب شیمیایی، رفتار فیزیکی و قابلیت عملکردی آرد در ارتباط است. تغییر در میزان پروتئین‌ها، فیبرهای غذایی، مواد معدنی و چربی‌ها در اثر تغییر درصد استخراج، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های عملکردی آرد از جمله توانایی جذب آب، تشکیل شبکه گلوتهنی، رفتار رئولوژیکی خمیر، ظرفیت نگهداری گاز و کیفیت نهایی نان دارد [۳]. به بیان دیگر، درصد استخراج آرد نه تنها عامل مؤثر بر ویژگی‌های تغذیه‌ای است، بلکه به عنوان پارامتری کلیدی در کنترل کیفیت فنی و بافتی نان و فرآورده‌های آردی شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، با رشد تقاضا برای محصولات فرآوری شده و نیمه‌آماده، توجه ویژه‌ای به تأثیر درصد استخراج آرد در فرمولاسیون خمیرهای منجمد جلب شده است. خمیر منجمد به دلیل امکان نگهداری طولانی‌مدت، سهولت در حمل‌ونقل و حفظ کیفیت در زنجیره تأمین، به یکی از فناوری‌های کلیدی صنعت نانوایی تبدیل شده است. این فناوری نه تنها انعطاف‌پذیری تولید را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش ضایعات و هزینه‌های عملیاتی، بهره‌وری سیستم‌های تولیدی را بهبود می‌بخشد [۴-۶].

با این حال، فرایند انجماد و نگهداری در دمای پایین با چالش‌های فنی قابل توجهی همراه است. از جمله، انجماد می‌تواند منجر به کاهش زنده‌مانی سلول‌های مخمر، تضعیف پیوندهای شبکه گلوتهنی، کاهش خاصیت کشسانی خمیر و افت حجم نان پخته‌شده شود [۷]. شدت این تغییرات تا حد زیادی به ترکیب آرد مورد استفاده و به‌ویژه درصد استخراج آن بستگی دارد؛ زیرا حضور مقادیر بالاتر سبوس و ترکیبات فیبری، رفتار آب در خمیر را تغییر داده و فرایند تشکیل بلورهای یخ را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵، ۸]. به‌علاوه، ترکیبات بیوشیمیایی سبوس مانند آرابینوگزیران‌ها، لیگنین و ویتامین‌های محلول در آب، می‌توانند نقش دوگانه‌ای ایفا کنند؛ برخی از آن‌ها در نقش عوامل محافظ* از ساختار خمیر در برابر آسیب‌های انجماد محافظت می‌کنند، در حالی که برخی دیگر ممکن است به دلیل افزایش ویسکوزیته و تغییر اسمولالیتیه، تأثیرات منفی بر ساختار گلوتهن بگذارند. از این‌رو، شناخت سازوکار دقیق اثر درصد استخراج بر ویژگی‌های خمیر منجمد، از جنبه علمی و صنعتی اهمیت بسیاری دارد. با افزایش گرایش صنایع غذایی به تولید محصولات سبوس‌دار و غنی از فیبر و نیز رشد بازار نان‌های سلامت‌محور، توجه به این پارامتر بیش از پیش ضروری است. بررسی نظام‌مند مطالعات موجود می‌تواند راهگشای طراحی فرمولاسیون‌های نوین و بهینه‌سازی شرایط فرایند برای حفظ کیفیت در خمیرهای منجمد باشد [۹، ۱۰].

بر همین اساس، این مقاله مروری با هدف تحلیل جامع یافته‌های پژوهشی در خصوص اثر درصد استخراج آرد بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و عملکردی خمیر منجمد تنظیم شده و می‌کوشد تصویری منسجم از تعامل میان ترکیبات آرد و پایداری خمیر در طی فرایند انجماد ارائه دهد.

* - cryoprotectant



۲. روش جستجوی منابع

به منظور تدوین این مقاله مروری، جستجوی نظام‌مند و فراگیری در پایگاه‌های علمی معتبر شامل PubMed/PMC، Google، Web of Science، Taylor & Francis Online، Wiley Online Library، SpringerLink، Scopus، ScienceDirect، Scholar تا پایان مهرماه ۱۴۰۴ انجام گرفت. در این جستجو، از مجموعه‌ای از کلیدواژه‌ها و عبارات مرتبط نظیر «flour extraction rate»، «extraction rate of wheat flour»، «bran content and dough properties»، «frozen dough quality»، «ice crystal formation»، «fiber enrichment wheat flour»، «cryoprotectants frozen bakery»، «arabionoxylan frozen dough»، «whole wheat frozen bread»، «frozen dough fermentation stability»، «dough flour ash content and gluten network» و «frozen dough quality» استفاده شد. برای دستیابی به گستره وسیع‌تری از مطالعات، از عملگرهای منطقی AND و OR جهت ترکیب واژگان و نیز از محدودکننده‌هایی همچون بازه زمانی انتشار بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ و زبان‌های انگلیسی و فارسی بهره گرفته شد. علاوه بر مقالات علمی چاپ‌شده در مجلات معتبر، پایان‌نامه‌های دانشگاهی، گزارش‌های صنعتی و کتاب‌های مرجع نیز در فرایند بررسی لحاظ شدند تا جامعیت داده‌ها افزایش یابد.

