



تأثیر تیمار فراصوت بر خواص فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و ساختاری نشاسته‌های استخراج شده از حبوبات مختلف

محمد کاظم حیدریان^۱، علیرضا حیدریان^۲، سیدعلی مرتضوی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی علوم و مهندسی صنایع غذایی گرایش فناوری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی علوم و مهندسی صنایع غذایی گرایش زیست فناوری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نشاسته فراوان‌ترین کربوهیدرات موجود در دانه حبوبات است. از طرف دیگر نشاسته حبوبات طبیعی به دلیل ماهیت غیر واکنشی و نامحلول بودن در آب سرد، کاربرد محدودی در صنایع غذایی دارد. نشاسته حبوبات طبیعی را می‌توان با روش‌های شیمیایی، فیزیکی و آنزیمی اصلاح کرد. نشاسته حبوبات اصلاح شده به دلیل خواص عملکردی بهبود یافته در صنایع غذایی اهمیت پیدا کردند. فراصوت یکی از روش‌های فیزیکی اصلاح نشاسته است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین فراصوت به طور فزاینده‌ای برای اصلاح فیزیکوشیمیایی سیستم‌های غذایی به عنوان یک فناوری سبز استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر تیمار فراصوت (حمام - پروب) بر ویژگی‌های عملکردی، رئولوژیکی، حرارتی، مورفولوژی و ساختار کریستالی نمونه‌های نشاسته اصلاح شده می‌باشد. تغییر در خواص نشاسته اصلاح شده فراصوت عمدتاً به دلیل دپلمریزاسیون زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین است. پس از تیمار فراصوت، وزن مولکولی، ویسکوزیته و بلورینگی کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فراصوت به عنوان فناوری جایگزین برای اصلاح خواص نشاسته حبوبات است.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲۳

کلمات کلیدی:

نشاسته حبوبات،

فراصوت،

اصلاح،

کاویتاسیون

DOI: 10.22034/FSCT.20.137.156

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.137.12.2

* مسئول مکاتبات:

morteza@um.ac.ir

۱- مقدمه

۱-۱- امواج فراصوت

فراصوت شامل امواج مکانیکی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی طبیعی انسان (بیشتر از ۱۶ کیلوهرتز) می‌باشد که توانایی عبور از محیط (گاز، مایع و جامد) را دارد و به صورت امواج سینوسی منتشر می‌شود [۱].

۱-۲- مکانیسم فراصوت

امواج فراصوت همانند تمامی امواج صوتی از دوره‌های انقباض و انبساط تشکیل شده‌اند که دوره‌های انقباض یک فشار مثبت روی مایع ایجاد کرده و مولکول‌ها را به هم نزدیک می‌کند درحالی‌که دوره‌های انبساط فشار منفی ایجاد کرده و مولکول‌ها را از هم دور می‌کند، در نتیجه عدم برابری میزان انتقال جرم در طی چرخه انبساط و انقباض باعث متلاشی شدن حباب‌ها و آزاد شدن انرژی و ظهور اثرات مکانیکی می‌شود. از سوی دیگر امواج صوتی منتشر شده در محیط باعث ایجاد ارتعاش و جابجایی ذرات می‌شود که افزایش فشار، کاهش چگالی را به دنبال دارد؛ بنابراین به دلیل وقوع پدیده کاویتاسیون^۱ تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد بسته به پارامترهای فرایند (فرکانس، توان) به وجود می‌آید [۲]. از طرف دیگر امواج فراصوت با ایجاد نیروی برشی قوی، افزایش دما و تولید رادیکال‌های آزاد می‌تواند تغییراتی در مواد غذایی ایجاد کند [۳]. تأثیر فراصوت توسط پدیده کاویتاسیون شامل تشکیل، رشد و فروپاشی بسیار سریع حباب‌ها در محیط مایع می‌باشد [۴].

۱-۳- انواع فراصوت

امواج فراصوت را می‌توان بر اساس دامنه فرکانس و توان آن به سه دسته طبقه‌بندی کرد:

- ۱- فراصوت با فرکانس پائین (۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز) ۲-
- فراصوت با توان متوسط و فرکانس متوسط (۱ تا ۱۰۰ مگاهرتز) ۳-
- فراصوت کم‌توان با فرکانس بالا (بیشتر از ۱ مگاهرتز)

فراصوت مورد استفاده در صنایع غذایی در محدوده فرکانس پائین و بالا می‌باشد و همچنین این محدوده فرکانس به عنوان یک روش ساده و کارآمد برای اصلاح پلیمر استفاده می‌شود [۵].

همچنین می‌توان امواج فراصوت را بر اساس کاربرد به سه محدوده فرکانسی طبقه‌بندی کرد:

- ۱- فراصوت قدرت^۲ (۶ تا ۱۰۰ کیلوهرتز) ۲-
- فرکانس بالا^۳ (۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز) ۳-
- تشخیصی^۴ (۱ تا ۱۰ مگاهرتز) [۶].

۱-۴- تجهیزات فراصوت

اساساً تجهیزات تولیدکننده امواج فراصوت از یک ژنراتور الکتریکی، یک مبدل و یک ساطع کننده (سونوترو^۵ یا پروب) امواج تشکیل شده است که در این سیستم ژنراتور وظیفه تأمین انرژی سیستم را بر عهده دارد. از سوی دیگر مبدل، مسئول تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی صوتی از طریق ارتعاشات مکانیکی است. همچنین مبدل‌ها را می‌توان به دو دسته پیزوالکتریک و مغناطیسی تقسیم کرد. ساطع کننده امواج وظیفه انتشار امواج صوتی در محیط را بر عهده دارد و در تماس مستقیم با سیال قرار دارد. پروب فراصوت حاوی یک کریستال پیزوالکتریک است که درون یک محافظ فلزی قرار دارد و به منظور افزایش شدت امواج

2 - Power ultrasound
3- High-frequency ultrasound
4 - Diagnostic ultrasound
5 - Sonotrode

1 - Cavitation

زیادی بر ظرفیت اتصال به آب، خواص حرارتی و حساسیت آنزیم تأثیر می‌گذارد [۱۲].

نشاسته به دلیل دارا بودن ساختار فشرده دارای خواص عملکردی و کاربردهای متنوع در صنایع مختلف می‌باشد. از سوی دیگر نشاسته به دلیل ماهیت پلیمری و منشعب، حلالیت نسبتاً کمی در آب و توانایی نسبتاً کمی در جذب آب و روغن دارد [۱۳]. نشاسته به علت دارا بودن ویسکوزیته نسبتاً بالا، قدرت تورم بالا، توانایی ژلاتینه شدن و خاصیت چسبندگی بالا می‌تواند لایه‌های نازکی را تشکیل دهد که این ویژگی‌ها، نشاسته را به‌عنوان یک ماده عالی برای فرمولاسیون‌های مختلف غذایی و صنعتی در جهت افزایش پایداری انجماد-ذوب و ذخیره‌سازی در انبارهای سرد مناسب می‌سازد. نشاسته طبیعی نسبت به دما و فشار متوسط مقاوم است اما در برابر هیدرولیز اسیدی و هیدرولیز آنزیمی حساس است [۱۴]. همچنین نشاسته می‌تواند به‌عنوان یک عامل ژل کننده، غلیظ کننده، تثبیت‌کننده و محصورکننده طعم در فرایندهای پخت، دم کردن و شیرینی سازی، همچنین به‌عنوان پوشش و فیلم، در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]. کاربردهای غیر غذایی نشاسته شامل چسب‌ها برای ساخت تخته، ضد یخ و عامل کند کننده بتن و همچنین مواد اولیه تخمیر برای فراورده‌های دارویی است [۱۶]. همچنین انتظار می‌رود بازار نشاسته با میزان رشد متوسط ۴,۷ درصد در طول سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۲۰ افزایش یابد. رشد بازار در درجه اول تحت تأثیر تقاضای مصرف‌کننده، فعالیت‌های تحقیق و توسعه، و افزایش آگاهی در مورد کاربردهای نشاسته قرار دارد [۱۷]. در مطالعه‌ای که اخیراً صورت گرفته، نمایه بازار تجارت (TMR) نشان‌دهنده این است که ارزش بازار جهانی نشاسته در سال ۲۰۲۰، بیش از ۱,۷ میلیارد دلار برآورد می‌شود. بر اساس این گزارش، انتظار می‌رود که ارزش بازار

تولیدی این پروب در انتها باریک می‌شود [۷]. اعمال امواج الکتریکی باعث ارتعاشات مکانیکی در کریستال پیزوالکتریک و تولید امواج فراصوت می‌شود. امواج فراصوت تولیدی به نوک مبدل منتقل و سپس به محیط مایع اطراف انتقال می‌یابد. از طرف دیگر استفاده مداوم از امواج فراصوت، افزایش دما نمونه را به دنبال دارد که برای جلوگیری از این امر بهتر است امواج فراصوت را به‌صورت متقاطع (پالسی) اعمال گردد [۸]. از طرف دیگر امواج فراصوت در زمینه فرآوری مواد غذایی کاربردهایی ازجمله اکستروژن، کف‌زدایی، تغییر ویسکوزیته، فیلتراسیون و جداسازی، کریستالیزاسیون، همگن‌سازی و امولسیون سازی، استخراج و غیرفعال سازی آنزیم‌ها و باکتری‌ها دارند [۹].

۲- نشاسته

نشاسته، یک پلیمر تجدید پذیر، زیست‌تخریب‌پذیر و منبع ذخیره انرژی در گیاهان است و جزء اصلی بسیاری از محصولات غذایی مانند نان و برنج می‌باشد. خواص و ساختار نشاسته بر کیفیت محصولات غذایی تأثیر بسزایی دارد و همچنین دانستن ترکیب، ساختار و خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته به فراوری و کاربردهای نشاسته برای مصارف مختلف کمک می‌کند. از طرف دیگر نشاسته یک مولکول زیستی فراوان است که در بسیاری از محصولات زراعی وجود دارد. نشاسته دارای دو جزء اصلی آمیلوز و آمیلوپکتین می‌باشد، آمیلوز یک پلیمر خطی با شاخه‌های جانبی کوچک می‌باشد که از زنجیره‌های گلوکانی با پیوندهای $\alpha(1\rightarrow4)$ تشکیل شده است [۱۰]. آمیلوپکتین یک پلیمر بسیار منشعب است که از زنجیره‌های کوتاه گلوکان با پیوند $\alpha(1\rightarrow4)$ تشکیل شده است و شاخه‌های آن‌ها توسط $\alpha(1\rightarrow6)$ به شاخه اصلی متصل شده‌اند [۱۱]. از طرف دیگر خواص آمیلوز و آمیلوپکتین تأثیر زیادی بر خصوصیات نشاسته دارد به‌عنوان مثال مقدار آمیلوز، در هم تنیدگی بین آمیلوز-آمیلوز و آمیلوز-آمیلوپکتین به میزان

شاخص گلیسمی (GI) پائین و نشاسته مقاوم به هضم مورد استفاده قرار می گیرند [۲۵].

باتوجه به گستردگی گروه حبوبات به اختصار جدول زیر نام فارسی و لاتین انواع حبوبات را ذکر کرده است:

Table 1 types of legume starch

Types of legume starch sources
Lima bean (<i>Phaseolus lunatus</i>)
Garbanzo bean
Lentil bean
Red kidney bean- Red bean
Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)
Velvet bean (<i>Mucuna pruriens</i> var. <i>utilis</i>)
Navy bean, Faba bean- Broad bean
Mung bean- <i>Vigna radiata</i>
Pinto bean
Adzuki bean
Field pea
Beach pea
Cicer arietium
Green pea
Soybean
Groundnut- Chickpea Peanut
Sword bean (<i>Canavalia gladiata</i>)
Jack bean (<i>Canavalia ensiformis</i>)
Pigeon pea- <i>Cajanus cajan</i>
Vicia faba
White navy beans
<i>Parkia biglobosa</i>
Black gram- <i>Vigna mungo</i>

جهانی تا سال ۲۰۳۰، با رشد ۴/۷ درصدی، از ۲,۷ میلیارد دلار عبور کند، چراکه نشاسته کاربردهای متعددی در صنایع غذایی و غیر غذایی دارد [۱۸].

از طرف دیگر حبوبات دانه‌های دانه‌ای گیاهانی هستند که متعلق به خانواده لگومینوز^۱ است که شامل حدود ۶۰۰ جنس با ۱۳۰۰۰ گونه است و حبوبات منابع غنی از پروتئین، فیبرهای غذایی، نشاسته مقاوم، الیگوساکاریدها و ترکیبات فنولی هستند [۱۹]. در مقایسه با غلات، حبوبات عمدتاً حاوی نشاسته دیر هضم هستند که مطلوب‌ترین شکل نشاسته غذایی می‌باشد زیرا سطح انسولین پلاسما را کاهش می‌دهند [۲۰]. همانطور که در بالا اشاره شد محتوای آمیلوز نشاسته بسیاری از خصوصیات نشاسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر محتوای آمیلوز نشاسته حبوبات از ۱۸,۷ درصد تا ۴۹,۷ درصد متغیر است که این تفاوت به دلیل تنوع ژنوتیپی، شرایط رشد، فعالیت آنزیمی در طول سنتز نشاسته، روش استخراج نشاسته و... می‌باشد [۲۱]. نشاسته حبوبات در مقایسه با نشاسته غلات، ویسکوزیته حداکثر و ویسکوزیته شکست کمتر، و بازگشت ویسکوزیته و ویسکوزیته نهایی بالاتری دارد [۲۲]. همچنین نشاسته حبوبات در مقایسه با نشاسته غلات حلالیت پائین تر و قدرت تورم محدودتری دارند. این گروه از نشاسته‌ها آمیلوز بالاتری دارند به هم دلیل تمایل زیادی به بیاتی (رتروگراداسیون^۲) نشان می‌دهند [۲۳]. این ویژگی نشاسته حبوبات را برای تهیه ژل در بسیاری از فرآورده‌های غذایی مناسب می‌سازد. تفاوت دیگر نشاسته حبوبات با نشاسته غلات در دمای ژلاتینه شدن بالاتر است که این ویژگی به نسبت آمیلوز و آمیلوپکتین مربوط می‌باشد [۲۴]. از سوی دیگر این گروه از نشاسته‌ها به دلیل هضم آهسته و محتوای بالای نشاسته مقاوم در فرمول مواد غذایی با

1 - Leguminous
2- Retrogradatio

نشاسته‌های اصلاح‌شده حبوبات در تهیه چندین فرآورده مانند بستنی، فرآورده‌های پخته‌شده، غذاهای مخصوص نوزادان، غذاهای آماده مصرف، غذاهای حاوی نشاسته مقاوم به هضم (RS^۱) بالا با GI پایین، غذاهای منجمد، غذاهای فراوری شده؛ مانند آب‌نبات، سوپ، پودینگ و سس سالاد دارند. همچنین می‌توان از این نشاسته‌های اصلاح‌شده به‌عنوان مواد غلیظ کننده، تثبیت‌کننده‌ها و امولسیفایرها استفاده کرد. تفاوت در خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته، کاربرد استفاده خاص آن را تعیین می‌کند [۲۹].

به‌طور معمول، نشاسته را می‌توان به‌صورت شیمیایی، آنزیمی، فیزیکی و یا ترکیبی از این سه روش اصلاح کرد [۳۰، ۳۱]. اصلاح شیمیایی شامل اکسیداسیون، سوکسینیل‌اسیون، استریفیکاسیون، اتریفیکاسیون و فسفریل‌اسیون است [۳۲]. در این روش اصلاح نشاسته، با جایگزین کردن ترکیب گروه‌های عاملی مختلف بر مولکول نشاسته باعث بهبود خواص عملکردی و تغییراتی در دمای ژلاتینه شدن نشاسته، pH و خواص رئولوژیکی و خواص خمیری شدن نشاسته می‌شود [۳۱].

هاور^۲ و همکاران (۱۹۹۸)، گزارش کردند که مشتق‌سازی مولکول‌های نشاسته با استر فسفات، استر استیک یا گروه‌های هیدروکسی پروپیل استر می‌تواند از بیاتی جلوگیری کرد و همچنین استریفیکاسیون نشاسته‌های حبوبات باعث افزایش ویسکوزیته خمیر، شفافیت خمیر، افزایش قابلیت نگهداری آب و کاهش قابل توجهی در میزان سینرژیس و میزان بیاتی در مقایسه با نشاسته طبیعی می‌شود که این نشاسته اصلاح‌شده را می‌توان در صنایع مختلف (کاغذ، مواد غذایی) استفاده کرد [۳۳].

از طرف دیگر هوانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷)، اشاره کردند که مشتق‌سازی مولکول‌های نشاسته با ونیل استات در جهت

Grass pea (*Lathyrus sativus*)

Bambara groundnut (*Vigna subterranea*)

Lablab bean (*Lablab purpureus*)

Phaseolus vulgaris common bean

Lupine

Vetches

Bambara bean

Yellow peas

۱-۲- اصلاح نشاسته

نشاسته طبیعی به دلیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی و درون مولکولی و ساختار نیمه کریستالی، در دمای محیط نسبت به آب نفوذناپذیر و در آب سرد نامحلول است [۱۷]. از طرف دیگر نشاسته به راحتی بیات می‌شود. بنابراین، نشاسته‌ها باید برای افزایش حلالیت، بهبود ویژگی‌های بافتی و افزایش تحمل گرما جهت کاربردهای صنعتی متنوع اصلاح شوند [۱۸].