انتخاب منابع بر اساس معیارهای مشخصی صورت گرفت که شامل مرتبط بودن مستقیم یا غیرمستقیم پژوهش‌ها با موضوع درصد استخراج آرد، اثرات سبوس یا فیبر بر ویژگی‌های خمیر و خمیر منجمد، وضوح روش‌شناسی، اعتبار داده‌ها و وجود تحلیل آماری مناسب بود. اولویت در انتخاب با مقالات تجربی و مروری جامع دارای متن کامل یا دسترسی آزاد بود. همچنین در مواردی که پژوهش‌ها به بررسی اثرات افزودنی‌های اصلاح‌کننده، آنزیم‌ها، امولسیفایرها یا فناوری‌های نوین انجماد پرداخته بودند، با توجه به ارتباط غیرمستقیم با پایداری خمیر منجمد، در تحلیل نهایی گنجانده شدند. برای اطمینان از دقت و کاهش سوگیری در انتخاب منابع، جستجو و ارزیابی مقالات در دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست، عنوان و چکیده مقالات بررسی و مطالعات غیرمرتبط حذف گردید و در مرحله دوم، متن کامل مقالات منتخب مطالعه و تحلیل شد. در مجموع، از میان بیش از ۱۱۵ مقاله اولیه شناسایی شده، حدود ۴۲ منبع علمی با بیشترین ارتباط موضوعی و کیفیت پژوهشی برای تدوین این مقاله انتخاب گردید. داده‌های استخراج‌شده از منابع معتبر در قالب چند محور اصلی مورد تحلیل قرار گرفتند که شامل تأثیر درصد استخراج بر ترکیب شیمیایی آرد، تغییرات رئولوژیکی خمیر، رفتار آب و یخ‌زدگی در خمیرهای منجمد، اثر فیبر و سبوس بر پایداری شبکه گلوتن و تخمیر، و نقش افزودنی‌ها و فناوری‌های بهبوددهنده در حفظ کیفیت خمیر منجمد بود. بنابراین، روش به‌کاررفته در این مقاله رویکردی تحلیلی داشته و فراتر از گردآوری اطلاعات، بر تبیین روابط علمی و فناوری میان درصد استخراج آرد و پایداری خمیر منجمد متمرکز بوده است. این رویکرد جامع زمینه‌ساز درک بهتر اثرات هم‌افزای ترکیبات آرد، شرایط انجماد و افزودنی‌ها در حفظ کیفیت محصولات نانی منجمد می‌باشد.

۳. درصد استخراج آرد

درصد استخراج آرد به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین‌کننده کیفیت و بازده آسیاب، نشان‌دهنده نسبتی از جرم دانه گندم است که پس از فرآیند آسیاب و الک، در آرد نهایی باقی می‌ماند. به بیان دیگر، این پارامتر مشخص می‌کند چه بخشی از دانه گندم در محصول نهایی حضور دارد و چه میزان از پوسته، سبوس و جوانه طی فرآیند جداسازی حذف می‌شود. در صورتی که تمامی اجزای دانه شامل پوسته، لایه آلرون، سبوس و جوانه در آرد وجود داشته باشند، محصول حاصل آرد کامل با استخراج صد درصد خواهد بود. در مقابل، آردهای سفید معمول صنعتی که بخش عمده‌ای از سبوس و جوانه آن‌ها جدا می‌شود، معمولاً درصد استخراجی در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد دارند. این دامنه به نوع گندم، روش آسیاب (سنگی، غلطکی یا ترکیبی) و استانداردهای ملی یا صنعتی وابسته است [۱، ۱۱].



افزایش درصد استخراج سبب می‌شود که سهم بیشتری از لایه‌های بیرونی دانه شامل سبوس و جوانه در آرد باقی بماند و این امر موجب افزایش محتوای فیبر غذایی، خاکستر، مواد معدنی، چربی‌ها و ترکیبات زیست‌فعال همچون ویتامین‌های گروه B، توکوفرول‌ها، پلی‌فنول‌ها و کاروتنوئیدها می‌شود [۱۲، ۱۳]. در نتیجه، آردهایی با درصد استخراج بالا از ارزش تغذیه‌ای بیشتری برخوردارند و غنی‌تر از نظر مواد آنتی‌اکسیدانی محسوب می‌شوند. با این حال، حضور اجزای سبوس‌دار به‌ویژه ترکیبات فنولیک و رنگدانه‌ها موجب تغییر رنگ آرد به سمت تیرگی می‌شود، به طوری که آردهای با درصد استخراج بالا رنگ زرد مایل به قهوه‌ای پیدا می‌کنند. این مسئله از منظر بازار و پذیرش مصرف‌کننده در برخی کشورها چالش‌برانگیز است، زیرا مصرف‌کنندگان اغلب آرد سفید با رنگ روشن را به عنوان شاخص کیفیت در نظر می‌گیرند [۲، ۱۴].

افزایش درصد استخراج نه تنها ترکیب شیمیایی آرد را تغییر می‌دهد، بلکه بر ویژگی‌های عملکردی آن نیز اثرگذار است. مقدار بالاتر سبوس باعث افزایش جذب آب در آرد و خمیر می‌شود که به دلیل وجود فیبرهای هیدروفیل و ترکیبات پنتوزانی است. این ویژگی اگرچه می‌تواند رطوبت محصول را در طی فرآوری افزایش دهد، اما در برخی موارد موجب کاهش توسعه شبکه گلوتن و تضعیف ساختار خمیر می‌شود. به همین دلیل، انتخاب درصد استخراج مناسب بسته به نوع محصول و فناوری فرآوری از اهمیت بالایی برخوردار است. در نان‌های صنعتی نرم و حجیم، معمولاً از آردهای با درصد استخراج پایین‌تر (۷۰ تا ۷۵ درصد) استفاده می‌شود تا ساختار گلوتنی قوی‌تری ایجاد گردد و حجم نان افزایش یابد. در مقابل، در تولید نان‌های سبوس‌دار، محصولات سلامت‌محور و نان‌های سنتی، آردهایی با درصد استخراج بالا (۸۵ تا ۹۵ درصد) یا حتی آرد کامل ترجیح داده می‌شوند تا ارزش تغذیه‌ای محصول افزایش یابد، هرچند این انتخاب ممکن است به افت نسبی در کیفیت فناوری پخت منجر شود [۱، ۵، ۹، ۱۰].