اصلاح نشاسته یک فرآیند مهم برای افزایش ویژگی‌های پخت، کاهش تمایل به بیاتی، افزایش پایداری انجماد و ذوب، کاهش سینرژیس، بهبود شفافیت خمیر یا ژل، بهبود بافت خمیر یا ژل، بهبود تشکیل فیلم و چسبندگی و بهبود تثبیت امولسیون است [۲۶]. همچنین، اصلاح نشاسته نه تنها منجر به خواص عملکردی مطلوب نشاسته می‌شود، بلکه نشاسته را به‌عنوان یک جایگزین اقتصادی برای ترکیبات هیدرو کلوتیدی مانند صمغ‌ها تبدیل می‌کند [۲۷]. از سوی دیگر نشاسته حبوبات به دلیل مقاومت پائین در برابر دماهای بالا، نیروی برشی و اسید کاربرد نشاسته‌های طبیعی این گروه را به‌عنوان یک عامل غلیظ کننده و تثبیت کننده در فرآورده‌های غذایی مانند سوپ، پودینگ و غذاهای سرخ‌شده محدود می‌کند. از این رو از این گروه از نشاسته‌ها همانند نشاسته غلات و غده‌ها نیاز به اصلاح دارند [۲۸].

1 -Resistant starch

2- Hoover

3 - Huang

افزایش قدرت تورم و افزایش ویسکوزیته حداکثر می‌تواند پایداری در انجماد، شفافیت و ثبات ژل نشاسته اصلاح‌شده را افزایش دهد که می‌توان از این نوع نشاسته به‌عنوان عامل تغلیظ‌کننده در تهیه غذای کودک و مواد غذایی منجمد و خشک استفاده کرد [۳۴].

از سوی دیگر اشوگبون^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، دریافتند که استریفیکاسیون نشاسته طبیعی با انیدرات استیک یا وینیل استات در حضور کاتالیزور قلیایی می‌تواند این نشاسته اصلاح‌شده را برای عملکردهای مختلفی مانند تشکیل فیلم، اتصال، ضخیم‌شدن، تثبیت و بافت مناسب کند [۳۵]. از طرف دیگر گلریا^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، دریافتند که اتصال عرضی در نشاسته نخود کبوتر باعث ایجاد ساختار پایداری نسبت به نشاسته طبیعی می‌شود. همچنین این تیمار باعث کاهش شفافیت خمیر، سختی ژل، قدرت تورم، حلالیت، حداکثر ویسکوزیته و میزان بیاتی می‌شود و خمیر حاصل از نشاسته اصلاح‌شده به این روش نسبت به نیروی برشی مقاومت بالایی را نشان می‌دهد [۳۶].

تکنیک‌های اصلاح شیمیایی بیشترین استفاده و بیشترین کارایی را دارند؛ ولی نگرانی زیادی در مورد مسائل آلودگی محیط‌زیست، تصفیه فاضلاب، ایمنی مواد غذایی و هزینه‌های بالای مربوط به روش‌های اصلاح شیمیایی موجود است [۳۷].

یک رویکرد جایگزین، اصلاح آنزیمی است که در مقایسه با اصلاحات شیمیایی، از نظر محیط‌زیست ایمن‌تر در نظر گرفته می‌شود. آمیلازها آنزیم‌هایی هستند که معمولاً برای هیدرولیز مولکول‌های نشاسته به معادل دکستروز کم استفاده می‌شوند و با شکستن پیوند $\alpha(1\rightarrow4)$ بین دو مولکول گلوکز، باعث بهبود ظرفیت شیرین‌سازی نشاسته، افزایش ظرفیت قهوه‌ای شدن و بهبود بافت ژل می‌شوند [۳۱]. اما

استفاده از اصلاح آنزیمی دوگانه ممکن است اقدامات و هزینه‌های بیشتری را به دنبال داشته باشد [۳۸]. چيو^۳ و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که نشاسته تیمار شده با ترکیبی از آلفا آمیلازها و بتا آمیلازها یا آلفا آمیلازها و آمیل گلوکوزیدازها ظرفیت شیرین‌سازی و ظرفیت قهوه‌ای شدن را بهبود می‌بخشد [۳۹]. همچنین هانسن^۴ و همکاران (۲۰۰۸)، گزارش کردند که نشاسته سیب زمینی، ذرت و نخود تیمار شده با آمیلومالتوزها بافت ژل (تشکیل شبکه ژل، افزایش نیروی فشرده‌سازی و شکستگی اندکی یا جزئی ژل) را بهبود می‌بخشد [۴۰]. از طرف دیگر آئو^۵ و همکاران (۲۰۰۷)، دریافتند که هیدرولیز آنزیمی نشاسته با استفاده از آمیلازها منجر به کاهش سرعت هضم به دلیل افزایش تراکم شاخه نشاسته و ماهیت کریستالی می‌شود. همچنین هیدرولیز آنزیمی منجر به نشاسته با شاخص گلیسمی پایین که غذاهایی مناسب افراد دیابتی از این نوع نشاسته‌ها تولید می‌شود [۴۱].

کائور^۶ و همکاران (۲۰۱۲)، اشاره کردند که افزودن آنزیم سیکلومالتودکستریناز به نشاسته طبیعی به دلیل ساختار خوشه مانند این آنزیم باعث ایجاد ساختار بسیار شاخه‌ای می‌شود که می‌تواند بیات شدن نشاسته را به تأخیر بیندازد [۴۲].

گولو^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، دریافتند که افزودن آنزیم گلیکوزیل ترانسفرازهای سیکلودکسترین به نشاسته طبیعی بادام‌زمینی بامبارا باعث افزایش شکست ویسکوزیته می‌شود که کاهش توانایی برای تنش برشی و گرما در حین پخت را به دنبال دارد [۴۳].

اصلاح فیزیکی می‌تواند حرارتی (تیمار حرارت مرطوب، خشک‌کردن پاششی، پيش ژلاتینه‌سازی و...) یا غیرحرارتی

3 - Chiu
4- Hansen
5- Ao
6 -Kaur
7- Gulu

1-Ashogbon
2 - Gloria

(میدان الکتریکی پالسی، فراصوت، فشار هیدرو استاتیک بالا، فناوری پلاسمای سرد^۱ (CP) و...) باشد. روش‌های اصلاح فیزیکی نشاسته، جایگزینی سریع و سازگار با محیط زیست بدون تولید باقی مانده‌های شیمیایی و مواد سمی هستند [۳۵]. روش‌های فیزیکی می‌توانند انشعاب زنجیره‌های جانبی آمیلوز و آمیلوپکتین نشاسته را تخریب نموده، یا تحت تأثیر قرار دهند و بر توزیع شکل و اندازه گرانول‌های نشاسته تأثیر بگذارند [۳۱، ۴۴].

هان^۲ و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که تیمار میدان الکتریکی پالسی باعث تنظیم مجدد و تخریب گرانول‌های نشاسته می‌شود که منجر به کاهش کریستالیتی، ژلاتینه شدن و ویژگی‌های ویسکوزیته می‌شود [۴۵].

از سوی دیگر بشیر و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر تابش گاما (۰، ۰،۵، ۱، ۲،۵، ۵ و ۱۰ کیلوگری) را بر خواص فیزیکوشیمیایی، عملکردی و حرارتی نشاسته نخود مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که افزایش دوز تابش گاما کاهش تبلور نسبی را در حین حفظ الگوی پراش نوع C به دنبال دارد. همچنین افزایش دوز تابش گاما کاهش حداکثر ویسکوزیته، ویسکوزیته شکست، ویسکوزیته برگشت به عقب و ویسکوزیته نهایی را به دنبال دارد. از سوی دیگر این افزایش دوز اشعه باعث افزایش شاخص حلالیت، افزایش ظرفیت جذب آب و روغن، کاهش میزان بیاتی و افزایش آنتالپی ژلاتینه شدن می‌شود که از این نشاسته اصلاح شده می‌توان در غذاهای منجمد استفاده کرد [۴۶].

گیل^۳ و همکاران در سال (۲۰۰۹)، گزارش کردند که تیمار فراصوت می‌تواند ویژگی‌های مورفولوژیکی گرانول‌ها، الگوی کریستالیتی، خواص خمیری شدن (به عنوان مثال ژلاتینه شدن)، رفتارهای رئولوژیکی و سایر ویژگی‌های

مشخصه گرانول‌های نشاسته را تغییر دهد. همچنین تیمار فراصوت می‌تواند باعث ایجاد ترک‌ها و منافذ قابل مشاهده بر روی سطح گرانول، کاهش بلورینگی نسبی، دپلمریزاسیون، زنجیره‌های مولکولی و افزایش قدرت تورم و حلالیت گرانول‌های نشاسته از منشأ مختلف از جمله ذرت، برنج، گندم، کاساوا و نشاسته سیب زمینی شود [۴۷، ۴۸].

از طرف دیگر دیو^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، گزارش کردند که تیمار حرارت مرطوب (HMT^۵) باعث کاهش حلالیت، کاهش قدرت تورم، کاهش شفافیت، کاهش پایداری انجماد-ذوب و کاهش توانایی ژل شدن نشاسته نخود می‌شود. در حالی که این تیمار باعث افزایش پایداری حرارتی، افزایش محتوای نشاسته مقاوم به هضم، افزایش میزان بیاتی و میزان سینرزیس و افزایش محتوای آمیلوز می‌شود. از این نشاسته اصلاح شده می‌توان در مواد غذایی که نیاز قدرت تورم محدود دارند مانند رشته، ورمیشل، رشته برنج و ... استفاده کرد، همچنین با توجه به افزایش محتوای نشاسته مقاوم به هضم می‌توان از این تیمار در جهت تولید نشاسته مقاوم به هضم استفاده کرد [۴۹]. از این رو می‌توان روش‌های اصلاح فیزیکی را به عنوان روش‌های موفق اصلاح نشاسته اعلام کرد [۵۰].

۳- اثر فراصوت بر نشاسته

بیشتر کاربرد فراصوت در نشاسته در سیستم نشاسته-آب است. هنگامی که امواج فراصوت به صورت سینوسی از مایع عبور می‌کنند، انرژی صوتی فراصوت نمی‌تواند توسط مولکول‌ها جذب شود و در نتیجه از طریق تعدادی از امواج نادر و فشرده که در مولکول‌های محیط ایجاد می‌شود منتشر می‌شود و سپس از طریق پدیده کاویتاسیون به شکل قابل استفاده شیمیایی تبدیل می‌شود [۵۱]. این پدیده در اثر

1- Cold Plasma

2 - Han

3- Gill

4 - Du

5- Heat-Moisture Treatment

۳۱۲۰۰۰ متغیر است. یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته ساختار آمیلوپکتین می باشد. زنجیره های آمیلوپکتین اغلب به سه گروه اصلی به نام زنجیره های A، B و C طبقه بندی می شوند [۵۶].

زنجیره های A زنجیره بیرونی هستند که پیوندهایی را به زنجیره های دیگر تشکیل می دهند؛ اما زنجیره های دیگر را حمل نمی کنند، درحالی که زنجیره های B به زنجیره های دیگر متصل می شوند و همچنین زنجیره های دیگر را حمل می کنند. زنجیره C یک زنجیره طولانی منفرد است که دارای یک گروه انتهایی احیاکننده در مولکول آمیلوپکتین می باشد [۵۷، ۵۸].

همچنین می توان بر اساس درجه پلیمریزاسیون، مولکول آمیلوپکتین را به چهار نوع زنجیره تقسیم بندی کرد: زنجیره A (DP 6-12)، زنجیره B₁ (DP 13-24)، زنجیره B₂ (DP 24-36) و زنجیره B₃ (DP ≥ 37) که زنجیره A عمدتاً در ناحیه کریستالی وجود دارد، درحالی که زنجیره های B₁، B₂ و B₃ عمدتاً در ناحیه آمورف قرار دارند [۵۹].

ساختار مولکولی آمیلوپکتین را می توان با چندین روش مانند کروماتوگرافی حذف اندازه^۳، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^۴ و کروماتوگرافی تبادل آنیونی با کارایی بالا با تشخیص آمپرومتریک پالسی (HPAEC-PAD^۵) شناسایی کرد [۶۰]. آمیلوپکتین ها را می توان توسط ایزوآمیلاز و یا پولولاناز جدا کرد و پروفایل های زنجیره واحد آن ها را می توان با HPAEC-PAD تخمین زد [۶۱].

از طرف دیگر بیلیداریس^۶ و همکاران (۱۹۸۱)، با کروماتوگرافی ژل و کولونا^۷ و همکاران (۱۹۸۴)، با تکنیک های پراکندگی نور دریافتند که آمیلوپکتین نشاسته

تیمار فراصوت، زمانی ایجاد می شود که دامنه به اندازه کافی بالا باشد و منجر به تشکیل حباب در سیستم شود. فشار ناشی از حرکت موج باعث می شود حباب ها در طول چرخه انبساط رشد کرده و در طول چرخه فشرده سازی منقبض شوند. حباب ها در طول چرخه های زیادی به رشد خود ادامه می دهند، و زمانی که به نقطه ای می رسند که فرکانس نوسان امواج فراصوت با دیواره حباب برابری می کند، حباب ها در طول چرخه فشرده سازی منفجر می شوند [۶]. انفجار حباب ها نیروی برشی و اغتشاش بسیار بالایی را با امواج انرژی بزرگ ایجاد می کند و منجر به افزایش شدید دما در سطح محلی می شود. این مکانیسم باعث تغییر فیزیکی و شیمیایی سیستم می شود. انفجار حباب ها باعث ایجاد یک جت آب به سطح گرانول می شوند. این "میکروجت ها" و همچنین "نیروهای برشی" ناشی از کاویتاسیون، می توانند به گرانول های نشاسته آسیب وارد کنند [۵۲]. علاوه بر این کاویتاسیون، مولکول های آب را جدا می کند و منجر به آزاد شدن رادیکال های آزاد مانند رادیکال های هیدروکسید (OH) و هیدروژن (H) می شود. این رادیکال ها به نوبه خود باعث تغییر در سیستم از نظر شیمیایی می شوند [۵۳، ۵۴]. همچنین عوامل زیادی نظیر فرکانس و توان تیمار فراصوت، دما و زمان تیمار و خواص سوسپانسیون نشاسته از جمله غلظت و نوع نشاسته بر اصلاح نشاسته با تیمار فراصوت مؤثر هستند [۵۵].

۴- تأثیر فراصوت بر خصوصیات نشاسته

۴-۱- ساختار مولکولی

ظرفیت اتصال ید (IBC^۱)، درجه پلیمریزاسیون (DP^۲) و حد آمیلولیز B برای آمیلوز نشاسته حبوبات به ترتیب در محدوده ۱۶-۲۲، ۱۹۰۰-۱۰۰۰ و ۷۹-۸۶٫۹٪ قرار دارد. همچنین وزن مولکولی آمیلوزهای حبوبات از ۱۶۵۰۰۰ تا

3 - Size exclusion chromatography

4- High-performance liquid chromatography

5 - High-Performance Anion-Exchange Chromatography With Pulsed Amperometric Detection

6- Biliaderls

7- Coleenna

1 - Iodine binding capacity

2- Degree of polymerization

کاهش دهد و علاوه بر این، امواج فراصوت رادیکال‌های آزاد تولید می‌کنند که می‌توانند باعث دپلمریزاسیون مولکول‌های نشاسته شوند[۶۶].

از سوی دیگر دانستن این نکته ضروری است که تیمار فراصوت بیشتر مناطق آمورف را مورد حمله قرار می‌دهد و کمترین آسیب را به مناطق کریستالی وارد می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهند که تیمار فراصوت بر اندازه مولکولی زنجیره‌های نشاسته از منابع مختلف تأثیر متفاوتی می‌گذارد که این میزان تخریب زنجیره‌های نشاسته به شرایط تجربی و پارامترهای فراصوت بستگی دارد[۶۷].

بیتیک^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که امواج فراصوت باعث شکستن پیوندهای مولکولی نشاسته می‌شود و آرایش گرانول‌های نشاسته را تغییر می‌دهد. همچنین تیمار فراصوت با دپلمره کردن مولکول‌های نشاسته باعث کاهش اندازه ذرات می‌شود و این کاهش به توان و منبع نشاسته بستگی دارد که در این تحقیق کاهش اندازه ذرات در نشاسته عدس نسبت به نشاسته نخود واضح‌تر است زیرا انرژی فراصوت را می‌توان به راحتی توسط گرانول‌های بزرگ‌تر نشاسته به دلیل مساحت سطح بیشتر به دام انداخت[۶۸]. علاوه بر این نسبت متفاوت آمیلوز به آمیلوپکتین نقش مهمی در کاهش اندازه ذرات مولکول‌های نشاسته دارد[۶۹].

از سوی دیگر شن^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۳۰، ۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که

حبوبات دارای وزن مولکولی متوسط بیشتر از 1.9×10^7 می‌باشد. همچنین گزارش کردند که میل ترکیبی ید، طول زنجیره متوسط و نسبت مولی زنجیره به ترتیب از ۱،۰۰ تا ۵،۳، ۲۰ تا ۲۶ و ۴،۲ تا ۹،۶ برای آمیلوپکتین‌های نشاسته حبوبات در این محدوده قرار دارد. از سوی دیگر کولونا و همکاران (۱۹۸۱)، نشان داده‌اند که ساختار ظریف آمیلوز و آمیلوپکتین نشاسته لوبیا پهن و نخود صاف شبیه نشاسته غلات معمولی است[۶۲].

۴-۱-۱-۴ اثر فراصوت بر ساختار مولکولی نشاسته

تأثیر فراصوت بر ساختار مولکولی زنجیره‌های نشاسته با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد[۶۳]. زنجیره‌های نشاسته‌ای آمیلوز/آمیلوپکتین می‌توانند با ید کمپلکس داده و رنگ‌های متفاوتی را نشان دهند که منعکس‌کننده طول و الگوی شاخه‌ای مولکول نشاسته می‌باشند که از این روش ساده می‌توان ساختار مولکول‌های نشاسته را مورد بررسی قرار داد. همچنین سوچکا^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، گزارش کردند که تیمار فراصوت می‌تواند رنگ کمپلکس نشاسته-ید را از آبی به قرمز تغییر دهد. این پدیده تغییر رنگ نشان می‌دهد که تیمار فراصوت می‌تواند باعث دپلمریزاسیون زنجیره نشاسته شده و توانایی نشاسته را برای تشکیل کمپلکس با ید تضعیف کند[۶۴].

از طرف دیگر با استفاده از تکنیک کروماتوگرافی می‌توان ساختار مولکولی نشاسته‌های اصلاح‌شده با فراصوت را با جزئیات کامل مورد بررسی قرار داد. تیمار فراصوت زنجیره‌های مولکولی نشاسته را مورد حمله قرار می‌دهد و باعث تولید مولکول‌های نشاسته با اندازه مولکولی کوچک‌تر، وزن مولی متوسط کمتر و وزن مولکولی کمتر می‌شود[۶۵]. چراکه تیمار فراصوت می‌تواند از طریق فرآیند تخریب رقابتی و فرآیند کاویتاسیون، پراکندگی پلیمرها را

مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زمان تیمار فراصوت آسیب فیزیکی به ساختار گرانولی نشاسته افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش غلظت نشاسته در سوسپانسیون نشاسته-آب آسیب فیزیکی به ساختار گرانولی نشاسته کاهش می‌یابد که نتایج به دست آمده در این گزارش با نتایج تحقیق گالانت^۲ و همکاران (۲۰۰۶)، مطابقت دارد [۷۳، ۵۱]. از طرف دیگر مجید و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر تیمار فراصوت با توان کم، فرکانس ۳۳ کیلوهرتز به مدت زمان ۴۵ دقیقه بر نشاسته نخود و ماشک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت باعث پلیمریزاسیون مولکول‌های نشاسته می‌شود و افزایش وزن مولکولی را به دنبال دارد [۷۴].

هور و همکاران در سال ۲۰۰۲ دریافتند که نشاسته لوبیاچیتی به طور قابل توجهی با سایر نشاسته‌های حبوبات دارای اندازه گرانول بزرگ‌تر، تبلور نسبی بالاتر، دمای انتقال ژلاتینه شدن بالاتر، محدوده دمای ژلاتینه شدن باریک‌تر، قدرت تورم کمتر می‌باشد. همچنین نتایج این گزارش نشان داد که بلورهای نشاسته لوبیاچیتی دارای ثبات بالاتر و همگن‌تر نسبت به بلورهای موجود در سایر نشاسته حبوبات می‌باشد و فعل و انفعالات مربوط به زنجیره‌های آمیلوز در حوزه‌های آمورف نشاسته لوبیاچیتی از مرتبه بالاتری برخوردار می‌باشد. از طرف دیگر نشاسته‌های لوبیا سیاه نیز با توجه به قدرت تورم بالاتر، ویسکوزیته بالاتر، سینرزیس بیشتر و محدوده دمای ژلاتینه شدن گسترده‌تر به طور قابل توجهی با سایر نشاسته حبوبات متفاوت می‌باشند که این تفاوت نشان‌دهنده ساختار کریستالی ناهمگن‌تر و بر همکنش‌های ضعیف‌تر بین زنجیره‌های آمیلوز - آمیلوز و یا آمیلوز - آمیلوپکتین در حوزه‌های آمورف نشاسته‌های لوبیا سیاه می‌باشد [۷۵].

با افزایش مدت زمان تیمار فراصوت، وزن مولکولی آمیلوز و آمیلوپکتین کاهش یافت؛ زیرا انرژی امواج فراصوت به گرانول‌های نشاسته منتقل می‌شود و ایجاد نیروی برشی قوی و دما بالا می‌کند که باعث دپلمره کردن زنجیره‌های مولکول نشاسته می‌شود [۷۰]. همچنین با بررسی ساختار زنجیره‌ای آمیلوپکتین نشاسته تیمار شده با فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه در مقایسه با نشاسته طبیعی زنجیره‌های B_2 و B_3 کاهش و زنجیره‌های A و B_1 افزایش یافت در حالی که نشاسته تیمار شده با فراصوت به مدت ۳۰ دقیقه با افزایش زنجیره B_1 و کاهش زنجیره B_3 همراه بود و نشاسته تیمار شده با فراصوت به مدت ۵۰ دقیقه با افزایش زنجیره‌های B_1 و B_2 و کاهش زنجیره‌های A و B_3 همراه بود. نتایج این گزارش نشان می‌دهد که زمان تیمار فراصوت می‌تواند بر ساختار مولکولی نشاسته تأثیرگذار باشد. همچنین افزایش زنجیره‌های A و B_1 نشاسته اصلاح شده با فراصوت با تخریب زنجیره‌های B_2 و B_3 همراه است، که نشان می‌دهد تیمار فراصوت باعث دپلمره کردن نواحی آمورف نشاسته می‌شود و با افزایش زمان تیمار فراصوت، این تیمار می‌تواند علاوه بر تأثیرگذاری نواحی آمورف بر نواحی کریستالی هم مؤثر باشد زیرا انرژی کافی برای باز کردن مارپیچ‌های دوگانه تأمین می‌شود [۷۱].

هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد تیمار فراصوت وزن مولکولی آمیلوپکتین را نسبت به وزن مولکولی آمیلوز کاهش چشمگیری می‌دهد؛ زیرا ترجیح تیمار فراصوت به تجزیه مولکول‌های پلیمری بزرگ‌تر می‌باشد [۷۲].

چان^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح شده با حمام فراصوت به

اندازه‌گیری کرد. باین‌حال، این تکنیک به دلایل زیادی نظیر وجود پلیمرهای با زنجیره بلند، انتخاب استانداردها و درجه پلیمریزاسیون دقت زیادی ندارد به همین دلیل این مقدار اندازه‌گیری شده را محتوای آمیلوز ظاهری می‌نامند [۷۹].

روش دیگر برای اندازه‌گیری میزان آمیلوز نشاسته، کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) می‌باشد. این روش علاوه بر اندازه‌گیری محتوای آمیلوز امکان تعیین توزیع‌های زنجیره‌ای مختلف مانند آمیلوپکتین و آمیلوز با زنجیره بلند را فراهم می‌کند. باین‌حال، این روش کار فشرده، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد [۸۰، ۸۱].

روش دیگر که برای اندازه‌گیری محتوای آمیلوز می‌توان نام برد کیت آمیلوز Megazyme می‌باشد که اصول این روش بر اساس رسوب آمیلوپکتین با لکتین کانکوالین A می‌باشد. باین‌حال، این روش نیاز به کنترل دقیق تجربی و پرهزینه می‌باشد [۸۰].

از سوی دیگر منابع مختلف نشاسته دارای محتوای آمیلوز متفاوت می‌باشند که این تنوع را می‌توان به عوامل بسیاری نظیر تفاوت ژنوتیپی، شرایط رشد، شرایط استخراج نشاسته و تکنیک‌های مختلف اندازه‌گیری نسبت داد [۸۲، ۸۳].

هم‌چنین نشاسته را می‌توان بر اساس محتوای آمیلوز به سه گروه اصلی تقسیم کرد. بافت آندوسپرم نشاسته‌های مومی حاوی کمتر از ۱۵ درصد آمیلوز می‌باشد و دلیل نام‌گذاری "مومی" برای این نوع نشاسته از ظاهر مومی بافت آندوسپرم سرچشمه می‌گیرد. این گروه از نشاسته دارای تبلور نسبی بالاتری می‌باشد و هم‌چنین انرژی بالاتری جهت ژلاتینه شدن نیاز دارد [۸۴]. گروه دیگر نشاسته آمیلوز بالا می‌باشد که از ۳۰ درصد آمیلوز یا بیشتر تشکیل شده است. ساختار گرانول این نشاسته‌ها ممکن است به دلیل داشتن انواع مختلف پلی ساکاریدها مانند مواد واسطه بین

کارامان^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد، توان ۱۰۰ وات، ۲۰۰-۲۵۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۳، ۵، ۲، ۵ و ۱، ۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که با افزایش توان تیمار فراصوت آسیب به ساختار مولکول‌های نشاسته افزایش می‌یابد و هم‌چنین بیشترین مقدار نشاسته آسیب‌دیده در عدس قرمز (۲/۰۴ درصد) و پس از آن به باقلا (۱/۹۵ درصد) مربوط می‌باشد [۷۶]. از سوی دیگر آسودو^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۸۰٪ باحالت پالسی (۲ ثانیه روشن و ۲ ثانیه خاموش) و به مدت ۳۰ دقیقه بر نشاسته لوبیاچیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت باعث دپلیمریزاسیون مولکول‌های نشاسته و تخریب شاخه‌های آمیلوپکتین می‌شود که این گزارش با نتایج تحقیق ژنگ^۳ و همکاران (۲۰۱۳)، مشابهت دارد [۶۳، ۷۷].

۲-۴- محتوای آمیلوز

آمیلوز یکی از اجزای اصلی گرانول‌های نشاسته می‌باشد که تأثیر زیادی بر خواص عملکردی نشاسته (قدرت تورم، قدرت ژل، خمیری شدن، حساسیت به آنزیم و خواص حرارتی) می‌گذارد [۱۱، ۷۸].

غلظت آمیلوز در نشاسته را می‌توان با روش‌های مختلفی اندازه‌گیری کرد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، روش تشکیل کمپلکس با ید می‌باشد که تشکیل کمپلکس ید - آمیلوز رنگ آبی را نشان می‌دهد که می‌توان آن را با اسپکتروفتومتر

1 - Karaman

2 - Acevedo

3 - Zheng

دو جزء اصلی آن تغییر شکل دهند. اجزای فرعی نشاسته‌ها را می‌توان به سه گروه مختلف تقسیم کرد که عبارتند از: مواد ذره‌ای، اجزای سطحی و اجزای داخلی. درحالی‌که پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، اسیدهای آمینه و برخی از اسیدهای نوکلئیک اجزای پایه سطحی هستند که می‌توان از گرانول‌های نشاسته استخراج کرد، لیپیدها بخش عمده‌ای از اجزای داخلی هستند [۸۵]. در میان نشاسته حبوبات محتوای آمیلوز عدس مانند نخود و لوبیا گاربازو منبع غنی از مواد مغذی ضروری متعدد می‌باشد که می‌تواند بخش مهمی از مصرف مواد مغذی روزانه انسان را تأمین کند. همچنین محتوای آمیلوز کل لوبیاچیتی (۳۵,۵-۳۵,۰٪) بسیار بیشتر از سایر نشاسته‌ها می‌باشد. این تفاوت به دلیل درصد تشکیل بالاتر کمپلکس زنجیره‌های آمیلوز با لیپیدهای نشاسته نسبت به سایر نشاسته حبوبات می‌باشد [۷۵].

۱-۲-۴- اثر فراصوت بر محتوای آمیلوز

تیمار فراصوت می‌تواند از طریق دپلیمره کردن مولکول آمیلوز، شکستن زنجیره مولکول‌های نشاسته و افزایش تولید مولکول‌های خطی، محتوای آمیلوز نشاسته را افزایش دهد چراکه تیمار فراصوت می‌تواند باعث ایجاد فشار بالا، نیروی برشی قوی و دمای بالا شود که زنجیره‌های مولکولی نشاسته را می‌شکند [۸۶]. از طرف دیگر اجزا جزئی مانند پروتئین و لیپید در گرانول‌های نشاسته می‌توانند بر عملکرد نشاسته تأثیر بگذارند. علاوه بر این، پروتئین باقیمانده با گرانول‌های نشاسته به شدت ترکیب می‌شود و ممکن است آنزیمولیز نشاسته را مهار کند [۵].

بینیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که نیروی کاویتاسیون امواج فراصوت از طریق دپلیمره کردن مولکول آمیلوز،

محتوای آمیلوز را افزایش می‌دهد [۶۹]. از سوی دیگر شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۱۰,۳۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تیمار فراصوت با دپلیمریزاسیون زنجیره‌های جانبی آمیلوپکتین باعث افزایش زنجیره‌های خطی می‌شود و افزایش محتوای آمیلوز نشاسته را به دنبال دارد همچنین با افزایش زمان تیمار فراصوت محتوای آمیلوز نشاسته افزایش یافت. از سوی دیگر در نشاسته ارزن، نخود و سیب‌زمینی افزایش زمان تیمار فراصوت باعث افزایش محتوای آمیلوز نشاسته‌های ذکر شده گردید [۷۱, ۷۲, ۸۷].

هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد تیمار فراصوت به طور قابل توجهی محتوای آمیلوز نشاسته نخود را از ۳۴,۰۸٪ به ۳۷,۸۲٪ افزایش می‌دهد؛ زیرا تیمار فراصوت باعث دپلیمریزاسیون نسبی زنجیره‌های آمیلوپکتین می‌شود. از طرف دیگر تیمار فراصوت باعث افزایش محتوای آمیلوز نشاسته‌های ذرت، ماش و ساگو شد [۷۲].

از طرف دیگر چان و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح شده با حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تیمار فراصوت از طریق دپلیمره کردن جزئی آمیلوز باعث افزایش زنجیره‌های خطی و افزایش محتوای آمیلوز ظاهری نشاسته می‌شود [۵۱]. مجید و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر تیمار فراصوت با توان کم، فرکانس ۳۳ کیلوهرتز به مدت زمان ۴۵ دقیقه بر نشاسته نخود و ماشک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که محتوای آمیلوز نشاسته نخود و ماشک بین ۲۸,۵۲-

می‌باشند و زنجیره‌های کوتاه و خارجی آمیلوپکتین کریستالیت‌ها را تشکیل می‌دهند [۸۴]. مقادیر بلورینگی نسبی بسته به منشأ گیاهی نشاسته از ۱۷ تا ۵۰ درصد متغیر می‌باشد و انواع نشاسته‌های مومی (آمیلوپکتین بالا) دارای مقادیر بلورینگی بالاتری نسبت به نشاسته‌های حاوی آمیلوز هستند [۹۰].

تبلور نسبی نشاسته‌های حبوبات: لوبیاچیتی < لوبیا سیاه < عدس < لوبیاچشم‌بلیلی < نخود. تفاوت در تبلور نسبی نشاسته‌های حبوبات به دلایل زیر می‌باشد: (۱) اندازه کریستال (۲) مقدار مناطق کریستالی (تحت‌تأثیر محتوای آمیلوپکتین و طول زنجیره آمیلوپکتین) (۳) جهت‌گیری مارپیچ‌های دوگانه در داخل مناطق کریستالی (۴) میزان تعامل بین مارپیچ‌های دوتایی [۹۱].

از طرف دیگر پراش اشعه ایکس برای آشکارکردن حضور و ویژگی‌های ساختارهای کریستالی گرانول‌های نشاسته استفاده می‌شود و نشاسته حبوبات دارای الگوی کریستالیتی نوع "C" می‌باشد که این الگوی پراش پرتو ایکس حد واسط بین الگوی پراش نوع A (غلات) و نوع B (غده) می‌باشد. همچنین اختلاف این الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به تفاوت‌های جزئی در طول زنجیره و مشخصات زنجیره‌های مولکول‌های آمیلوپکتین تشکیل‌دهنده می‌باشد [۹۲]. از طرفی پراش اشعه ایکس بیشتر نشاسته‌های حبوبات با دو خط با شدت بسیار قوی در زوایای ۱۷,۲ و ۱۸,۱ درجه ۲θ مشخص می‌شوند. همان‌طور که در بالا ذکر شد نشاسته‌های حبوبات دارای الگوی پراش اشعه ایکس نوع "C" می‌باشند ولی نشاسته نخودفرنگی دارای الگوی پراش اشعه ایکس نوع "B" می‌باشد. از سوی دیگر بلورینگی دو نوع نخود (کابلی و دسی) می‌تواند متفاوت باشد که این اختلاف به دلیل تفاوت در کسر آمیلوپکتین، نشاسته کابلی نسبت به نشاسته دسی می‌باشد و همچنین نشاسته نخود کابلی دارای درجه بلورینگی بالاتری می‌باشد.

۳۱,۰۸ گرم در ۱۰۰ گرم می‌باشد که این تفاوت به منشأ گیاهی، شرایط آب و هوایی و نوع خاک مربوط می‌شود. از طرف دیگر تیمار فراصوت هیچ تغییر معناداری در محتوای آمیلوز نشاسته نخود و ماشک ایجاد نمی‌کند [۷۴, ۸۸].

از سوی دیگر کارامان و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰,۱۰۰ وات، توان ۱۰۰ وات، ۲۵۰-۲۰۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۳,۵، ۲,۵ و ۱,۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که محتوای آمیلوز نشاسته حبوبات بین ۱۱,۶ تا ۸۸,۰ می‌باشد. همچنین در این گزارش میزان آمیلوز نشاسته حبوبات به ترتیب روبه‌رو گزارش شد: نشاسته نخود < نشاسته باقلا < نشاسته عدس قرمز < نشاسته عدس سبز. از طرف دیگر تیمار فراصوت باعث افزایش محتوای آمیلوز شد و بیشترین مقدار آمیلوز برای نشاسته عدس قرمز و باقلا اصلاح‌شده با تیمار فراصوت با دامنه فرکانس ۱۰۰ درصد می‌باشد [۷۶, ۸۹]. آسودو و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۸۰٪ باحالت پالسی (۲ ثانیه روشن و ۲ ثانیه خاموش) و به مدت ۳۰ دقیقه بر نشاسته لوبیاچیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت باعث دپلمریزاسیون مولکول‌های نشاسته و تخریب شاخه‌های آمیلوپکتین می‌شود و افزایش محتوای آمیلوز را به دنبال دارد [۷۷].