از دیدگاه فنی، ترکیبات موجود در آردهای با درصد استخراج بالا، به‌ویژه فیبرها و مواد معدنی، می‌توانند با پروتئین‌های گلوتنی و نشاسته تعامل برقرار کرده و در نتیجه رفتار رئولوژیکی خمیر را تغییر دهند. فیبرهای محلول مانند آرابینوگزیلان‌ها قابلیت افزایش گرانیروی فاز آبی خمیر را دارند و با محدود کردن جابجایی آب آزاد، می‌توانند در پایداری ساختار خمیر و حتی کنترل فرآیند انجماد نقش مثبت ایفا کنند. در مقابل، فیبرهای نامحلول ممکن است با اختلال در پیوندهای گلوتنی و کاهش خاصیت کشسانی خمیر، بر کیفیت بافت نان اثر منفی بگذارند. علاوه بر این، درصد استخراج بالا معمولاً با افزایش میزان خاکستر همراه است که نشانگر غلظت بالاتر مواد معدنی است؛ این مواد معدنی می‌توانند بر بار یونی خمیر اثر گذاشته و خصوصیات فیزیکی شیمیایی آن را تغییر دهند [۱۵-۱۸].

در سال‌های اخیر، گرایش روزافزونی به استفاده از آردهای با درصد استخراج بالا به دلیل خواص تغذیه‌ای، فیبر بیشتر و حضور ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مشاهده می‌شود. هم‌زمان، توسعه فناوری‌های نوین فرآوری مانند آسیاب ملایم، الک‌های هوشمند و روش‌های ترکیبی خشک و مرطوب این امکان را فراهم کرده‌اند که آردهایی با درصد استخراج بالا اما کیفیت فناوری قابل قبول تولید شوند. از سوی دیگر، با افزایش مصرف محصولات نانی منجمد و نیمه‌آماده، درک اثرات درصد استخراج آرد بر پایداری خمیر در شرایط انجماد به موضوعی کلیدی در پژوهش‌های اخیر تبدیل شده است [۶، ۱۹]. به طور کلی می‌توان گفت درصد استخراج آرد پارامتری چندوجهی است که هم جنبه‌های تغذیه‌ای و هم جنبه‌های فنی تولید نان را تعیین می‌کند. درک دقیق دامنه‌های بهینه استخراج برای کاربردهای مختلف نه تنها موجب بهبود کیفیت محصول نهایی می‌شود، بلکه به افزایش بهره‌وری در فرایندهای صنعتی و تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت غلات کمک خواهد کرد.



۴. خمیر منجمد

خمیر منجمد به عنوان یکی از دستاوردهای نوین فناوری نانویی، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت تولید نان و فرآورده‌های آردی پیدا کرده است. این نوع خمیر پس از انجام مراحل اولیه تولید شامل اختلاط مواد اولیه، ورز دادن، شکل‌دهی و در برخی موارد تخمیر اولیه، در دماهای بسیار پایین معمولاً بین ۱۸- تا ۳۰- درجه سلسیوس منجمد و در همین شرایط برای مدت طولانی نگهداری می‌شود. در زمان مصرف، خمیر از حالت انجماد خارج شده، پس از طی دوره تخمیر نهایی و رسیدن به حجم مناسب، وارد مرحله پخت می‌گردد [۵، ۲۰، ۲۱].

توسعه فناوری خمیر منجمد با هدف افزایش عمر ماندگاری، تسهیل زنجیره توزیع، کاهش ضایعات و امکان تولید متمرکز در مقیاس صنعتی انجام شده است. این روش به تولیدکنندگان اجازه می‌دهد تا خمیر نان را در شرایط کاملاً کنترل شده صنعتی تهیه کرده و آن را بدون افت کیفیت به مراکز فروش، رستوران‌ها و نانوبی‌ها منتقل کنند. به این ترتیب، یکنواختی در کیفیت محصول، صرفه‌جویی در زمان و هزینه، و افزایش انعطاف‌پذیری در زمان‌بندی تولید و پخت حاصل می‌شود [۲۲-۲۴]. افزون بر این، استفاده از خمیر منجمد با کاهش نیاز به عملیات روزانه تهیه خمیر تازه، امکان تولید نان با کیفیت ثابت و مطابق با استانداردهای صنعتی را فراهم می‌سازد.

فرآیند تولید خمیر منجمد معمولاً شامل چند مرحله کلیدی است. ابتدا ترکیبات اصلی شامل آرد، آب، نمک، شکر، مخمر، چربی و افزودنی‌های بهبوددهنده مانند آنزیم‌ها، امولسیفایرها و مواد هیدروکلوئیدی با دقت مخلوط می‌شوند تا شبکه گلوتنی یکنواختی ایجاد شود. سپس بسته به نوع محصول، ممکن است مرحله‌ای از تخمیر اولیه انجام گیرد. در مرحله بعد، خمیر فرم‌دهی شده و وارد سیستم‌های انجماد سریع (IQF)* می‌شود تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن به دمای انجماد برسد. پس از تثبیت ساختار، خمیرها در فریزرهای صنعتی با دمای کنترل شده نگهداری می‌شوند تا از رشد بلورهای یخ بزرگ جلوگیری شود. در زمان مصرف، خمیر پس از رفع انجماد و تخمیر نهایی، در دمای استاندارد پخته می‌شود [۴، ۲۳، ۲۵، ۲۶]. با وجود مزایای فراوان، فناوری خمیر منجمد با چالش‌هایی نیز همراه است. مهم‌ترین این چالش‌ها مربوط به تغییرات فیزیکیوشیمیایی در ساختار خمیر طی فرآیند انجماد و ذوب است. تشکیل و رشد بلورهای یخ در ماتریس خمیر می‌تواند موجب پارگی شبکه گلوتنی، کاهش خاصیت کشسانی، و افت توانایی نگهداری گاز شود که در نهایت به کاهش حجم نان پس از پخت منجر می‌گردد. از سوی دیگر، انجماد می‌تواند به سلول‌های مخمر آسیب رسانده و زنده‌مانی آن‌ها را کاهش دهد، زیرا بلورهای یخ ممکن است به دیواره سلولی مخمر نفوذ کرده و ساختار آن را تخریب کنند [۲۶، ۲۷].

علاوه بر این، فرآیند انجماد منجر به بازتوزیع آب درون خمیر می‌شود؛ بخشی از آب به حالت یخ درمی‌آید و بخش دیگر در ماتریس پروتئینی باقی می‌ماند. این تغییر در تعادل آب، بر فعالیت آنزیم‌ها و ساختار شبکه گلوتن تأثیر می‌گذارد و در نهایت کیفیت بافت، حجم و نرمی مغز نان را کاهش می‌دهد. یکی دیگر از چالش‌های این فناوری، هزینه بالای تجهیزات سرمایشی و انرژی مورد نیاز برای نگهداری در دمای پایین است که می‌تواند در مقیاس صنعتی محدودیت‌هایی ایجاد کند [۲۶، ۲۷].

برای غلبه بر اثرات منفی انجماد، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. از جمله، استفاده از مخمرهای مقاوم به سرما، افزایش نسبت مخمر در فرمولاسیون، افزودن پروتئین گلوتنی جهت تقویت شبکه ساختاری، و استفاده از امولسیفایرها برای حفظ پایداری حباب‌های گاز و یکنواختی بافت خمیر از جمله راهکارهای رایج هستند. همچنین، افزودن هیدروکلوئیدهایی

* - Individual Quick Freezing



مانند زانتان گام، گوار گام و کاراگینان می‌تواند در حفظ رطوبت، جلوگیری از جدایش فازها و بهبود بافت خمیر نقش مؤثری ایفا کند [۶, ۲۲].

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به استفاده از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی و فناوری‌های نوین برای بهبود کیفیت خمیر منجمد معطوف شده است. بهره‌گیری از پلی‌ساکاریدهای جلبکی، فیبرهای محلول، پلاسما سرد، بسته‌بندی فعال و نانوکامپوزیت‌های ضد میکروبی از جمله نوآوری‌های جدید در این حوزه است. هدف اصلی این رویکردها، افزایش پایداری خمیر منجمد، حفظ ارزش تغذیه‌ای و جلوگیری از افت کیفیت حسی نان در طول دوره نگهداری است. همچنین، فناوری انجماد فوق‌سریع* با استفاده از گازهای مایع مانند نیتروژن یا دی‌اکسید کربن توانسته است آسیب‌های ساختاری ناشی از تشکیل بلورهای یخ را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و بافت خمیر را به حالت اولیه نزدیک‌تر نگه دارد. به طور کلی، فناوری خمیر منجمد با وجود چالش‌های فنی، نقشی کلیدی در توسعه صنعتی تولید نان‌های آماده و نیمه‌آماده ایفا می‌کند و فرصت‌هایی برای بهبود بهره‌وری، پایداری و سلامت محصولات نانی فراهم آورده است. پژوهش‌های آینده در این حوزه باید بر بهینه‌سازی ترکیب آرد، نرخ انجماد، و استفاده از ترکیبات محافظ طبیعی متمرکز شوند تا ضمن حفظ کیفیت محصول، هزینه‌های انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی نیز کاهش یابد [۶, ۱۹, ۲۰, ۲۲, ۲۳].

۵. تأثیر درصد استخراج آرد بر خصوصیات خمیر منجمد

درصد استخراج آرد، به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در تعیین کیفیت فنی و تغذیه‌ای محصولات نانی، نقشی بسیار مهم در رفتار و پایداری خمیر منجمد ایفا می‌کند. تأثیر این پارامتر بر خمیر منجمد را می‌توان از چند منظر اساسی شامل جذب آب، ساختار گلوتن، رفتار مخمر و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حین انجماد مورد بررسی قرار داد. در گام نخست، افزایش درصد استخراج معمولاً با افزایش محتوای سبوس، فیبر و مواد معدنی در آرد همراه است. حضور این ترکیبات باعث بالا رفتن ظرفیت جذب آب می‌شود، زیرا فیبرهای غذایی و پلی‌ساکاریدهای موجود در سبوس، تمایل بالایی به جذب و نگهداری آب دارند. این امر موجب افزایش آب پیوندی و کاهش میزان آب آزاد در خمیر می‌شود. از آنجا که تشکیل و رشد بلورهای یخ در طی فرایند انجماد عمدتاً در فاز آب آزاد رخ می‌دهد، کاهش این بخش از آب می‌تواند الگوی انجماد را تغییر داده و اندازه بلورهای یخ را تحت تأثیر قرار دهد. در آردهای با درصد استخراج بالا، آب در شبکه فیبری محبوس می‌شود و توزیع ناهمگن بلورهای یخ می‌تواند منجر به آسیب‌های ساختاری در گلوتن و کاهش یکنواختی بافت خمیر گردد [۳, ۱۹, ۲۰, ۲۲, ۲۸].

عامل دوم به نقش شبکه گلوتنی و تعامل آن با ذرات سبوس مربوط می‌شود. در آردهای با درصد استخراج بالا، ذرات سبوس به‌صورت فیزیکی در ساختار خمیر پراکنده‌اند و به‌طور مستقیم در تداوم و انسجام شبکه گلوتنی اختلال ایجاد می‌کنند. این ذرات مانند موانع مکانیکی در میان رشته‌های گلوتن عمل کرده و از شکل‌گیری ساختار پیوسته و انعطاف‌پذیر جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، خمیر حاصل دارای خاصیت کشسانی کمتر و حساسیت بیشتری نسبت به تنش‌های مکانیکی ناشی از انجماد و ذوب می‌باشد. در طی فرایند انجماد، پارگی شبکه گلوتن و تخریب پیوندهای پروتئینی باعث افت توانایی خمیر در نگهداری گاز و کاهش حجم نهایی نان می‌شود. علاوه بر این، حضور ترکیبات فنولیک در سبوس ممکن است با گروه‌های سولفیدریل پروتئین‌های گلوتنی واکنش داده و از تشکیل پیوندهای دی‌سولفیدی مؤثر در پایداری شبکه جلوگیری کند [۵, ۲۳, ۲۶, ۲۷, ۲۹].