۳-۴- بلورینگی

گرانول‌های نشاسته دارای ساختار نیمه کریستالی می‌باشند که این ساختار به ترکیب، ساختار اجزای و تفاوت در مناطق آمورف و کریستالی مربوط می‌باشد. از طرفی آمیلوز و آمیلوپکتین به ترتیب مربوط به نواحی آمورف و کریستالی

از طرفی نشاسته‌های نخود دسی دارای محتوای آمیلوز بیشتر، محتوای کمتر ماریچ دوگانه می‌باشد [۹۳].

۴-۳-۱- اثر فراصوت بر بلورینگی

تیمار فراصوت می‌تواند در فرایند اولیه خود باعث حمله به نواحی آمورف گرانول‌های نشاسته شود و افزایش درجه بلورینگی را به دنبال داشته باشد، اما با افزایش توان و زمان تیمار فراصوت این تیمار می‌تواند همچنین به نواحی کریستالی گرانول‌های نشاسته آسیب وارد کند و کاهش درجه بلورینگی را به دنبال داشته باشد. چراکه نواحی آمورف گرانول‌ها نسبت به نواحی کریستالی در برابر تیمار فراصوت حساس‌تر هستند و نشاسته‌های با محتوای آمیلوز بالا از نظر ساختار و ویژگی آسان‌تر تحت تأثیر تیمار فراصوت قرار می‌گیرند [۴۷، ۹۴]. از سوی دیگر می‌توان چنین بیان کرد که تیمار فراصوت از طریق تغییر در مورفولوژی گرانول‌های نشاسته بلورینگی نشاسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین شرایط تیمار فراصوت یکی از عوامل تعیین‌کننده در تغییر درجه بلورینگی گرانول‌ها نشاسته می‌باشد.

لی^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، گزارش کردند که تیمار فراصوت (فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، توان ۸۰۰ وات، مدت زمان ۴ ساعت) نوع الگوی کریستالی نشاسته ذرت را تغییر نمی‌دهد؛ اما این تیمار باعث تخریب تقریباً ۲۵٫۱٪ از ساختار کریستالی نشاسته می‌شود که کاهش این درصد از ساختار کریستالی را به تشکیل کریستالیت‌های بسیار کوچک و کاهش درجه آرایش کریستالی نسبت دادند [۶۵].

از طرف دیگر هوانگ و همکاران (۲۰۰۷)، گزارش کردند که تیمار فراصوت در زمان اولیه تیمار دهی تا ۳ دقیقه باعث افزایش درجه بلورینگی نشاسته ذرت شد، اما با افزایش

مدت زمان تیماردهی بیشتر (۱۵ دقیقه) درجه بلورینگی کاهش یافت [۹۵].

بیتیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که نیروی کاویتاسیون امواج فراصوت از طریق تخریب ناحیه آمورف و تشکیل ناحیه کریستالی کوچک‌تر باعث کاهش درجه بلورینگی می‌شود و هیچ تغییری در الگوی کریستالیتی ایجاد نکرد [۶۹، ۹۶]. از طرف دیگر شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۳۰، ۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت نتوانست الگوی پراش اشعه ایکس را تغییر دهد ولی این تیمار باعث کاهش بلورینگی به دلیل تخریب ناحیه آمورف و ضعیف شدن ساختارهای بلوری قوی شد و همچنین این تیمار باعث بازآرایی ساختار کریستالی گردید و منجر به تشکیل یک ناحیه کریستالی کوچک‌تر شد [۷۱، ۸۷]. هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت با آسیب به گرانول‌های نشاسته باعث کاهش بلورینگی گردید [۹۷]. اما این تیمار الگوی کریستالیتی را تغییر نداد. از طرف دیگر هو و همکاران در سال ۲۰۱۹ هم به کاهش تبلور نسبی نشاسته اصلاح‌شده ارزن و نشاسته سیب‌زمینی با فراصوت نسبت به نشاسته طبیعی ارزن و نشاسته سیب‌زمینی اشاره کردند [۳۰، ۷۲].

چان و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح‌شده با حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که

۴-۴-ژلاتینه شدن

در نشاسته حبوبات، Tc-To از ۸,۰ (لوبیاچیتی) تا ۲۰,۸ (لوبیا سیاه) متغیر می‌باشد. تفاوت Tc-To بین لوبیاچیتی و سایر نشاسته‌های حبوبات، به دلیل دارا بودن درجه بالاتر از

۱۷.

کریستالی گرانول‌های نشاسته باعث کاهش آنتالپی ژلاتیناسیون گردید [۶۹].

شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۳۰، ۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت به دلیل تضعیف ساختار کریستالی ضعیف گرانول‌های نشاسته و ایجاد کریستالیت باقی‌مانده پایدارتر باعث افزایش دمای شروع (To)، دمای اوج (Tp)، دمای نهایی (Tc) شد. از طرف دیگر این تیمار به دلیل تخریب ساختار گرانول‌های نشاسته باعث نفوذ آسان آب به داخل گرانول‌های نشاسته و تسهیل خروج مولکول‌های آمیلوز از داخل گرانول‌های نشاسته شد که این مولکول‌های آمیلوز خارج‌شده از گرانول‌های نشاسته در دمای بالا تا حدی روی سطح نشاسته ژلاتینه شد و از واکنش مولکول نشاسته داخلی با مولکول‌های آب جلوگیری کرد که افزایش آنتالپی ژلاتیناسیون را به دنبال داشت [۷۱، ۱۰۳]. از سوی دیگر کارامان و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰، ۱۰۰، ۷۰ درصد، توان ۱۰۰ وات، ۲۰۰-۲۵۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۳، ۵، ۲، ۵ و ۱، ۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت به دلیل تضعیف ساختار کریستالی گرانول‌های نشاسته و ایجاد کریستالیت باقی‌مانده پایدارتر نشاسته‌های باقلا و عدس سبز اصلاح‌شده با تیمار فراصوت دمای اوج (Tp) و دمای نهایی (Tc) را افزایش داد همچنین بیشترین تغییر مربوط به نشاسته باقلا اصلاح‌شده با فراصوت بود. از طرف دیگر نشاسته نخود به دلیل بالاترین میزان آمیلوز (دارای ناحیه آمورف بیشتر و کریستالی کمتر) کمترین افزایش دمای

همگنی کریستال‌ها در گرانول‌های نشاسته لوبیاچیتی می‌باشد. از طرف دیگر آنتالپی ژلاتیناسیون نشاسته حبوبات از 12.6 J/g (نخود چیتی، رقم Desiray) تا 24.9 J/g (لوبیاچیتی) به دلیل محتوای آمیلوپکتین متفاوت متغیر می‌باشد. آنتالپی ژلاتیناسیون بالای نشاسته لوبیاچیتی به دلیل شاخه‌های بلند بیرونی «A» زنجیره‌های آمیلوپکتین، ماریچ‌های دوتایی طولانی‌تری را تشکیل می‌دهند که به سطح بالاتری از انرژی حرارتی برای از هم گسیختن و ذوب نیاز دارند [۱۰۱].

۱-۴-۴-۱ اثر فراصوت بر ژلاتیناسیون نشاسته

در زمان اولیه اعمال تیمار فراصوت تخریب مناطق آمورف در گرانول‌های نشاسته اتفاق می‌افتد که افزایش بلورینگی نشاسته و در نتیجه افزایش دمای ژلاتینه شدن و آنتالپی ژلاتیناسیون را به دنبال دارد [۹۵]. با افزایش زمان اعمال تیمار فراصوت به تدریج تخریب ساختار کریستالی گرانول‌های نشاسته اتفاق می‌افتد که کاهش بلورینگی و در نتیجه کاهش دمای ژلاتینه شدن و آنتالپی ژلاتیناسیون را به دنبال دارد [۸]. از طرف دیگر بسته به نوع و ترکیب نشاسته و شرایط تیمار فراصوت تغییر دما و آنتالپی ژلاتیناسیون می‌تواند متفاوت باشد [۱۰۲].

بیتیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت از طریق تغییر در ساختار گرانول نشاسته دمای شروع (To) و دمای نهایی (Tc) را کاهش داد. همچنین این تیمار به دلیل ژلاتینه کردن گرانول‌های نشاسته که به سازمان‌دهی اجزای نشاسته (آمیلوز، آمیلوپکتین) بستگی دارد، دمای اوج (Tp) را کاهش داد. از طرف دیگر این تیمار با تخریب ساختار

متورم می‌شوند، ساختار گرانولی خود را از دست می‌دهند و در نهایت از هم جدا می‌شوند. ویسکوزیته خمیر زمانی که درصد گرانول‌های نشاسته متورم در حداکثر است، به حداکثر افزایش می‌یابد اما با جدا شدن گرانول‌های نشاسته ویسکوزیته کاهش می‌یابد [۱۰۰]. از سوی دیگر در طی مرحله سرمایش، به دلیل پدیده بازگشت به عقب، نشاسته ژل تشکیل می‌دهد. یک نمودار خمیری شدن با پارامترهای رایج اندازه‌گیری شده توسط تحلیلگر سریع ویسکوزیته (RVA) در شکل پایین نمایش داده شده است [۷۸].

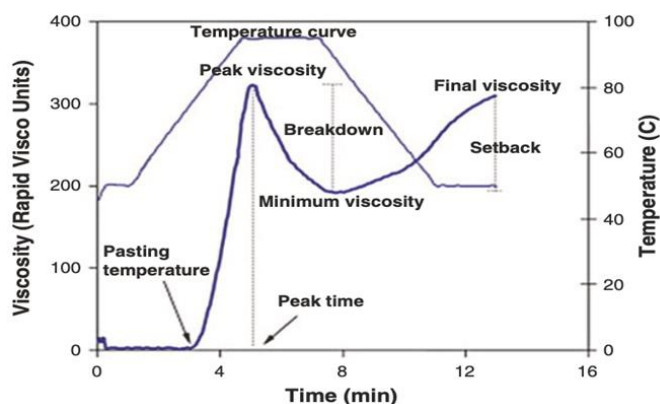


Fig1 Pasting profile of Legume starch measured by RVA

ویسکوزیته حداکثر (PV^1) نشان‌دهنده حداکثر قدرت تورم گرانول‌های نشاسته قبل از تجزیه است که به دلیل اختلال در ساختار شبکه داخلی نشاسته ایجاد می‌شود. از طرف دیگر شکست ویسکوزیته (BD^2) نشان‌دهنده پایداری حرارتی خمیر نشاسته است [۱۰۳]. ویسکوزیته شکست (TV^3) کاهش ویسکوزیته را به دلیل تجزیه گرانول‌های نشاسته در دمای بالا نشان می‌دهد.

شروع (To)، دمای اوج (Tp)، دمای نهایی (Tc) را نشان داد [۲۱]. از سوی دیگر بیشترین آنتالپی ژلاتیناسیون مربوط به نشاسته‌های عدس سبز، عدس قرمز و نخود اصلاح‌شده با فراصوت (با دامنه‌های فرکانس ۱۰۰ درصد، ۴۰ درصد و ۷۰ درصد) بود. همچنین کمترین مقدار آنتالپی ژلاتیناسیون مربوط به نشاسته نخود اصلاح‌شده با فراصوت بود این مقدار به دلیل بالاترین محتوای آمیلوز نخود در بین نشاسته‌های حبوبات می‌باشد. این اختلاف در آنتالپی ژلاتیناسیون مربوط به عوامل متعددی مانند شکل و اندازه گرانول، طول زنجیره آمیلوپکتین، وجود استرهای فسفات و درجه تبلور می‌باشد [۷۶]. از طرف دیگر آسودو و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۸۰٪ با حالت پالسی (۲ ثانیه روشن و ۲ ثانیه خاموش) و به مدت ۳۰ دقیقه بر نشاسته لوبیاجیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که نشاسته طبیعی چشم‌بلبلی مقادیر دمای شروع (To)، دمای اوج (Tp)، دمای نهایی (Tc) بالاتر از سایر نشاسته‌های حبوبات را دارا می‌باشد که این تفاوت در پارامترهای دمای ژلاتینه شدن به دلیل تفاوت در کریستالیت نشاسته بسته به منشأ نشاسته می‌باشد. از طرف دیگر تیمار فراصوت از طریق تخریب ساختار کریستالی و کاهش نظم نواحی کریستالی باعث کاهش دمای اوج (Tp)، دمای نهایی (Tc) و دمای ژلاتینه شدن نشاسته چشم‌بلبلی اصلاح‌شده با فراصوت گردید [۷۷، ۱۰۴].

۴-۵-خمیری شدن

فرآیند اندازه‌گیری ویسکوزیته سوسپانسیون نشاسته در حین و پس از ژلاتینه شدن را خمیری شدن می‌نامند. برای تجزیه و تحلیل ویژگی خمیری شدن نشاسته، یک سوسپانسیون نشاسته را هم زده و با ویسکومتر تحت شرایط گرمایش و سرمایش برنامه‌ریزی شده این ویژگی را بررسی می‌کنند. از طرفی در حین حرارت دادن، گرانول‌های نشاسته

1- Peak viscosity
2- Breakdown
3 - Trough viscosity

نشاسته حبوبات به دلیل تجمع کمتر زنجیره نشاسته در نشاسته لوبیاچیتی می‌باشد.

از طرف دیگر نشاسته لوبیا سیاه ویسکوزیته بالاتر در ۹۵ درجه سانتی‌گراد را دارا می‌باشد؛ چراکه نشاسته لوبیا سیاه نسبت به سایر نشاسته حبوبات دارای بلورینگی کمتر، قدرت تورم بالاتر، محتوای آمیلوپکتین بالاتر می‌باشد. همچنین نشاسته لوبیا سیاه دارای میزان بیاتی بالاتر نسبت به سایر نشاسته‌ها می‌باشد. میزان بیاتی بالاتر لوبیا سیاه نسبت به سایر نشاسته حبوبات به دلیل محتوای بالا آمیلوپکتین و تجمع قوی‌تر زنجیره‌های نشاسته می‌باشد [۱۰۶].

۱-۵-۴- اثر فراصوت بر خمیری شدن نشاسته

امواج فراصوت به گرانول‌های نشاسته آسیب می‌رساند، این گرانول‌های آسیب‌دیده بیشتر، آب درون آن‌ها نفوذ می‌کند که در نتیجه باعث تسهیل هیدراسیون و تورم بیشتر گرانول‌ها می‌شود و کاهش ویسکوزیته خمیری شدن را به دنبال دارد. همچنین با کنترل شرایط فراصوت می‌توان آسیب به گرانول‌های نشاسته را بدون زنجیره‌های مولکولی نشاسته به دست آورد که می‌توان ویسکوزیته کمتری را حاصل کرد [۶۵]. از سوی دیگر تیمار فراصوت می‌تواند ویسکوزیته خمیری شدن را افزایش دهد که این تغییرات در ویسکوزیته خمیری شدن به شرایط تیمار فراصوت و ترکیب نشاسته بستگی دارد. چراکه تیمار فراصوت می‌تواند به میزان متفاوت آسیب در نواحی آمورف و کریستالی گرانول‌های نشاسته ایجاد کند [۱۰۷]. همچنین تحت شرایط فراصوت یکسان، ویسکوزیته خمیری شدن نشاسته با آمیلوز بالا بسیار بیشتر از نشاسته مومی (آمیلوپکتین بالا) تحت تأثیر امواج فراصوت قرار می‌گیرد، زیرا آمیلوز در گرانول‌ها حساس‌تر نسبت به تیمار فراصوت می‌باشد [۴۷].

شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه

دمای خمیری شدن (PT^۱) حداقل دمای مورد نیاز برای ژلاتینه شدن است. ویسکوزیته نهایی (FV^۲) افزایش ویسکوزیته خمیر نشاسته را در فرایند خنک‌سازی به دلیل تجمع مولکولی آمیلوز نشان می‌دهد. عوامل زیادی از جمله اندازه ذرات، وجود ناخالصی‌ها، محتوای آمیلوز، روش‌ها و پارامترهای آزمایشی مختلف مورد استفاده آزمون اندازه‌گیری ویژگی خمیری شدن (pH، غلظت سوسپانسیون نمونه، دما و نرخ برش) می‌توانند بر خواص خمیری شدن نشاسته تأثیر بگذارد [۸۳].

بیاتی نشاسته را می‌توان با همان تکنیک‌های مورد استفاده برای ژلاتینه شدن نشاسته اندازه‌گیری کرد. عمل بیاتی نشاسته پدیده‌ای است که در آن ساختار نشاسته ژلاتینه شده تا حدی مرتب شده و در طی یک دوره ذخیره‌سازی مجدد، متبلور می‌شود. تغییر در بیاتی نشاسته‌ها به عوامل زیادی از جمله نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین، وجود لیپیدها، اندازه مولکولی و دما مرتبط است. نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بیاتی نشاسته است؛ زیرا آمیلوز بسیار سریع‌تر از آمیلوپکتین بیات می‌شود. بیاتی نشاسته یک ویژگی مهم برای کاربردهای نشاسته است، چراکه خواص مواد غذایی نشاسته‌ای مانند چسبندگی، قابلیت هضم و سختی ژل تحت تأثیر عمل بیاتی نشاسته قرار دارند [۱۰۵].

همچنین نشاسته لوبیاچیتی دارای دمای خمیری شدن بالاتر، ویسکوزیته کمتر (در دمای ۹۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و میزان بیاتی کمتر نسبت به سایر نشاسته‌ها می‌باشد. ویسکوزیته پایین در ۹۵ درجه سانتی‌گراد به دلیل بلورینگی بالاتر، قدرت تورم کمتر، محتوای آمیلوز کمتر می‌باشد. از سوی دیگر میزان بیاتی کمتر لوبیاچیتی نسبت به سایر

1 - Pasting Temperature
2 - Final viscosity

نشاسته متورم شده را سخت می‌کند که کاهش شکست ویسکوزیته (BD) را به دنبال دارد [۷۲].