* - Cyogenic Freezing



سومین جنبه مربوط به اثر درصد استخراج بر زنده‌مانی و فعالیت سلول‌های مخمر است. ترکیبات موجود در آردهای با استخراج بالا مانند پلی‌فنول‌ها، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و املاح معدنی می‌توانند شرایط اسمزی محیط خمیر را تغییر داده و بر پایداری غشای سلولی مخمر تأثیر بگذارند. اگرچه برخی از این ترکیبات مانند آرابینوگزیران‌های محلول ممکن است به‌عنوان عوامل محافظ عمل کرده و مقاومت سلول‌ها در برابر سرما را افزایش دهند، اما حضور بیش از حد مواد فیبری نامحلول و ترکیبات فنولیک اکسیدکننده می‌تواند اثر معکوس داشته و منجر به آسیب به سلول‌های مخمر در زمان انجماد شود. این تغییرات اغلب موجب کاهش توان گازدهی و کندی تخمیر پس از رفع انجماد می‌گردد، که به‌صورت کاهش حجم نان و تغییر در بافت داخلی محصول بروز می‌یابد [۲۲، ۳۰-۳۳].

از منظر فیزیکوشیمیایی، تغییر در درصد استخراج آرد همچنین بر رفتار رئولوژیکی خمیر اثر می‌گذارد. خمیرهای تهیه‌شده از آرد کامل یا با درصد استخراج بالا معمولاً ویسکوزیته بیشتری دارند و رفتار ویسکوالاستیک آن‌ها به دلیل وجود ذرات فیبری، با خمیرهای سفید متفاوت است. این افزایش ویسکوزیته می‌تواند به محدود شدن حرکت مولکول‌های آب و در نتیجه تأخیر در تشکیل بلورهای یخ منجر شود، اما از سوی دیگر، ممکن است فرایند ذوب را غیر یکنواخت کرده و سبب تغییرات نامطلوب در بافت گردد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در خمیرهای منجمد با درصد استخراج بالا، نرخ بازجذب آب پس از رفع انجماد کاهش یافته و در نتیجه ساختار شبکه‌ای ضعیف‌تر و خاصیت چسبندگی کمتر مشاهده می‌شود [۲۰، ۳۴، ۳۵].

افزون بر این، ترکیبات معدنی حاصل از بخش‌های بیرونی دانه مانند پتاسیم، فسفر، منیزیم و آهن می‌توانند بر فعالیت آنزیم‌های خمیر از جمله آمیلاز و پروتئاز تأثیرگذار باشند. تغییر در فعالیت این آنزیم‌ها ممکن است بر تخریب نشاسته و پروتئین در طی انجماد و ذوب تأثیر گذاشته و کیفیت نهایی نان را تحت‌الشعاع قرار دهد. در مجموع، هرچند درصد استخراج بالا موجب افزایش ارزش تغذیه‌ای محصول می‌شود، اما از دیدگاه فنی، پایداری خمیر را در برابر تنش‌های حرارتی و مکانیکی فرایند انجماد کاهش می‌دهد [۵، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۲۹].

به طور خلاصه می‌توان گفت که درصد استخراج آرد از طریق سه مسیر اصلی یعنی تغییر در جذب و نگهداری آب، تغییر در ساختار و پایداری شبکه گلوتن، و اثر بر فعالیت و بقاء مخمر، خصوصیات خمیر منجمد را به‌طور مستقیم تعیین می‌کند. بنابراین، انتخاب درصد استخراج بهینه باید بر پایه توازن میان اهداف تغذیه‌ای و نیازهای فناورانه انجام گیرد. در عمل، استفاده از آردهایی با درصد استخراج متوسط همراه با افزودنی‌های اصلاح‌کننده می‌تواند بهترین تعادل میان سلامت، کیفیت و پایداری را برای خمیر منجمد فراهم آورد.

۶. راهبردها و افزودنی‌های کاهش‌دهنده اثرات منفی درصد استخراج بالا در خمیر منجمد

با وجود آن‌که استفاده از آردهای با درصد استخراج بالا موجب افزایش ارزش تغذیه‌ای محصولات نانی می‌شود، حضور مقادیر بالای سبوس و ترکیبات فیبری معمولاً اثرات منفی قابل‌توجهی بر کیفیت فنی و پایداری خمیر در طول انجماد دارد. برای کاهش این اثرات، مجموعه‌ای از راهبردهای فناورانه و استفاده از ترکیبات اصلاحی پیشنهاد شده است که به‌طور مستقیم بر رفتار رئولوژیکی، پایداری ساختاری و فعالیت زیستی خمیر اثر می‌گذارند. این راهکارها عمدتاً شامل پیش‌مرطوب‌سازی سبوس، استفاده از آنزیم‌های تجزیه‌کننده فیبر، به‌کارگیری امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها، افزودن ترکیبات ضدیخ طبیعی و کنترل دقیق شرایط انجماد می‌باشد.



یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین روش‌ها، پیش‌مرطوب‌سازی سبوس پیش از افزودن آن به آرد است. ذرات سبوس به دلیل ساختار متخلخل خود تمایل بالایی به جذب آب دارند و اگر به‌صورت خشک به خمیر افزوده شوند، بخش زیادی از آب در دسترس پروتئین‌های گلوتنی را جذب می‌کنند و بدین ترتیب مانع از تشکیل شبکه گلوتن منسجم می‌گردند. مرطوب‌سازی اولیه سبوس با آب یا محلول‌های آنزیمی موجب هیدراته شدن تدریجی دیواره‌های سلولی فیبر شده و رقابت آن با پروتئین‌ها بر سر جذب آب را کاهش می‌دهد. این فرایند ضمن یکنواخت‌سازی توزیع ذرات سبوس در خمیر، باعث بهبود کشش‌پذیری، افزایش پایداری رئولوژیکی و کاهش آسیب‌های انجماد می‌شود [۳۶، ۳۷].

به‌کارگیری آنزیم‌های فیبرولیتیک مانند گزیلاناز، سلولاز و پنتوزاناز نیز یکی از رویکردهای مهم در بهبود کیفیت خمیرهای تهیه‌شده از آرد کامل است. این آنزیم‌ها قادرند ساختارهای پیچیده فیبری را به اجزای محلول‌تر تجزیه کرده و موجب افزایش برهم‌کنش بین فیبر و فاز خمیری شوند. در نتیجه، خمیر حاصل از آردهای با درصد استخراج بالا رفتار یکنواخت‌تری پیدا می‌کند و از تضعیف شبکه گلوتن کاسته می‌شود. علاوه بر این، فعالیت آنزیم‌ها با افزایش قابلیت نگهداری آب، نرمی بافت خمیر منجمد را بهبود می‌بخشد و شرایط مناسب‌تری برای تخمیر پس از رفع انجماد فراهم می‌سازد [۲۲، ۳۸].

افزودن امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها از دیگر راهکارهای مؤثر برای بهبود ساختار خمیر منجمد محسوب می‌شود. امولسیفایرها با افزایش تعامل میان پروتئین‌ها و چربی‌ها، پیوندهای پایداری در اطراف حباب‌های گاز ایجاد می‌کنند و مانع از تخریب آن‌ها در طول انجماد و ذوب می‌شوند. این ترکیبات همچنین به تشکیل ساختارهای منسجم‌تر در شبکه گلوتنی کمک کرده و یکنواختی بافت خمیر را بهبود می‌بخشند. از میان این مواد، مونو و دی‌گلیسریدها، سوربیتان منواستئارات، لستین سویا و پلی‌سوربات‌ها از رایج‌ترین امولسیفایرهای مورد استفاده هستند. در کنار آن، مواد هیدروکلوئیدی مانند زانتان گام، گوار گام و کاراگینان نیز با افزایش ظرفیت نگهداری آب، از خشکی و ترک‌خوردگی خمیر در طول انجماد جلوگیری کرده و خواص ویسکوالاستیک آن را بهبود می‌دهند [۳۴، ۳۹].

در سال‌های اخیر، استفاده از کریوپروتکتانت‌ها یا مواد ضدیخ طبیعی نیز مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این ترکیبات با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب، سرعت تشکیل بلورهای یخ را کاهش داده و از رشد بلورهای درشت جلوگیری می‌کنند. کریوپروتکتانت‌ها شامل قندهایی مانند ساکاروز و مالتوز، پلی‌ال‌هایی مانند گلیسرول و سوربیتول، و پلی‌ساکاریدهای طبیعی استخراج‌شده از سبوس یا جلبک‌ها از جمله آرابینوگزیلان‌های محلول هستند. این ترکیبات با تثبیت ساختار پروتئین‌ها و غشای سلولی مخمر، مانع از تخریب آن‌ها در شرایط انجماد شده و به حفظ فعالیت زیستی و تخمیری کمک می‌کنند [۳، ۴۰].

از دیگر روش‌های اصلاح کیفیت خمیر منجمد، بهینه‌سازی نرخ و شرایط انجماد است. انجماد سریع موجب تشکیل بلورهای یخ ریز و یکنواخت می‌شود که آسیب کمتری به ساختار خمیر وارد می‌کنند، در حالی که انجماد آهسته سبب رشد بلورهای یخ بزرگ‌تر و پارگی شبکه گلوتن می‌شود. انتخاب فناوری‌های نوین مانند انجماد نیتروژنی یا سیستم‌های هوای سرد با نرخ سرمایش بالا، از جمله مؤثرترین راهکارها برای حفظ کیفیت خمیر به‌ویژه در آردهای با درصد استخراج بالا است. در کنار آن، کنترل تدریجی ذوب نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا ذوب ناگهانی می‌تواند موجب بازتوزیع غیریک‌نواخت آب و تخریب ساختار داخلی خمیر گردد [۵، ۴۱، ۴۲].



علاوه بر موارد فوق، پژوهش‌های اخیر بر ترکیب چندین راهبرد به صورت هم‌زمان تأکید دارند. برای مثال، استفاده توأمان از آنزیم‌های تجزیه‌کننده فیبر با امولسیفایرها و کریوپروتکتانت‌ها، یا ترکیب روش پیش‌مرطوب‌سازی سبوس با انجماد سریع، نتایج قابل توجهی در بهبود کیفیت خمیر منجمد نشان داده است. این رویکردهای ترکیبی قادرند اثرات منفی درصد استخراج بالا را به حداقل رسانده و ویژگی‌هایی مانند حجم نان، نرمی بافت و پایداری تخمیر را حفظ کنند. به طور کلی، انتخاب راهبرد مناسب برای اصلاح خمیر منجمد وابسته به نوع آرد، ترکیب شیمیایی آن، هدف صنعتی و شرایط فرآیندی است. به کارگیری دانش میان‌رشته‌ای شامل بیوشیمی، رئولوژی و فناوری مواد غذایی می‌تواند به طراحی فرمولاسیون‌های هوشمند منجر شود که در آن، آردهای با درصد استخراج بالا بدون افت کیفیت، در تولید محصولات نانی منجمد مورد استفاده قرار گیرند. چنین رویکردی گامی مؤثر در جهت تولید محصولات مغذی‌تر، پایدارتر و با کیفیت فناورانه برتر در صنعت نانوایی به شمار می‌آید.