چان و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح‌شده با حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تیمار فراصوت از طریق تضعیف ساختار گرانول‌های نشاسته و ایجاد شکستگی در زنجیره‌های نشاسته باعث کاهش ویسکوزیته حداکثر شد. از طرف دیگر تیمار فراصوت از طریق تضعیف ساختار گرانول‌های نشاسته و آسان کردن ایجاد اختلال در گرانول‌های نشاسته باعث افزایش شکست ویسکوزیته (BD) گردید [۵۱]. از طرف دیگر مجید و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر تیمار فراصوت با توان کم، فرکانس ۳۳ کیلوهرتز به مدت زمان ۴۵ دقیقه بر نشاسته نخود و ماشک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که ویسکوزیته حداکثر (PV) نشاسته نخود طبیعی (۳۹۰۳،۳ cP) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نشاسته ماشک (۳۶۰۲،۶۷ cP) بود. همچنین تیمار فراصوت از طریق تخریب زنجیره‌های نشاسته و کاهش قدرت تورم، ویسکوزیته حداکثر و ویسکوزیته شکست (TV) را کاهش داد. از طرف دیگر تیمار فراصوت شکست ویسکوزیته نشاسته نخود را تغییر نداد درحالی‌که این تیمار شکست ویسکوزیته نشاسته ماشک را به دلیل کاهش ویسکوزیته حداکثر را کاهش داد. از سوی دیگر تیمار فراصوت ویسکوزیته نهایی (FV) نشاسته نخود و ماشک را به دلیل کاهش درجه پلیمریزاسیون زنجیره‌های نشاسته، شکستن زنجیره‌های نشاسته و کاهش ویسکوزیته خمیر کاهش داد. همچنین تیمار فراصوت ویسکوزیته بازگشت به عقب نشاسته نخود و ماشک را به دلیل دپلیمریزاسیون آمیلوز شسته شده و آمیلوپکتین خطی بلند کاهش داد که این کاهش در نشاسته ماشک اصلاح‌شده با فراصوت نسبت به نشاسته نخود اصلاح‌شده با فراصوت چشمگیرتر بود. از

روشن) به مدت ۳۰،۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت ویسکوزیته حداکثر (PV)، ویسکوزیته شکست (TV) و ویسکوزیته نهایی (FV) را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد زیرا این تیمار باعث تخریب ساختار کریستالی، جهت‌گیری مجدد مولکول‌های نشاسته و تزریق آب بیشتر به گرانول‌های نشاسته و افزایش تورم می‌شود [۸۷]. از سوی دیگر تیمار فراصوت شکست ویسکوزیته (BD) و ویسکوزیته بازگشت به عقب (SBV) را کاهش داد چراکه تیمار فراصوت باعث کاهش شستشوی آمیلوز و افزایش فعل‌وانفعالات بین زنجیره آمیلوز و آمیلوپکتین می‌شود. همچنین با افزایش زمان تیمار فراصوت کاهش شکست ویسکوزیته (BD) و ویسکوزیته بازگشت به عقب (SBV) بیشتر شد زیرا درجه تخریب زنجیره‌های نشاسته با زمان اعمال تیمار نسبت مستقیم دارد. کاهش شکست ویسکوزیته (BD) نشان‌دهنده افزایش پایداری خمیر نشاسته در برابر حرارت و هم زدن مکانیکی می‌باشد [۷۱]. از سوی دیگر هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت ویسکوزیته حداکثر، ویسکوزیته شکست، ویسکوزیته نهایی و ویسکوزیته بازگشت به عقب را افزایش می‌دهد. زیرا نشاسته‌های با محتوای آمیلوز بالاتر، ویسکوزیته بیشتری دارند، همچنین تیمار فراصوت محتوای آمیلوز را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر تیمار فراصوت باعث دپلیمریزاسیون آمیلوپکتین می‌شود که بازآرایی بهتر زنجیره‌های مولکول نشاسته و پایداری مناطق آمورف در گرانول‌های نشاسته را به دنبال دارد [۳۰]. از سوی دیگر تیمار فراصوت به دلیل تقویت ناحیه آمورف گرانول‌های نشاسته، تجزیه شدن گرانول‌های

همچنین قدرت تورم ناشسته به شدت وابسته به دما می باشد؛ زیرا با افزایش دما در ساختار کریستالی ناشسته اختلال ایجاد می شود و تقویت پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب و آمیلوز - آمیلوپکتین اتفاق می افتد [۱۰۹].

تفاوت در قدرت تورم (SP) و شاخص محلول در آب (WSI) بین ناشسته ها به دلیل تنوع در ظرفیت نگهداری آب آن ها می باشد و همچنین ظرفیت نگهداری آب تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله ویژگی های آمیلوز و آمیلوپکتین (نسبت ها، وزن مولکولی، طول زنجیره و...)، وجود اجزای جزئی (لیپیدها، فسفات ها) و ساختار گرانولی ناشسته می باشد. از طرف دیگر حلالیت یک شاخص ضروری برای ارزش استفاده از ناشسته محلول در آب سرد است که نشان دهنده میزان انحلال و رسوب زنجیره های مولکولی می باشد. همچنین حلالیت به حضور مولکول های محلول مانند آمیلوز، قندها در گرانول های ناشسته نسبت داده می شود [۱۰].

ناشسته حبوبات به دلیل دارا بودن پیوندهای قوی بین اجزای ناشسته که در یک دما سست می شوند، نه در چندین دما مانند ذرت [۱۱۰] دارای قدرت تورم محدود، تک مرحله ای و قدرت حلالیت کم می باشند. همچنین پیوندهای قوی بین اجزای ناشسته حبوبات به دلیل آرایش منظم زنجیره های پلیمری در گرانول ناشسته است که حداکثر تعامل از طریق پیوند هیدروژنی را مطلوب می کند. همچنین ناشسته حبوبات تنوع زیادی در قدرت تورم (SP) و حلالیت دارند. در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد، قدرت تورم و حلالیت ناشسته حبوبات به ترتیب در محدوده ۱۱-۲۶ و ۸-۲۵٪ می باشد و با افزایش دما (۶۰-۹۰ درجه سانتی گراد) افزایش سریع در SP و حلالیت به وجود می آید. چراکه افزایش دما (۶۰-۹۰ درجه سانتی گراد) ذوب کریستال های ناشسته را به دنبال دارد که منجر به افزایش آنتروپی می شود و پیوند

طرف دیگر تیمار فراصوت باعث کاهش دمای خمیری شدن ناشسته نخود و ماشک شد که این دمای پایین خمیری شدن نشان دهنده مقاومت کم در برابر تورم و پارگی می باشد [۷۴]. آسودو و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۸۰٪ باحالت پالسی (۲ ثانیه روشن و ۲ ثانیه خاموش) و به مدت ۳۰ دقیقه بر ناشسته لوبیاچیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت باعث افزایش دمای خمیری شدن ناشسته لوبیاچیتی گردید. همچنین تیمار فراصوت ویسکوزیته حداکثر را از طریق افزایش پیوندهای بین مولکولی در زنجیره های ناشسته، محدود کردن هیدراتاسیون و کاهش قدرت تورم، کاهش داد [۱۰۸]. از طرف دیگر تیمار فراصوت از طریق افزایش فعل و انفعالات و تقویت پیوند بین مولکول های آمیلوز و آمیلوپکتین ساختار پایدارتری را تشکیل داد که کاهش شکست ویسکوزیته، قدرت تورم محدودتر و پایداری حرارتی و مکانیکی بیشتر را در ناشسته اصلاح شده با تیمار فراصوت به دنبال داشت. از سوی دیگر تیمار فراصوت باعث کاهش ویسکوزیته بازگشت به عقب گردید [۷۷].

۴-۶- قدرت تورم

با گرم کردن ناشسته با مقدار اضافی آب گرانول های ناشسته متورم می شوند. خواص نگهداری آب ناشسته به طور کلی به عنوان قدرت تورم (SP^۱) و شاخص محلول در آب (WSI^۲) بیان می شود [۸۲].

قدرت تورم ناشسته مربوط به هیدراتاسیون، برهمکنش بین مولکول های آمیلوز و آمیلوپکتین، پیوندهای درون مولکولی و ارتباط مناطق کریستالی می باشد. به بیان دیگر قدرت تورم و حلالیت معیارهایی از میزان برهمکنش بین زنجیره های ناشسته در مناطق آمورف و کریستالی را فراهم می کند.

1 - Swelling power
2 - Water-soluble index

هیدروژنی را که در نواحی کریستالی وجود دارند، سست می‌کند[۱۱۱].

از سوی دیگر قدرت تورم نشاسته حبوبات تحت تأثیر موارد زیر می‌باشد: (۱) کمپلکس‌های آمیلوز - لیپیدی (این کمپلکس قدرت تورم را کاهش می‌دهد) (۲) یک شبکه با پیوند قوی (۳) ساختار مولکولی آمیلوپکتین. همچنین قدرت تورم نشاسته حبوبات در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد از الگوی زیر پیروی می‌کند: (لوبیا سیاه < نخود- نخود صاف < عدس < لوبیاچیتی < لوبیا دریایی)، تفاوت در قدرت تورم بیشتر تحت تأثیر تفاوت در طول زنجیره آمیلوپکتین می‌باشد و کمتر تحت تأثیر کمپلکس‌های آمیلوز - لیپیدی قرار می‌گیرد. نشاسته لوبیاچیتی به دلیل وجود تعداد زیادی از کریستالیت‌ها که این کریستالیت‌ها از ارتباط بین زنجیره‌های بلند آمیلوپکتین تشکیل می‌شوند باعث افزایش پایداری گرانول‌ها و در نتیجه کاهش قدرت تورم نشاسته می‌شود[۱۱۲].

۴-۶-۱- اثر فراصوت بر قدرت تورم نشاسته

تیمار فراصوت به دلیل افزایش نفوذ آب و هیدراتاسیون گرانول‌های نشاسته باعث افزایش قدرت تورم و حلالیت نشاسته می‌شود[۶۳]. همچنین نوع و ترکیب نشاسته می‌تواند بر تغییر در قدرت تورم و حلالیت گرانول‌ها که تحت تأثیر فراصوت قرار می‌گیرد تأثیر بگذارد[۸]. تیمار فراصوت قدرت تورم و حلالیت نشاسته‌های با محتوای آمیلوز بالا را بیشتر نشاسته‌های مومی افزایش می‌دهد زیرا آمیلوز موجود در گرانول‌های نشاسته نسبت به فراصوت حساس‌تر است. از سوی دیگر پارامترهای مختلف فراصوت نیز بر تغییر قدرت تورم و حلالیت نشاسته مؤثر می‌باشند[۴۷].

بیتیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت از طریق تأثیر نیروهای کاویتاسیون بر جهت‌گیری و چیدمان مولکول‌های آمیلوز باعث کاهش حلالیت هردو نشاسته نخود و عدس شد. از سویی دیگر این تیمار از طریق کاهش اندازه گرانول‌های نشاسته باعث افزایش تعامل با گروه‌های هیدروکسیل مولکول‌های آب شد که این افزایش تعامل افزایش قدرت تورم هردو نشاسته نخود و عدس را به دنبال داشت[۱۱۳]. همچنین تغییر در چیدمان مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین تغییر در آرایش گرانول‌های نشاسته را به دنبال دارد زیرا تیمار فراصوت مسئول شکستن پیوندهای مولکولی است. افزایش قدرت تورم نشاسته نخود و عدس اصلاح‌شده با تیمار فراصوت به دلیل تغییر در آرایش گرانول‌های نشاسته می‌باشد[۶۹]. از طرف دیگر شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۳۰، ۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که با افزایش دما از ۵۰ به ۹۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تضعیف پیوند هیدروژنی گرانول‌های نشاسته باعث تسریع در شسته شدن آمیلوز شد و افزایش حلالیت و قدرت تورم را به دنبال داشت. از سوی دیگر تیمار فراصوت از طریق نیروی کاویتاسیون باعث آسیب به گرانول‌های نشاسته شد و در نتیجه افزایش حلالیت نشاسته ماش را به دنبال داشت. همچنین حلالیت نشاسته ماش اصلاح‌شده با تیمار فراصوت با افزایش زمان تیمار روند افزایشی را نشان داد. از طرف دیگر تیمار فراصوت از طریق اختلال در ساختار مولکولی مناطق کریستالی باعث تسهیل نفوذ مولکول‌های آب به مناطق آمورف گرانول‌های نشاسته گردید و در نتیجه این تیمار قدرت تورم نشاسته ماش را افزایش داد[۱۱۴]. همچنین قدرت تورم نشاسته

ماش اصلاح شده با تیمار فراصوت با افزایش زمان تیمار روند افزایشی را نشان داد [۷۱].

هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که تیمار فراصوت تأثیر غیرقابل توجهی بر قدرت تورم نشاسته نخود دارد به جز در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد که در آن تیمار فراصوت به دلیل دپلمیریزاسیون مولکولهای نشاسته باعث کاهش قدرت تورم نشاسته نخود شد [۱۱۵]. از سوی دیگر با افزایش دما از ۵۰ به ۹۰ درجه سانتی گراد، شاخص حلالیت نشاسته نخود به دلیل شسته شدن بیشتر آمیلوز افزایش یافت. همچنین تیمار فراصوت از طریق دپلمیریزاسیون مولکولهای نشاسته باعث افزایش نسبت زنجیره‌های کوتاه شد که افزایش هیدراتاسیون و حلالیت نشاسته نخود را به دنبال داشت [۷۲]. از سوی دیگر چان و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح شده با حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که نشاسته ماش در مقایسه با نشاسته سیب زمینی، نشاسته ساگو و نشاسته ذرت به دلیل محتوای آمیلوز بالاتر قدرت تورم پایین‌تری دارد. از طرف دیگر تیمار فراصوت تغییری در قدرت تورم نشاسته ماش ایجاد نکرد. که این عدم تغییر در قدرت تورم به دلیل وجود پیوندهای متقابل پپتیدی در آمیلوپکتین نشاسته ماش می‌باشد که باعث حفظ ساختار مولکولهای نشاسته می‌شود. همچنین تیمار فراصوت از طریق دپلمیریزاسیون و تضعیف ساختاری مولکولهای نشاسته باعث افزایش حلالیت نشاسته ماش شد [۵۱].

مجید و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر تیمار فراصوت با توان کم، فرکانس ۳۳ کیلوهرتز به مدت زمان ۴۵ دقیقه بر نشاسته نخود و ماش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که قدرت تورم نمونه‌های نشاسته نخود و ماش

طبیعی با افزایش دما (۵۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد) به دلیل تضعیف برهمکنش‌های بین مولکولی مانند پیوند هیدروژنی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت [۱۱۶]. همچنین قدرت تورم نخود اصلاح شده با تیمار فراصوت و نشاسته ماشک اصلاح شده با تیمار فراصوت نسبت به نشاسته طبیعی کاهش پیدا نکرد، ولی زمانی که تا دمای ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شدند به دلیل دپلمیریزاسیون مولکولهای نشاسته قدرت تورم کاهش یافت. از سوی دیگر شاخص حلالیت نشاسته نخود و ماشک طبیعی با افزایش دما به ترتیب از افزایش یافت و بیشترین حلالیت در دمای ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد به دلیل شسته شدن آمیلوز بیشتر در دمای بالاتر ظاهر شد. همچنین تیمار فراصوت شاخص حلالیت را افزایش داد که بیشترین مقدار در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و کمترین آن در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد ظاهر شد [۷۴]. از طرف دیگر کارامان و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد، توان ۱۰۰ وات، ۲۰۰-۲۵۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۳، ۵، ۲، ۵ و ۱، ۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که بالاترین قدرت تورم را نشاسته عدس سبز در بین نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز به دلیل کمترین میزان آمیلوز، هم برای نمونه‌های طبیعی و هم برای نمونه‌های تیمار شده با فراصوت دارد. همچنین قدرت تورم نشاسته نخود به نسبت با افزایش دامنه فراصوت کاهش یافت. درحالی که نشاسته باقلا و عدس قرمز هیچ تغییر قابل توجهی را به عنوان تابعی از دامنه فراصوت نشان ندادند و در بین نشاسته‌های ذکر شده نشاسته عدس سبز اصلاح شده با تیمار فراصوت (با دامنه فرکانس ۴۰٪) کمترین قدرت تورم را نشان داد [۷۴]. از سوی دیگر دمای کمتر از ۶۰ درجه سانتی گراد در اکثر نشاسته‌های حبوبات

هیچ تورم گرانول قابل اندازه‌گیری رخ نداد، درحالی‌که در دمای بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد قدرت تورم قابل اندازه‌گیری شد چراکه برای شکستن برهمکنش‌های قوی (پیوند هیدروژنی) بین زنجیره‌های آمیلوز که در مناطق آمورف گرانول قرار دارند، انرژی حرارتی بالایی لازم است [۷۶].

۷-۴- مورفولوژی

به‌طورکلی گرانول‌های نشاسته ساختار نیمه کریستالی دارند که این ساختار نیمه کریستالی متشکل از مولکول‌های آمیلوپکتین و آمیلوز می‌باشد. گرانول‌های نشاسته اغلب با توجه به بسیاری از ویژگی‌ها از جمله شکل، اندازه، توزیع، چندشکلی و کریستالی بودن آن‌ها توصیف می‌شوند. این ویژگی‌ها به‌شدت به طیف وسیعی از عوامل مانند منشأ گیاه‌شناسی، شرایط رشد و فیزیولوژی گیاه مرتبط می‌باشد. تکنیک‌های مختلفی برای مشاهده مورفولوژی گرانول‌های نشاسته مانند میکروسکوپ نوری (LM^۱)، میکروسکوپ نور پلاریزه (PLM^۲)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۳)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM^۴) و تکنیک پراکندگی نور لیزری (LS^۵) وجود دارد. اندازه گرانول نشاسته به‌طور گسترده‌ای متفاوت است و قطر آن ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر متفاوت می‌باشد [۱۱]. اندازه گرانول‌های نشاسته با برخی از خواص عملکردی نشاسته مانند قدرت تورم، حلالیت و حساسیت آنزیمی مرتبط است. اشکال زیادی در گرانول‌های نشاسته یافت می‌شود. به‌طورکلی، بیشتر گرانول‌های نشاسته بیضی، گرد و کروی شکل هستند، اما اشکال چندضلعی و بیضی کشیده نیز یافت می‌شود [۱۱۷].