۷. نتیجه‌گیری نهایی

نتایج حاصل از مرور مطالعات نشان می‌دهد که درصد استخراج آرد، عاملی تعیین‌کننده در کیفیت فنی و تغذیه‌ای خمیر منجمد محسوب می‌شود و از طریق تغییر در ترکیب شیمیایی آرد، ساختار شبکه گلوتن، رفتار آب و فعالیت میکروبی، ویژگی‌های عملکردی خمیر را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش درصد استخراج موجب افزایش محتوای فیبر، مواد معدنی و ترکیبات زیست‌فعال در آرد شده و بدین ترتیب ارزش تغذیه‌ای محصولات نانی را ارتقا می‌بخشد؛ با این حال، حضور مقادیر بالای سبوس و ذرات فیبری در آرد باعث کاهش انسجام شبکه گلوتنی، کاهش ظرفیت نگهداری گاز، افت زنده‌مانی مخمر و در نهایت کاهش حجم و یکنواختی بافت نان می‌شود. بر اساس شواهد علمی، تغییر در میزان استخراج نه تنها بر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خمیر اثرگذار است بلکه رفتار آن را در طی فرایندهای سرمایشی و انجمادی به طور محسوسی دگرگون می‌سازد. با افزایش درصد استخراج، پدیده‌هایی نظیر بازتوزیع آب، تشکیل بلورهای یخ بزرگ‌تر و تغییر در الگوی شبکه پروتئینی شدت بیشتری می‌یابند که در نهایت سبب کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود. از این رو، یافتن توازن مناسب میان کیفیت تغذیه‌ای و پایداری فناورانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای غلبه بر این چالش، مطالعات متعددی بر استفاده از راهکارهای فناورانه همچون پیش‌مرطوب‌سازی سبوس، استفاده از آنزیم‌های اصلاح‌کننده فیبر، افزودن امولسیفایرها و هیدروکلوئیدها، بهره‌گیری از ترکیبات کریوپروتکتانت طبیعی و بهینه‌سازی سرعت و شرایط انجماد تأکید کرده‌اند. این رویکردها به بهبود تعامل میان اجزای آرد و شبکه گلوتن، افزایش نگهداری آب، کاهش آسیب‌های انجماد و حفظ زنده‌مانی مخمر کمک کرده و موجب بهبود خواص رئولوژیکی و بافتی خمیر منجمد می‌شوند. در این میان، ترکیبات زیست‌فعال سبوس مانند آرابینوگزیلان‌های محلول و پلی‌ساکاریدهای ضدیخ طبیعی پتانسیل قابل توجهی در کاهش آسیب‌های سرمایی و افزایش پایداری ساختار خمیر نشان داده‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب درصد استخراج بهینه باید بر مبنای هدف محصول و فرآیند صنعتی تعیین شود. آردهای با درصد استخراج متوسط همراه با به کارگیری افزودنی‌های اصلاح‌کننده، معمولاً بهترین تعادل میان ارزش تغذیه‌ای و کیفیت فناورانه را ایجاد می‌کنند. همچنین، توسعه فناوری‌های انجماد سریع، استفاده از مواد طبیعی ضدیخ و بهره‌گیری از بیوانزیم‌های خاص می‌تواند چشم‌اندازهای نوینی برای ارتقای کیفیت محصولات نانی منجمد فراهم آورد. در نهایت، نیاز به انجام پژوهش‌های نظام‌مندتر برای تعیین حدود بهینه درصد استخراج در محصولات مختلف، بررسی دقیق نقش ترکیبات فعال سبوس بر رفتار خمیر در دماهای زیر صفر، و تحلیل برهم‌کنش میان اجزای شیمیایی آرد، افزودنی‌ها و پارامترهای فرآیند انجماد به شدت احساس می‌شود. چنین پژوهش‌هایی می‌توانند مسیر توسعه محصولات نانی سالم‌تر، با ماندگاری بالاتر و کیفیت حسی مطلوب‌تر را هموار کرده و به بهبود بهره‌وری و پایداری صنعت نانوایی در مقیاس جهانی کمک نمایند.



منابع

1. Rababah, T., et al., *The effect of different flour extraction rates on physiochemical and rheological characteristics*. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2019. **25**(3).
2. Alhendi, A., et al., *Large scale industry mill: effect of extraction rate of flour on the dough rheological properties*. Food Research, 2021. **5**(4): p. 80–85.
3. Arias, A.C., C.A.F. Bobadilla, and C.M.Z. Domínguez, *Cryoprotectants for frozen dough: A review*. Food Biophysics, 2024. **19**(1): p. 18–28.
4. Meng, K., et al., *Effect of subfreezing storage on the quality and shelf life of frozen fermented dough*. Journal of Food Processing and Preservation, 2021. **45**(3): p. e15249.
5. Inoue, Y. and W. Bushuk, *Effects of freezing, frozen storage, and thawing on dough and baked goods*, in *freezing effects on food quality*. 2019, CRC Press. p. 367–400.
6. Adams, V., S. Ragaei, and E.S.M. Abdel-Aal, *Impact of wheat fiber on frozen dough shelf life and bread quality*. Cereal Chemistry, 2015. **92**(4): p. 370–377.
7. Yang, Z., et al., *New insight into the contribution of wheat starch and gluten to frozen dough bread quality*. Food Bioscience, 2022. **48**: p. 101777.
8. Yu, L., et al., *Novel parameters characterizing size distribution of A and B starch granules in the gluten network: Effects on dough stability in bread wheat*. Carbohydrate Polymers, 2021. **257**: p. 117623.
9. Mitelut, A.C., et al., *Trends of innovation in bread and bakery production*. Trends in wheat and bread making, 2021: p. 199–226.
10. Terentyev, S. and N. Labutina. *Features of technology for producing bread and bakery products from frozen semi-finished products*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. IOP Publishing.
11. Cato, L., *Wheat and flour quality requirements*, in *Asian Noodle Manufacturing*. 2020, Elsevier. p. 13–23.
12. Suchowilska, E., et al., *Concentrations of phenolic acids, flavonoids and carotenoids and the antioxidant activity of the grain, flour and bran of Triticum polonicum as compared with three cultivated wheat species*. Agriculture, 2020. **10**(12): p. 591.
13. Kirusnaruban, K., *Extraction of phenolic compounds from wheat by developing a rapid and reliable microwave-assisted method*. 2025, University of Manitoba.
14. Harisha, R., et al., *Elucidating the effects on polyphenol oxidase activity and allelic variation of polyphenol oxidase genes on dough and whole wheat-derived product color parameters*. International Journal of Food Properties, 2023. **26**(2): p. 2716–2731.
15. Bilal, M., et al., *Recent advances of wheat bran arabinoxylan exploitation as the functional dough additive*. Food Chemistry, 2024: p. 141146.