اندازه گرانول‌های نشاسته حبوبات بسته به منبع نشاسته از ۴ تا ۸۵ میکرومتر متغیر می‌باشند. بیشتر گرانول‌های نشاسته حبوبات بیضی‌شکل هستند، اگرچه گرانول‌های کروی، گرد، بیضی کشیده نیز یافت می‌شوند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطوح همه گرانول‌های نشاسته حبوبات صاف و بدون هیچ‌گونه شکافی هستند. همچنین بیشتر نشاسته‌های حبوبات دارای گرانول‌های ساده می‌باشند، به‌استثنای نشاسته نخود چروکیده که دارای مخلوطی از گرانول‌های ساده و مرکب می‌باشد. نشاسته لوبیاجیتی بیشترین تنوع (طول و عرض) را در توزیع اندازه در بین نشاسته حبوبات نشان می‌دهد [۷۵].

۷-۴-۱ اثر فراصوت بر مورفولوژی گرانول نشاسته

تیمار فراصوت اغلب منجر به تغییرات مورفولوژیکی گرانول‌های نشاسته با ایجاد شکاف‌ها و منافذ و آسیب رساندن به گرانول‌ها می‌شود. عوامل زیادی می‌توانند بر اثر تیمار فراصوت بر مورفولوژی گرانول‌های نشاسته تأثیر بگذارند:

۱- نوع و ساختار گرانول‌های نشاسته و غلظت سوسپانسیون نشاسته. با افزایش غلظت سوسپانسیون نشاسته آسیب به گرانول‌های نشاسته کاهش می‌یابد [۷۳].

۲- پارامترهای تیمار فراصوت: توان، فرکانس، دامنه فرکانس، مدت‌زمان اعمال تیمار فراصوت. افزایش توان ورودی تیمار فراصوت گرانول‌ها نشاسته تمایل به تجمع دارند و همچنین با افزایش مدت‌زمان اعمال تیمار فراصوت آسیب بیشتر به گرانول‌های نشاسته وارد می‌شود [۹۵].

از طرف دیگر تیمار فراصوت دو فرکانس (۲۵ و ۸۰ کیلوهرتز) نسبت به تیمار فراصوت تک فرکانس (۲۵

- 1 - Light microscopy
- 2 - Polarized light microscopy
- 3 - Scanning electron microscopy
- 4 - Transmission electron microscopy
- 5 - Laser light scattering

گرانول‌های نشاسته ماش را تغییر نداد. اگرچه این تیمار به دلیل تشکیل سریع و فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون و در نتیجه ایجاد نیروی برشی قوی شیارها و شکاف‌هایی را در سطح گرانول‌های نشاسته ایجاد کرد [۷۱].

هان و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه بر نشاسته نخود را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که نشاسته نخود طبیعی دارای شکل کره‌ای یا بیضی کشیده می‌باشد و همچنین سطح صاف و بدون شیار و شکاف دارد. از طرف دیگر تیمار فراصوت هیچ تغییر قابل توجهی در ساختار مورفولوژیکی نشاسته نخود ایجاد نکرد [۷۲]. از سوی دیگر چان و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و ساختاری نشاسته ماش اصلاح شده با حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشاسته ماش اصلاح شده با فراصوت نشان داد که تیمار فراصوت نمی‌تواند مورفولوژی نشاسته ماش را تغییر دهد و هیچ شکاف و منافذ برجسته‌ای در گرانول‌های نشاسته ایجاد کند [۵۱].

کارامان و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰، ۱۰۰، ۷۰ درصد، توان ۱۰۰ وات، ۲۰۰-۲۵۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۳، ۵، ۲، ۱، ۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز نشان داد که بیشتر گرانول‌های نشاسته حبوبات دارای شکل بیضی یا بیضی کشیده هستند. اگرچه، به ندرت به شکل گرد مشاهده

کیلوهرتز یا ۸۰ کیلوهرتز) فرورفتگی و منافذ بیشتری بر روی سطح گرانول‌های نشاسته ایجاد می‌کند [۶۳].

۳- شرایط اعمال تیمار فراصوت: دما، نوع تجهیزات فراصوت (پروپ یا حمام) و نوع گاز جو. همچنین دما بالا باعث افزایش آسیب به گرانول‌های نشاسته می‌شود و تیمار فراصوت می‌تواند تغییرات بیشتری را در مورفولوژی گرانول‌های نشاسته ایجاد کند [۶۷].

از سوی دیگر نوع گاز بر میزان آسیب به گرانول‌های نشاسته تأثیر می‌گذارد. به طور مثال اتمسفر هیدروژن بیشترین آسیب را به دنبال دارد و پس از آن هوا و اکسیژن، دی‌اکسید کربن و خلأ قرار دارند [۸].

بیتیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که نشاسته‌های طبیعی نخود و عدس دارای سطوح ناصاف و اشکال کروی-بیضی هستند. از طرف دیگر تیمار فراصوت به دلیل پدیده کاویتاسیون سطح گرانول‌های نشاسته نخود و عدس را از حالت ناصاف به صاف تبدیل کرد و در سطح گرانول‌های نشاسته نخود و عدس چند ترک ایجاد کرد. همچنین تیمار فراصوت اندازه گرانول‌های نشاسته را کاهش داد که این کاهش اندازه ذرات به شدت به نوع و منشأ زنجیره‌های نشاسته، نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین بستگی دارد [۶۹]. از طرف دیگر شن و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۳۰۰ وات به حالت پالسی (۴ ثانیه خاموش و ۴ ثانیه روشن) به مدت ۳۰، ۱۰ و ۵۰ دقیقه بر نشاسته ماش را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که نشاسته ماش طبیعی دارای شکل کروی، بیضی با سطح صاف می‌باشد. از طرف دیگر تیمار فراصوت شکل

تفاوت در ویسکوزیته بین خمیرهای نشاسته به غلظت نشاسته، محتوای آمیلوز و دما مرتبط می‌باشد. اندازه‌گیری رئولوژیکی نشاسته به‌طور معمول در صنایع غذایی انجام می‌شود تا توانایی نشاسته‌ها را برای عملکرد مؤثر به‌عنوان عوامل غلیظ کننده آزمایش کند [۱۲۰].

خواص رئولوژیکی نشاسته را نمی‌توان با استفاده از برابندر/ویسکو/آمیلوگرام (BVA¹) به‌درستی ارزیابی کرد، زیرا اندازه‌گیری ویسکوزیته در شرایط جریان غیر لایه‌ای انجام می‌شود و خمیر نشاسته تحت عملیات حرارتی و مکانیکی قرار می‌گیرد که ارتباط دادن رفتار خمیری شدن تنها به یکی از این پارامترها دشوار است. باین‌حال، BVA در مقایسه رفتار کلی رئولوژیکی نشاسته (از منابع مختلف) تحت شرایط یکسان (غلظت، pH و برش) مفید است. همچنین برای اندازه‌گیری رئولوژیکی نشاسته از رئومترها استفاده می‌شود که در رئومترها با استفاده از هندسه مخروط و صفحه یا سیلندر دوگانه، عملیات حرارتی از اثرات برشی جدا می‌شود.

در BVA تمام نشاسته‌های حبوبات عدم وجود ویسکوزیته حداکثر، ویسکوزیته ثابت یا افزایشی در طول دوره نگهداری (در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد)، بازگشت به عقب زیاد و ویسکوزیته خمیر سرد ثابت در طول هم زدن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. چنین رفتاری نشان‌دهنده درجه بالایی از تعامل بین اجزای نشاسته می‌باشد. اکثر نشاسته حبوبات دارای الگوی ویسکوزیته نوع C (تورم محدود) هستند. اگرچه، نشاسته لوبیا و ماش یک الگوی ویسکوزیته مخلوط را نشان می‌دهند که نوع C در غلظت‌های پایین و نوع B (تورم متوسط) در غلظت‌های بالاتر را نشان می‌دهند. باین‌حال، نشاسته نخود چروکیده دارای الگوی ویسکوزیته نوع D (تورم بسیار محدود) می‌باشد [۱۱۰].

می‌شوند. از طرف دیگر نتایج توزیع اندازه ذرات نشان داد که نشاسته نخود و عدس قرمز به ترتیب بیشترین و کمترین اندازه گرانول را دارند و بیشترین تغییرات هم از نظر عرض و طول مربوط به نشاسته باقلا است. همچنین سطح گرانول‌های نشاسته طبیعی ذکر شده در بالا نسبتاً صاف هستند، درحالی‌که تیمار فراصوت ترک‌هایی بر روی سطح گرانول‌های نشاسته‌های باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز ایجاد کرد. همچنین با افزایش دامنه یا توان تیمار فراصوت آسیب بر روی گرانول‌های نشاسته تشدید شد [۷۶]. از طرف دیگر آسودو و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۸۰٪ باحالت پالسی (۲ ثانیه روشن و ۲ ثانیه خاموش) و به مدت ۳۰ دقیقه بر نشاسته لوبیاچیتی را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که نشاسته لوبیاچیتی طبیعی دارای شکل بیضی با سطح صاف می‌باشد [۱۱۸]. از سوی دیگر تیمار فراصوت تغییری در شکل گرانول‌های نشاسته ایجاد نکرد ولی سطح گرانول‌های نشاسته لوبیاچیتی را به دلیل فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون و نیروهای برشی قوی، ناهموار و نامنظم کرد که این ناهمواری و نامنظمی ایجاد شده در سطح گرانول‌های نشاسته تشکیل منافذ کوچک را به دنبال دارد [۷۷].

۸-۴- رئولوژی

رفتار جریان نشاسته را می‌توان از رابطه بین سرعت برش نشاسته و ویسکوزیته ظاهری خمیر نشاسته تعیین کرد. قانون توان، مدل‌های هرشل-بالکلی و بینگهام مدل‌های رایجی هستند که برای بیان رفتار جریان نشاسته استفاده می‌شوند. رفتار جریان نشاسته برای بسیاری از کاربردها حیاتی می‌باشد زیرا به خواص رفتار محصول در نرخ برشی متفاوت مربوط می‌شود [۱۱۹]. همچنین خمیرهای نشاسته‌ای رفتار غیر نیوتنی و رقیق شونده با برش را نشان می‌دهند.

1 - Brabender viscoamylograph

۱-۸-۴- اثر فراصوت بر روی رئولوژی ژل نشاسته

تیمار فراصوت به دلیل دپلمریزه کردن مولکول‌های نشاسته باعث تولید زنجیره‌های نشاسته‌ای کوتاه می‌شود که این زنجیره‌های نشاسته‌ای تولیدشده به دلیل کوتاه بودن، دیگر توسط تیمار فراصوت تخریب نمی‌شوند. همچنین تیمار فراصوت ضریب قوام که وابسته به توان فراصوت می‌باشد کاهش می‌دهد و شاخص جریان بالاتر از ۱ را نمایان می‌کند [۸]. از سوی دیگر رفتار جریان ژل نشاسته که با تیمار فراصوت اصلاح می‌شود را می‌توان با معادله قانون توان توصیف کرد [۵۳].

بیتیک و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر تیمار فراصوت با توان کلی ۴۰۰ وات، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳۰٪ به مدت ۱۵ دقیقه بر نشاسته نخود و عدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که ویسکوزیته هر دو نشاسته با افزایش نرخ برش کاهش یافت و هر دو نشاسته رفتار غیرنیوتنی و رقیق شونده با برش نشان دادند. برخی از عوامل مانند ساختار مولکول نشاسته و مقادیر آمیلوز و آمیلوپکتین موجود در نشاسته نقش مهمی در رفتار رقیق شونده با برش ایفا می‌کنند. همچنین قانون توان با ضریب همبستگی بالا برای توصیف رفتار جریان استفاده شد. از طرف دیگر تیمار فراصوت تغییری در شاخص رفتار جریان نشاسته نخود و عدس نشان نداد؛ ولی این تیمار به دلیل ایجاد نیروی برشی که تخریب مولکول نشاسته را به دنبال دارد، ضریب قوام نشاسته نخود و عدس اصلاح شده با فراصوت را کاهش داد [۶۹].

۹-۴- بافت ژل

۴-۹-۱- آنالیز رئولوژیکی دینامیکی

آنالیز رئولوژیکی دینامیکی را برای مشخص کردن خواص ویسکوالاستیک نشاسته با آنالیز مدول پیوسته در طول روبش دما و روبش فرکانس استفاده می‌کنند [۸۹]. مدول

ذخیره (G')، مدول اتلاف (G'') و تانژانت اتلاف ($\tan \delta$) که نسبت G''/G' می‌باشد معمولاً برای نشان دادن خواص ویسکوالاستیک نشاسته استفاده می‌شود. انرژی ذخیره شده و بازیابی شده در ژل نشاسته در هر چرخه تغییر شکل با G' اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که انرژی تلف شده یا ازدست‌رفته در هر چرخه تغییر شکل با G'' اندازه‌گیری می‌شود و مقادیر G' و G'' به عوامل متعددی مانند اندازه گرانول، نسبت آمیلوز/آمیلوپکتین وابسته می‌باشند. همچنین تانژانت اتلاف ($\tan \delta$) برای نشان دادن رابطه بین G' و G'' استفاده می‌شود که در ژل نشاسته با تانژانت اتلاف کمتر، سخت‌تر و جامدتر از ژل نشاسته با تانژانت اتلاف بیشتر می‌باشد [۱۲۱].

۴-۹-۲- بافت ژل نشاسته

دستگاه تحلیل پروفایل بافت (TPA^1) ژل نشاسته تولیدشده پس از آنالیز خمیری شدن با استفاده از پروب فشرده می‌کند و از نظر بافت، ژل حاصل را مورد بررسی قرار می‌دهد و پارامترهایی مانند سختی^۲، چسبندگی^۳ و حالت صمغی^۴ را ثبت یا محاسبه می‌کند. از طرف دیگر خواص بافتی نشاسته به عوامل متعددی از جمله محتوای آمیلوز، تفاوت رقم، وزن مولکولی آمیلوپکتین بستگی دارد [۱۲۲]. علاوه بر بافت ژل هنگام استفاده از خمیر نشاسته ژلاتینه شده برای بسیاری از کاربردهای صنعتی، شفافیت یکی از ویژگی‌های مهمی است که باید موردبررسی قرار گیرد.

۴-۹-۳- پایداری انجماد و ذوب ژل

هنگامی‌که خمیر نشاسته ژلاتینه شده به تدریج سرد می‌شود، بلورینگی، سفتی ژل و کدورت ژل نشاسته شروع به افزایش می‌کند و پلی مورف نوع B در سیستم ظاهر می‌شود که با تغییرات دیگری همراه است. این تغییرات از ویژگی‌های

1-Texture Profile Analysis
2 - Hardness
3 - Adhesiveness
4 - Chewiness

پدیده‌ای است که به عنوان برگشت به عقب (بیاتی) نشاسته تعریف می‌شود. بیاتی کوتاه مدت عمدتاً به ترکیب مجدد آمیلوز نسبت داده می‌شود، در حالی که بیاتی طولانی مدت به تبلور مجدد آمیلوپکتین نسبت داده می‌شود.

پایداری انجماد و ذوب ژل‌های نشاسته یکی از ویژگی‌های مهم نشاسته‌های غذایی است. این پایداری با اندازه‌گیری وزن‌سنجی آب خروجی (سینرزیس) از ژل پس از انجماد و ذوب ژل نشاسته تعیین می‌شود. این ترشح به دلیل ارتباط مجدد مولکول‌های آمیلوز اتفاق می‌افتد. همچنین میزان سینرزیس ژل نشاسته به عواملی مانند تفاوت‌های ساختاری (درجه پلیمریزاسیون آمیلوز، طول زنجیره آمیلوپکتین، نسبت زنجیره‌های کوتاه) وابسته می‌باشد.

از طرف دیگر میزان سینرزیس نشاسته حبوبات در دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد در محدوده (۱۴-۷۲٪) قرار دارد و از ترتیب زیر پیروی می‌کند: لوبیا سیاه نخود < عدس < نخود صاف < باقلا < لوبیاچیتی.

همچنین نشاسته لوبیاچیتی به دلیل فعل‌وانفعالات کم بین زنجیره‌های نشاسته به‌کندی رخ‌دادن این فعل‌وانفعالات در طول ذخیره‌سازی منجمد نسبت به سایر نشاسته حبوبات میزان سینرزیس بسیار کمتری (۱۶-۲۲٪) دارا می‌باشد [۱۲].

۴-۹-۴- اثر فراصوت بر بافت ژل نشاسته

تیمار فراصوت به دلیل افزایش حلالیت در آب و تسهیل هیدراتاسیون زنجیره‌های نشاسته، عبور نور را از ژل نشاسته بهبود می‌دهد که این عبور نور بیشتر شفافیت ژل نشاسته را به دنبال دارد [۱۲۳]. از سوی دیگر تیمار فراصوت اجازه می‌دهد تا آب بیشتری توسط گرانول‌های نشاسته جذب شود و گرانول‌ها بیشتر متورم شوند که این افزایش تورم، افزایش ویسکوزیته را به دنبال دارد که انتقال نور را از ژل نشاسته سخت‌تر می‌کند و شفافیت ژل حاصل را کاهش

می‌دهد. همچنین اثر فراصوت تحت تأثیر نوع و ترکیب نشاسته است [۱۰۷].

مجید و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر تیمار فراصوت با توان کم، فرکانس ۳۳ کیلوهرتز به مدت زمان ۴۵ دقیقه بر نشاسته نخود و ماشک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که سینرزیس نشاسته نخود و ماشک طبیعی از ۳۲/۶۰ - ۴۷/۸۲ گرم در ۱۰۰ گرم ژل (نخود) و ۴۶/۵۱ - ۲۹/۵۱ گرم در ۱۰۰ گرم ژل (ماشک) پس از نگهداری ۱۲۰-۰ ساعت افزایش یافت. همچنین تیمار فراصوت به دلیل افزایش تعامل بین آمیلوز ترشح‌شده و مولکول آمیلوپکتین در طول ذخیره‌سازی، سینرزیس را افزایش داد [۷۴]. از طرف دیگر کارامان و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر تیمار فراصوت با فرکانس ثابت ۲۲ کیلوهرتز، دامنه فرکانس ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد، توان ۱۰۰ وات، ۲۵۰-۲۰۰ وات و ۴۰۰-۴۶۰ وات به ترتیب برای ۲، ۳، ۵ و ۱، ۵ ساعت به حالت پالسی (۲۵ ثانیه خاموش و ۵ ثانیه روشن) بر نشاسته باقلا، نشاسته نخود، نشاسته عدس قرمز و سبز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این گزارش نشان داد که مقدار حالت صمغی تحت تأثیر نوع نشاسته و شرایط فراصوت تغییر نکرد. اگرچه مقدار سختی تحت تأثیر نوع پالس و شرایط فراصوت تغییر کرد. نشاسته عدس سبز بیشترین و نشاسته عدس قرمز کمترین سختی را در بین نشاسته‌های ذکر شده در بالا نشان دادند. همچنین مقدار سختی با میزان آسیب به گرانول‌های نشاسته رابطه مستقیم داشت به‌طور مثال بیشترین آسیب مربوط به نرم‌ترین نشاسته، نشاسته عدس قرمز و کمترین آسیب مربوط به سخت‌ترین نشاسته، نشاسته عدس سبز می‌باشد. از طرف دیگر تنها نوع نشاسته بر مقدار پارامتر چسبندگی تأثیرگذار بود و نشاسته نخود و عدس قرمز چسبندگی بیشتری نسبت به نشاسته باقلا و نشاسته عدس سبز نشان دادند. همچنین نشاسته عدس سبز کمترین چسبندگی را داشت. از سوی دیگر تیمار فراصوت

برای استفاده به عنوان مواد برای پوشش و تهیه فیلم دارند [۱۲۷].

۲-۵- تولید قند و اتانول زیستی از نشاسته

تیمار فراصوت را می‌توان در مایع‌سازی و تولید قند به کار برد. از پیش تیمار فراصوت می‌توان برای بهبود مایع‌سازی در دمای بالا از نشاسته ذرت در غلظت‌های بالا استفاده کرد. چراکه تیمار فراصوت از طریق ایجاد نشاسته‌ای با سطح ناهموار و منفذدار، ساختار گرانول سست‌تر، تبلور نسبی کمتر و محتوای آمیلوز بالاتر باعث افزایش سرعت واکنش آنزیمی و افزایش سرعت آزادسازی گلوکز می‌شود [۱۲۸]. از سوی دیگر اتانول زیستی به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای منابع اصلی انرژی به‌ویژه سوخت‌های فسیلی که در حال کمبود هستند و دوستدار محیط‌زیست نیستند، در نظر گرفته شده است. در میان بسترهای مختلف برای تولید اتانول زیستی، مواد اولیه مبتنی بر نشاسته در صنایع رایج‌تر هستند، زیرا به راحتی به دست می‌آیند و ارزان هستند [۱۲۹]. معمولاً مواد اولیه حاوی نشاسته با فراصوت پیش تیمار می‌شوند و سپس برای تولید اتانول زیستی به کار گرفته می‌شوند، چراکه پیش تیمار فراصوت باعث تسریع در مایع‌سازی می‌شود که بهبود میزان تبدیل و بازده اتانول زیستی را به دنبال دارد و هزینه کل فرایند را کاهش می‌دهد [۱۳۰].

۲-۶- نتیجه‌گیری

اصلاح خواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی نشاسته‌های حبوبات با استفاده از روش‌های فیزیکی یا شیمیایی مختلف ممکن است ویژگی‌های جدیدی را برای کاربردهای گسترده در آن‌ها ایجاد کند. ثابت شده است که اصلاح نشاسته حبوبات با استفاده فناوری فراصوت جایگزین جدیدی برای اصلاحات شیمیایی است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که فراصوت یک فناوری اصلاح فیزیکی با راندمان بالا، هزینه

سختی زل‌های نشاسته باقلا، نشاسته عدس قرمز و نشاسته عدس سبز به دلیل ارتعاشات مکانیکی، اثرات کاویتاسیون و کاهش مارپیچ دوگانه، را کاهش داد ولی این تیمار سختی زل نشاسته نخود را افزایش داد. همچنین تیمار فراصوت انسجم و فتری بودن را کاهش داد و این کاهش با افزایش دامنه فرکانس فراصوت، افزایش یافت [۷۶].

۲-۵- کاربردهای فراصوت در صنایع مرتبط با نشاسته

فراصوت به طور گسترده در صنایع مختلف به کار گرفته شده است، همچنین تجاری‌سازی تکنیک‌های فراصوت برای مواد غذایی مختلف و سایر کاربردهای صنعتی مانند کف‌زدایی و اکستروژن موفقیت‌آمیز بوده است، بنابراین پتانسیل زیادی برای تجاری‌سازی فراصوت برای کاربردهای مختلف نشاسته وجود دارد [۱۲۴]. در میان کاربردهای مختلف فراصوت در صنایع مرتبط با نشاسته، بیشترین کاربرد گزارش شده، بهبود استخراج نشاسته از منابع مختلف گیاه‌شناسی بوده است. همچنین از دیگر کاربردهای تیمار فراصوت در صنایع مرتبط نشاسته می‌توان به تهیه نانوذرات نشاسته و تولید قند و اتانول زیستی از نشاسته اشاره کرد [۱۲۵].

۲-۵-۱- تهیه نانوذرات نشاسته

نانوذرات با خواص ویژه در بسیاری از جنبه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و ایجاد آن‌ها از بیوماکرومولکول‌هایی از جمله سلولز و نشاسته برای تولیدکنندگان و محققان مورد توجه بوده است [۱۲۶]. از طرف دیگر تیمار فراصوت عمدتاً به دلیل آسیب رساندن به گرانول‌های نشاسته و دپلمیریزاسیون زنجیره‌های مولکولی در نواحی آمورف گرانول‌های نشاسته می‌تواند برای تولید نانوذرات کاربرد داشته باشد. همچنین با کمک تیمار فراصوت، نانوذرات را می‌توان از نشاسته‌های متنوع و با اندازه‌های مختلف (حدود چند نانومتر تا صدها نانومتر) تولید کرد که این نانوذرات نشاسته پتانسیل بالایی

فرکانس و دامنه فرکانس می‌تواند بر خواص نشاسته حبوبات اصلاح‌شده با فراصوت مؤثر باشد.

تولید پایین، عملکرد آسان و سازگار با محیط‌زیست است. همچنین پارامترهای فراصوت مانند مدت‌زمان اعمال، توان،

۷- منابع

- [1]Zhu, F. 2015. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. *J. Trends Food Sci Technol*, 43(1): 1-17.
- [2]Feng, H., Barbosa-Cánovas, G.V., and Weiss, J. eds. 2011. *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (Vol. 1, p. 599). New York: Springer.
- [3]Park, S., and Kim, Y.R. 2021. Clean label starch: production, physicochemical characteristics, and industrial applications. *J. Food Sci. Biotechnol*, 30: 1-17.
- [4]Mallakpour, S. 2018. Ultrasonic-assisted fabrication of starch/MWCNT-glucose nanocomposites for drug delivery. *J. Ultrason. Sonochem*, 40: 402-409.
- [5]Ogut, F. O., Mu, T. H., Elahi, R., Zhang, M., and Sun, H. N. 2015. Ultrasonic modification of selected polysaccharides-review. *J. Food Process. Technol*, 6(05): 446.
- [6]Patist, A., and Bates, D. 2008. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *J. IFSET*, 9(2): 147-154.
- [7]Kentish, S., and Feng, H. 2014. Applications of power ultrasound in food processing. *J. Annu. rev. food sci*, 5: 263-284.
- [8]Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Bosiljkov, T., Čvek, D., Tripalo, B., and Gelo, J. 2010. Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *J. Carbohydr. Polym*, 79(1): 91-100.
- [9]Herceg, I. L., Jambrak, A. R., Šubarić, D., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Badanjak, M., Tripalo, B., Ježek, D., Novotni, D., and Herceg, Z. 2010. Texture and pasting properties of ultrasonically treated corn starch. *J. Czech.Food Sci*, 28(2): 83-93.
- [10]Hoover, R. 2011. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *J. Carbohydr. Polym*, 45(3): 253-267.
- [11]Zhu, F., and Wang, S. 2014. Physicochemical properties, molecular structure, and uses of sweetpotato starch. *J. Trends Food Sci Technol*, 36(2): 68-78.
- [12]Zhu, F. 2017. Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch. *J. Crit Rev Food Sci Nutr*, 57(2): 313-325.
- [13]Boukhalfa, F., Kadri, N., Bouchemel, S., Ait Cheikh, S., Chebout, I., and Madani, K. 2018. Chemically modified starch and utilization in food stuffs. *J. Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 11: 37-50.
- [14]Liu, H., Ramsden, L., and H, Corke. 1999. Physical properties and enzymatic digestibility of hydroxypropylated ae, wx, and normal maize starch. *J. Carbohydr. Polym*, 40(3): 175-182.
- [15]Mason, W.R. 2009. Starch use in foods. In *Starch* (pp. 745-795). Academic Press.
- [16]Glittenberg, D. 2012. Starch-based biopolymers in paper, corrugating, and other industrial applications. 165-193.
- [17]Majzoobi, M., and Farahnaky, A. 2021. Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications, a review. *J. Food Hydrocoll*, 111: 106393.
- [18]Laovachirasuwan, P., Peerapattana, J., Srijesdaruk, V., Chitropas, P., and Otsuka, M. 2010. The physicochemical properties of a spray dried glutinous rice starch biopolymer. *J. Colloids Surf. B*, 78(1): 30-35.
- [19]Jeong, D., Han, J.A., Liu, Q., and Chung, H.J. 2019. Effect of processing, storage, and modification on in vitro starch digestion characteristics of food legumes: A review. *J. Food Hydrocoll*, 90: 367-376.
- [20]Chibbar, R.N., Ambigaipalan, P., and Hoover, R. 2010. Molecular diversity in pulse seed starch and complex carbohydrates and its role in human nutrition and health. *J. Cereal Chem*, 87(4): 342-352.
- [21]Kossmann, J., and Lloyd, J. 2000. Understanding and influencing starch biochemistry. *J. CRC Crit Rev Plant Sci*, 19(3): 171-226.

- [22]Li, L., Yuan, T.Z., Setia, R., Raja, R.B., Zhang, B., and Ai, Y. 2019. Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. *J. Food Chem*, 276: 599-607.
- [23]Keskin, S.O., Ali, T.M., Ahmed, J., Shaikh, M., Siddiq, M., and Uebersax, M.A. 2022. Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. *J. Legume Science*, 4(1): 117.
- [24]Hoover, R., and Sosulski, F.W. 1991. Composition, structure, functionality, and chemical modification of legume starches: a review. *J. Can. J. Physiol. Pharmacol*, 69(1): 79-92.
- [25]Hoover, R., Hughes, T., Chung, H.J., and Liu, Q. 2010. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. *J. Food Res. Int*, 43(2): 399-413.
- [26]Bemiller, J.N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. *J. Starch-Stärke*, 49(4): 127-131.
- [27]Tharanathan, R.N. 2005. Starch—value addition by modification. *J. Crit Rev Food Sci Nutr*, 45(5): 371-384.
- [28]Joshi, M., Aldred, P., McKnight, S., Panozzo, J.F., Kasapis, S., Adhikari, R., and Adhikari, B. 2013. Physicochemical and functional characteristics of lentil starch. *J. Carbohydr. Polym*, 92(2): 1484-1496.
- [29]Chen, X., Zhang, Z., Ji, N., Li, M., Wang, Y., Xiong, L., and Sun, Q. 2022. The effect of ethanol solution annealing on the physicochemical properties of pea and potato starches. *J. Food Hydrocoll*, 125: 107428.
- [30]Hu, A., Li, Y., and Zheng, J. 2019. Dual-frequency ultrasonic effect on the structure and properties of starch with different size. *J. Lwt*, 106: 254-262.
- [31]Thirumdas, R., Kadam, D., and Annapure, U.S. 2017. Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *J. Food Biophys*, 12: 129-139.
- [32]Neelam, K., Vijay, S., and Lalit, S. 2012. Various techniques for the modification of starch and the applications of its derivatives. *J. IRJP*, 3(5): 25-31.
- [33]Hoover, R., Hannouz, D., and Sosulski, F.W. 1988. Effects of hydroxypropylation on thermal properties, starch digestibility and freeze-thaw stability of field pea (*pisum sativum* cv trapper) starch. *J. Starch-Stärke*, 40(10): 383-387.
- [34]Huang, J., Schols, H.A., Jin, Z., Sulmann, E., and Voragen, A.G. 2007. Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea, cowpea and chickpea starches after modification with acetic anhydride and vinyl acetate. *J. Carbohydr. Polym*, 67(1): 11-20.
- [35]Ashogbon, A.O., and Akintayo, E.T. 2014. Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. *J. Starch-Stärke*, 66(1-2): 41-57.
- [36]Guleria, P., and Yadav, B.S. 2022. Effect of chemical treatments on the functional, morphological and rheological properties of starch isolated from pigeon pea (*Cajanus cajan*). *J. CRFS*, 5: 1750-1759.
- [37]Chaiwat, W., Wongsagonsep, R., Tangpanichyanon, N., Jariyaporn, T., Deeyai, P., Suphantharika, M., Fuongfuchat, A., Nisoa, M., and Dangtip, S. 2016. Argon plasma treatment of tapioca starch using a semi-continuous downer reactor. *J. Food Bioproc Tech*, 9: 1125-1134.
- [38]Gu, Z., Chen, B., and Tian, Y. 2021. Highly branched corn starch: Preparation, encapsulation, and release of ascorbic acid. *J. Food Chem*, 343: 128485.
- [39]Chiu, C.W., and Solarek, D. 2009. Modification of starches. *J. Food Sci. Technol*, 629-655.
- [40]Hansen, M.R., Blennow, A., Pedersen, S., Nørgaard, L., and Engelsen, S.B. 2008. Gel texture and chain structure of amyloamylase-modified starches compared to gelatin. *J. Food Hydrocoll*, 22(8): 1551-1566.
- [41]Ao, Z., Simsek, S., Zhang, G., Venkatachalam, M., Reuhs, B.L., and Hamaker, B.R. 2007. Starch with a slow digestion property produced by altering its chain length, branch density, and crystalline structure. *J. Agric. Food Chem*, 55(11): 4540-4547.
- [42]Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., and Karim, A.A. 2012. Progress in starch modification in the last decade. *J. Food Hydrocoll*, 26(2): 398-404.
- [43]Gulu, N.B., Jideani, V.A., and Jacobs, A. 2019. Functional characteristics of Bambara groundnut starch-catechin complex formed using cyclodextrins as initiators. *J. Heliyon*, 5(4): e01562.
- [44]Guo, Z., Zeng, S., Lu, X., Zhou, M., Zheng, M., and Zheng, B. 2015. Structural and physicochemical properties of lotus seed starch treated with ultra-high pressure. *J. Food Chem*, 186: 223-230.
- [45]Han, Z., Zeng, X.A., Zhang, B.S., and Yu, S.J. 2009. Effects of pulsed electric fields (PEF)

treatment on the properties of corn starch. *J. Food Eng.*, 93(3): 318-323.

[46] Bashir, K., and Aggarwal, M. 2017. Physicochemical, thermal and functional properties of gamma irradiated chickpea starch. *J. Int. J. Biol. Macromol.*, 97: 426-433.

[47] Luo, Z., Fu, X., He, X., Luo, F., Gao, Q., and Yu, S. 2008. Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical properties of maize starches differing in amylose content. *J. Starch-Stärke*, 60(11): 646-653.

[48] Kaur, H., and Gill, B.S. 2019. Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals. *J. Int. J. Biol. Macromol.*, 126: 367-375.

[49] Du, M., Cao, T., Yu, M., Zhang, C., and Xu, W. 2023. Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of chickpea starch. *J. Food Sci. Technol.*, 43.

[50] Din, Z.D., Xiong, H., and Fei, P. 2017. Physical and chemical modification of starches: A review. *J. Crit Rev Food Sci Nutr*, 57(12): 2691-2705.

[51] Chan, H.T., Bhat, R., and Karim, A.A. 2010. Effects of sodium dodecyl sulphate and sonication treatment on physicochemical properties of starch. *J. Food Chem*, 120(3): 703-709.

[52] Zuo, Y.Y.J., Hébraud, P., Hemar, Y., and Ashokkumar, M. 2012. Quantification of high-power ultrasound induced damage on potato starch granules using light microscopy. *J. Ultrason Sonochem*, 19(3): 421-426.

[53] Czechowska-Biskup, R., Rokita, B., Lotfy, S., Ulanski, P., and Rosiak, J.M. 2005. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. *J. Carbohydr. Polym.*, 60(2): 175-184.