16. Chen, Z., et al., *Wheat bran arabinoxylans: Chemical structure, extraction, properties, health benefits, and uses in foods*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024. **23**(3): p. e13366.
17. Koegelenberg, D. and A.F. Chimphango, *Effects of wheat-bran arabinoxylan as partial flour replacer on bread properties*. *Food Chemistry*, 2017. **221**: p. 1606–1613.
18. Pietiäinen, S., et al., *Effect of physicochemical properties, pre-processing, and extraction on the functionality of wheat bran arabinoxylans in breadmaking—A review*. *Food chemistry*, 2022. **383**: p. 132584.
19. Zhang Hua, Z.H., et al., *Effect of bamboo shoot dietary fiber on rheological properties, moisture distribution and microstructure of frozen dough*. 2018.
20. Jiang, Y., et al., *Effect of dietary fiber-rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage*. *Food chemistry*, 2019. **297**: p. 124902.
21. Wang, X., et al., *Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism*. *Journal of food science and technology*, 2018. **55**: p. 389–398.
22. Omedi, J.O., et al., *Advances in present-day frozen dough technology and its improver and novel biotech ingredients development trends—A review*. *Cereal chemistry*, 2019. **96**(1): p. 34–56.
23. Na, L., et al., *Effects of sodium bicarbonate on yeast cell activity and frozen dough quality*. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2020. **18**(5).
24. Kim, H.-J. and S.-H. Yoo, *Effects of combined α -amylase and endo-xylanase treatments on the properties of fresh and frozen doughs and final breads*. *Polymers*, 2020. **12**(6): p. 1349.
25. Zhao, Y. and M. Kweon, *Optimized Fermentation and Freezing Conditions for Ready-to-Proof and Ready-to-Bake Frozen Dough of Sweet Bread*. *Applied Sciences*, 2021. **11**(17): p. 7904.
26. Fu, Y., et al., *Effects of Laminaria japonica polysaccharides on the texture, retrogradation, and structure performances in frozen dough bread*. *Lwt*, 2021. **151**: p. 112239.
27. Guo, W.-T., et al., *Effects of transglutaminase and glucose oxidase on the properties of frozen dough: Water distribution, rheological properties, and microstructure*. *Journal of Cereal Science*, 2023. **111**: p. 103689.
28. Ribotta, P.D., A.E. León, and M.C. Añón, *Effect of freezing and frozen storage of doughs on bread quality*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001. **49**(2): p. 913–918.
29. Zhang, L., et al., *Impact of soybean protein isolate-chitosan edible coating on the softening of apricot fruit during storage*. *Lwt*, 2018. **96**: p. 604–611.
30. Akbarian, M., et al., *Rheological properties and bread quality of frozen sweet dough with added xanthan and different freezing rate*. *Journal of food science and technology*, 2016. **53**(10): p. 3761–3769.
31. Öhgren, C., N. Fabregat, and M. Langton, *Quality of bread baked from frozen dough—effects of rye, and sugar content, kneading time and proofing profile*. *LWT-Food Science and Technology*, 2016. **68**: p. 626–633.
32. Vithana Pathirannehelage, N.P., *Unraveling the effect of dietary fibre on biopolymer structures and interactions in (frozen) dough products*. 2022, University of Guelph.



33. He, N., et al., *Quality attributes and functional properties of whole wheat bread baked from frozen dough with the addition of enzymes and hydrocolloids*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024. **104**(4): p. 1928–1941.
34. Li, D., et al., *Pea-Protein-Stabilized Emulsion as a High-Performance Cryoprotectant in Frozen Dough: Effects on the Storage Stability and Baking Performance*. Foods, 2024. **13**(23): p. 3840.
35. Yang, S., et al., *Effects of apple fiber on the physicochemical properties and baking quality of frozen dough during frozen storage*. Food Chemistry, 2024. **440**: p. 138194.
36. Qi, Y., et al., *Pre-hydration of wheat flours improved the qualities of white salted noodles through promoting the dispersion of starch granules and the formation of uniformly filled gluten networks*. Journal of Cereal Science, 2024. **116**: p. 103871.
37. Luo, H., et al., *Quality improvements of reconstituted noodles by pre-hydrating gluten: Insights at different levels*. Food Chemistry, 2025. **472**: p. 142923.
38. Sheikholeslami, Z., et al., *Modification of dough characteristics and baking quality based on whole wheat flour by enzymes and emulsifiers supplementation*. Lwt, 2021. **139**: p. 110794.
39. Xu, L., et al., *Non-ionic Emulsifiers with Different Structures Influence the Quality of Frozen Dough and Bread*. Modern Food Science & Technology, 2022. **38**(12).
40. Kenijz, N.V., A.A. Nesterenko, and M.S. Zayats, *Cryoprotectants in the technology for the production of frozen bakery products*. Индустрия питания/Food Industry, 2019. **4**(4): p. 23–29.
41. Ahmed, J., L. Thomas, and A. Al-Hazza, *Effects of frozen storage on texture, microstructure, water mobility and baking quality of brown wheat flour/ β -glucan concentrate Arabic bread dough*. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021. **15**(2): p. 1258–1269.
42. Niu, M., et al., *Quality analysis of dough and steamed bread under various freezing conditions*. Journal of Food Science, 2024. **89**(7): p. 4345–4358.