[54] Riesz, P., and Kondo, T. 1992. Free radical formation induced by ultrasound and its biological implications. *J. Free Radic. Biol. Med.*, 13(3): 247-270.

[55] Szent-Györgyi, A. 1933. Chemical and biological effects of ultra-sonic radiation. *J. Nature*, 131(3304): 278-278.

[56] Peat, S. 1952. Evidence of multiple branching in waxy maize starch. *J. chem. Soc.*

[57] Bertoft, E., Piyachomkwan, K., Chatakanonda, P., and Sriroth, K. 2008. Internal unit chain

composition in amylopectins. *J. Carbohydr. Polym.*, 74(3): 527-543.

[58] Srichuwong, S., and Jane, J.I. 2007. Physicochemical properties of starch affected by molecular composition and structures: a review. *J. Food Sci. Biotechnol.*, 16(5): 663-674.

[59] Su, C., Saleh, A.S., Zhang, B., Zhao, K., Ge, X., Zhang, Q., and Li, W. 2020. Changes in structural, physicochemical, and digestive properties of normal and waxy wheat starch during repeated and continuous annealing. *J. Carbohydr. Polym.*, 247: 116675.

[60] Hanashiro, I., Abe, J.I., and Hizukuri, S. 1996. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. *J. Carbohydr. Res.*, 283: 151-159.

[61] Zhu, F., Corke, H., and Bertoft, E. 2011. Amylopectin internal molecular structure in relation to physical properties of sweetpotato starch. *J. Carbohydr. Polym.*, 84(3): 907-918.

[62] Biliaderis, C.G., Maurice, T.J., and Vose, J.R. 1980. Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. *J. Food Sci.*, 45(6): 1669-1674.

[63] Zheng, J., Li, Q., Hu, A., Yang, L., Lu, J., Zhang, X., and Lin, Q. 2013. Dual-frequency ultrasound effect on structure and properties of sweet potato starch. *J. Starch-Stärke*, 65(7-8): 621-627.

[64] Sujka, M., and Jamroz, J. 2013. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *J. Food Hydrocoll.*, 31(2): 413-419.

[65] Li, C., Liu, W., Gu, Z., Fang, D., Hong, Y., Cheng, L., and Li, Z. 2017. Ultrasonic pretreatment improves the high-temperature liquefaction of corn starch at high concentrations. *J. Starch-Stärke*, 69(3-4): 1600002.

[66] Iida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A., and Kozuka, T. 2008. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *J. IFSET*, 9(2): 140-146.

[67] Zuo, J.Y., Knoerzer, K., Mawson, R., Kentish, S., and Ashokkumar, M. 2009. The pasting properties of sonicated waxy rice starch suspensions. *J. Ultrason Sonochem*, 16(4): 462-468.

[68] Carmona-García, R., Bello-Pérez, L.A., Aguirre-Cruz, A., Aparicio-Saguilán, A., Hernández-Torres, J., and Alvarez-Ramirez, J. 2016. Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with

- different granule size. *J. Starch-Stärke*, 68(9-10): 972-979.
- [69]Bitik, A., Sumnu, G., and Oztop, M. 2019. Physicochemical and structural characterization of microfluidized and sonicated legume starches. *J. Food Bioproc Tech*, 12: 1144-1156.
- [70]Grgić, I., Ačkar, Đ., Barišić, V., Vlanić, M., Knežević, N., and Medverec Knežević, Z. 2019. Nonthermal methods for starch modification—A review. *J. Food Process. Preserv*, 43(12): e14242.
- [71]Shen, H., Guo, Y., Zhao, J., Zhao, J., Ge, X., Zhang, Q., and Yan, W. 2021. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 191: 821-831.
- [72]Han, L., Cao, S., Yu, Y., Xu, X., Cao, X., and Chen, W. 2021. Modification in physicochemical, structural and digestive properties of pea starch during heat-moisture process assisted by pre-and post-treatment of ultrasound. *J. Food Chem*, 360: 129929.
- [73]Gallant, D., Degrois, M., Sterling, C., and Guilbot, A. 1972. Microscopic effects of ultrasound on the structure of potato starch preliminary study. *J. Starch-Stärke*, 24(4): 116-123.
- [74]Majeed, T., Wani, I.A., Hamdani, A.M., and Bhat, N.A. 2018. Effect of sonication and γ -irradiation on the properties of pea (*Pisum sativum*) and vetch (*Vicia villosa*) starches: A comparative study. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 114: 1144-1150.
- [75]Hoover, R., and Ratnayake, W.S. 2002. Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. *J. Food Chem*, 78(4): 489-498.
- [76]Karaman, M., Tuncel, N.B., and Yılmaz Tuncel, N. 2017. The effect of ultrasound-assisted extraction on yield and properties of some pulse starches. *J. Starch-Stärke*, 69(9-10): 1600307.
- [77]Acevedo, B.A., Villanueva, M., Chaves, M.G., Avanza, M.V., and Ronda, F. 2022. Modification of structural and physicochemical properties of cowpea (*Vigna unguiculata*) starch by hydrothermal and ultrasound treatments. *J. Food Hydrocoll*, 124: 107266.
- [78]Chen, Z., Schols, H.A., and Voragen, A.G.J. 2003. Physicochemical properties of starches obtained from three varieties of Chinese sweet potatoes. *J. Food Sci*, 68(2): 431-437.
- [79]Zhu, T., Jackson, D.S., Wehling, R.L., and Geera, B. 2008. Comparison of amylose determination methods and the development of a dual wavelength iodine binding technique. *J. Cereal Chem*, 85(1): 51-58.
- [80]Zhu, F., Yang, X., Cai, Y.Z., Bertoft, E., and Corke, H. 2011. Physicochemical properties of sweetpotato starch. *J. Starch-Stärke*, 63(5): 249-259.
- [81]Zhu, F., Bertoft, E., Kallman, A., Myers, A.M., and Seetharaman, K. 2013. Molecular structure of starches from maize mutants deficient in starch synthase III. *J. Agric. Food Chem*, 61(41): 9899-9907.
- [82]Abegunde, O.K., Mu, T.H., Chen, J.W., and Deng, F.M. 2013. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. *J. Food Hydrocoll*, 33(2): 169-177.
- [83]Waramboi, J.G., Dennien, S., Gidley, M.J., and Sopade, P.A. 2011. Characterisation of sweetpotato from Papua New Guinea and Australia: Physicochemical, pasting and gelatinisation properties. *J. Food Chem*, 126(4): 1759-1770.
- [84]Alcázar-Alay, S.C., and Meireles, M.A.A. 2015. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *J. Food Sci. Technol*, 35: 215-236.
- [85]Geddes, R., Greenwood, C.T., and Mackenzie, S. 1965. Studies on the biosynthesis of starch granules: Part III. The properties of the components of starches from the growing potato tuber. *J. Carbohydr. Res*, 1(1): 71-82.
- [86]Li, G., Wang, S., and Zhu, F. 2016. Physicochemical properties of quinoa starch. *J. Carbohydr. Polym*, 137: 328-338.
- [87]Cao, M., and Gao, Q. 2020. Effect of dual modification with ultrasonic and electric field on potato starch. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 150: 637-643.
- [88]Morrison, W.R., Milligan, T.P., and Azudin, M.N. 1984. A relationship between the amylose and lipid contents of starches from diploid cereals. *J. Cereal Sci*, 2(4): 257-271.
- [89]Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N.S., and Gill, B.S. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *J. Food Chem*, 81(2): 219-231.
- [90]Bertoft, E. 2017. Understanding starch structure: Recent progress. *J. Agron*, 7(3): 56.

- [91]Gernat, C., Radosta, S., Damaschun, G., and Schierbaum, F. 1990. Supramolecular structure of legume starches revealed by X-ray scattering. *J. Starch-Stärke*, 42(5): 175-178.
- [92]Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. *J. Carbohydr. Res*, 141(2): 295-306.
- [93]Miao, M., Zhang, T., and Jiang, B. 2009. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China. *J. Food Chem*, 113(4): 1025-1032.
- [94]Zhu, J., Li, L., Chen, L., and Li, X. 2012. Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules. *J. Food Hydrocoll*, 29(1): 116-122.
- [95]Huang, Q., Li, L., and Fu, X. 2007. Ultrasound effects on the structure and chemical reactivity of cornstarch granules. *J. Starch-Stärke*, 59(8): 371-378.
- [96]Wang, S., Hu, X., Wang, Z., Bao, Q., Zhou, B., Li, T., and Li, S. 2020. Preparation and characterization of highly lipophilic modified potato starch by ultrasound and freeze-thaw treatments. *J. Ultrason Sonochem*, 64: 105054.
- [97]Karwasra, B.L., Kaur, M., and Gill, B.S. 2020. Impact of ultrasonication on functional and structural properties of Indian wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar starches. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 164: 1858-1866.
- [98]Genkina, N.K., Kozlov, S.S., Martirosyan, V.V., and Kiseleva, V.I. 2014. Thermal behavior of maize starches with different amylose/amylopectin ratio studied by DSC analysis. *J. Starch-Stärke*, 66(7-8): 700-706.
- [99]Vamadevan, V., and Bertoft, E. 2015. Structure-function relationships of starch components. *J. Starch-Stärke*, 67(1-2): 55-68.
- [100]Ai, Y., and Jane, J.L. 2015. Gelatinization and rheological properties of starch. *J. Starch-Stärke*, 67(3-4): 213-224.
- [101]Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Suda, I., Morishita, T., Ishiguro, K., and Yamakawa, O. 1998. Relationships between chain length distribution of amylopectin and gelatinization properties within the same botanical origin for sweet potato and buckwheat. *J. Carbohydr. Polym*, 37(2): 153-158.
- [102]Yu, S., Zhang, Y., Ge, Y., Zhang, Y., Sun, T., Jiao, Y., and Zheng, X.Q. 2013. Effects of ultrasound processing on the thermal and retrogradation properties of nonwaxy rice starch. *J. Food Process Eng*, 36(6): 793-802.
- [103]Yang, W., Kong, X., Zheng, Y., Sun, W., Chen, S., Liu, D., Zhang, H., Fang, H., Tian, J., and Ye, X. 2019. Controlled ultrasound treatments modify the morphology and physical properties of rice starch rather than the fine structure. *J. Ultrason Sonochem*, 59: 104709.
- [104]Vela, A.J., Villanueva, M., Solaesa, Á.G., and Ronda, F. 2021. Impact of high-intensity ultrasound waves on structural, functional, thermal and rheological properties of rice flour and its biopolymers structural features. *J. Food Hydrocoll*, 113: 106480.
- [105]Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., and Tang, M.C. 2009. Form and functionality of starch. *J. Food Hydrocoll*, 23(6): 1527-1534.
- [106]Hoover, R., and Sosulski, F.J.S.S. 1985. Studies on the functional characteristics and digestibility of starches from *Phaseolus vulgaris* biotypes. *J. Starch-Stärke*, 37(6): 181-191.
- [107]Sit, N., Misra, S., and Deka, S.C. 2014. Yield and functional properties of taro starch as affected by ultrasound. *J. Food Bioproc Tech*, 7: 1950-1958.
- [108]Kim, Y.Y., Woo, K.S., and Chung, H.J. 2018. Starch characteristics of cowpea and mungbean cultivars grown in Korea. *J. Food Chem*, 263: 104-111.
- [109]Zhong, Y., Xiang, X., Zhao, J., Wang, X., Chen, R., Xu, J., Luo, S., Wu, J., and Liu, C. 2020. Microwave pretreatment promotes the annealing modification of rice starch. *J. Food Chem*, 304: 125432.
- [110]Schoch, T.J. 1968. Preparation and properties of various legume starches. *J. Cereal Chem*, 45: 564-573.
- [111]Tolmasquim, E., Correa, A.M.N., and Tolmasqui, S.T. 1971. New starches. Properties of five varieties of cowpea starch. *J. Cereal Chem*.
- [112]Tester, R.F., Morrison, W.R., and Schulman, A.H. 1993. Swelling and gelatinization of cereal starches. V. Risø mutants of Bomi and Carlsberg II barley cultivars. *J. Cereal Sci*, 17(1): 1-9.
- [113]Tu, Z., Yin, Y., Wang, H., Liu, G., Chen, L., Zhang, P., Kou, Y., and Zhang, L. 2013. Effect of dynamic high-pressure microfluidization on the morphology characteristics and physicochemical

properties of maize amylose. *J. Starch-Stärke*, 65(5-6): 390-397.

[114]Ding, Y., Luo, F., and Lin, Q. 2019. Insights into the relations between the molecular structures and digestion properties of retrograded starch after ultrasonic treatment. *J. Food Chem*, 294: 248-259.

[115]Majeed, T., Wani, I.A., and Hussain, P.R. 2017. Effect of dual modification of sonication and γ -irradiation on physicochemical and functional properties of lentil (*Lens culinaris* L.) starch. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 101: 358-365.

[116]Hughes, T., Hoover, R., Liu, Q., Donner, E., Chibbar, R., and Jaiswal, S. 2009. Composition, morphology, molecular structure, and physicochemical properties of starches from newly released chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars grown in Canada. *J. Food Res. Int*, 42(5-6): 627-635.

[117]Qi, X., and Tester, R.F. 2016. Effect of native starch granule size on susceptibility to amylase hydrolysis. *J. Starch-Stärke*, 68(9-10): 807-810.

[118]Acevedo, B.A., Villanueva, M., Chaves, M.G., Avanza, M.V., and Ronda, F. 2020. Starch enzymatic hydrolysis, structural, thermal and rheological properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) and dolichos bean (*Dolichos lab-lab*) legume starches. *J. Int. J. Food Sci. Technol*, 55(2): 712-719.

[119]Kong, X., Kasapis, S., Bertoft, E., and Corke, H. 2010. Rheological properties of starches from grain amaranth and their relationship to starch structure. *J. Starch-Stärke*, 62(6): 302-308.

[120]Zhu, F., Bertoft, E., and Li, G. 2016. Morphological, thermal, and rheological properties of starches from maize mutants deficient in starch synthase III. *J. Agric. Food Chem*, 64(34): 6539-6545.

[121]Wu, K., Dai, S., Gan, R., Corke, H., and Zhu, F. 2016. Thermal and rheological properties of mung bean starch blends with potato, sweet potato, rice, and sorghum starches. *J. Food Bioproc Tech*, 9: 1408-1421.

[122]Karunaratne, R., and Zhu, F. 2016. Physicochemical interactions of maize starch with ferulic acid. *J. Food Chem*, 199: 372-379.

[123]Chung, K.M., Moon, T.W., Kim, H., and Chun, J.K. 2002. Physicochemical properties of sonicated mung bean, potato, and rice starches. *J. Cereal Chem*, 79(5): 631-633.

[124]Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., and Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *J. Food Res. Int*, 48: 410-427.

[125]Setyawati, Y. D., Ahsan, S. F., Ong, L. K., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., and Ju, Y. H. 2016. Production of glutinous rice flour from broken rice via ultrasonic assisted extraction of amylose. *J. Food Chem*, 203: 158-164.

[126]Bel Haaj, S., Magnin, A., Pétrier, C., and Boufi, S. 2013. Starch nanoparticles formation via high power ultrasonication. *J. Carbohydr. Polym*, 92: 1625-1632.

[127]Gonçalves, P. M., Noreña, C. P. Z., da Silveira, N. P., and Brandelli, A. 2014. Characterization of starch nanoparticles obtained from *Araucaria angustifolia* seeds by acid hydrolysis and ultrasound. *J. LWT-Food Sci Technol*, 58: 21-27.

[128]Li, C., Liu, W., Gu, Z., Fang, D., Hong, Y., Cheng, L., and Li, Z. 2016. Ultrasonic pretreatment improves the high-temperature liquefaction of corn starch at high concentrations. *J. Starch- Stärke*, 68: 1-7.

[129]Nikolić, S., Mojović, L., Rakin, M., Pejin, D., and Pejin, J. 2010. Ultrasound-assisted production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation of corn meal. *J. Food Chem*, 122: 216-222.

[130]Pejin, D. J., Mojović, L. V., Pejin, J. D., Grujić, O. S., Markov, S. L., Nikolić, S. B., and Marković, M. N. 2012. Increase in bioethanol production yield from triticale by simultaneous saccharification and fermentation with application of ultrasound. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 87: 170-176.



Scientific Research

The effect of ultrasound treatment on the physicochemical, rheological and structural properties of starches extracted from different legumes

Mohammadkazem Heydarian¹, Alireza Heydarian², Seyed Ali Mortazavi^{*3}

1- Master's student, Department of Food Science and Engineering, Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2 -Master's student, Educational Department of Food Science and Engineering, Biotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

ABSTRACT

Starch is the most abundant carbohydrate in legumes. On the other hand, due to its non-reactive nature and insolubility in cold water, natural leguminous starch has limited use in the food industry. Natural legume starch can be modified by chemical, physical, and enzymatic methods. Modified legume starches have gained importance in the food industry due to their improved functional properties. Ultrasound is one of the physical methods of starch modification examined in this article. Also, ultrasound is increasingly used as a green technology for the physicochemical modification of food systems. This study aims to investigate the effect of ultrasonic treatment (bath-probe) on the functional, rheological, thermal, morphological, and crystal structure characteristics of modified starch samples. The change in the properties of ultrasonically modified starch is mainly due to the depolymerization of amylose and amylopectin chains. After ultrasound treatment, molecular weight, viscosity, and crystallinity decrease; Therefore, it can be concluded that ultrasound is an alternative technology for modifying the properties of leguminous starch.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2023/5/7

Accepted: 2023/6/13

Keywords:

Legume starch,
ultrasound,
modification,
cavitation.

DOI: 10.22034/FSCT.20.137.156

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.137.12.2

*Corresponding Author E-Mail:

morteza@um.ac.ir