



تأثیر پلاسمای سرد بر اصلاح ویژگی‌های نشاسته‌های غلات

محمدکاظم حیدریان^۱، علیرضا حیدریان^۲، دکتر سید علی مرتضوی^{۳*}

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

۲- کارشناسی ارشد 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، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نشاسته‌های طبیعی به دلیل ماهیت غیر واکنشی و نامحلول بودن در آب سرد، کاربرد محدودی در صنایع غذایی دارند. نشاسته‌های طبیعی را می‌توان با روش‌های شیمیایی، فیزیکی و آنزیمی اصلاح کرد. پلاسمای سرد یکی از روش‌های فیزیکی اصلاح نشاسته است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم‌های تولید پلاسمای سرد به دودسته فشار پایین و فشار اتمسفری تقسیم‌بندی می‌گردند، ساختار هر سیستم مورد بررسی قرار گرفته و اثرات پلاسمای سرد در فشار اتمسفر بر خواص عملکردی، حرارتی، مولکولی، مورفولوژیکی و فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های مختلف که مورد مطالعه محققان مختلف قرار گرفته به بحث گذاشته می‌شوند. تغییر در خواص نشاسته اصلاح شده با پلاسما دی الکتریک عمدتاً به دلیل دپلمیریزاسیون و اتصال متقاطع زنجیره‌های جانبی آمیلوز و آمیلوپکتین است. پس از تیمار پلاسما دی الکتریک، وزن مولکولی، ویسکوزیته و دمای ژلاتینه شدن کاهش می‌یابد. حکاکی پلاسما انرژی سطحی و آب‌دوستی گرانول‌های نشاسته را افزایش می‌دهد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پلاسمای سرد به‌عنوان فناوری جایگزین برای اصلاح خواص نشاسته است.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۶

کلمات کلیدی:

نشاسته،

پلاسما سرد،

اصلاح،

دپلمیریزاسیون

DOI: 10.22034/FSCT.20.144.25

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.144.2.6

* مسئول مکاتبات:

morteza@um.ac.ir

۱- مقدمه

نشاسته، یک پلیمر تجدید پذیر، زیست‌تخریب‌پذیر و منبع ذخیره انرژی در گیاهان است که حاوی دو جزء اصلی آمیلوز و آمیلوپکتین می‌باشد. آمیلوز یک پلی‌ساکارید خطی است که از واحدهای آلفا-D-گلوکز ساخته شده است و از طریق پیوندهای گلیکوزیدی (1→4)α به یکدیگر متصل می‌شوند. این پلی‌ساکارید تقریباً ۳۰ - ۲۰٪ از نشاسته را تشکیل می‌دهد [۱]. آمیلوپکتین یک پلیمر بسیار منشعب با زنجیره‌های خطی از واحدهای α-D-(1→4)-گلوکوزیل است که با پیوندهای (1→6)α به هم مرتبط شده‌اند، این پلی‌ساکارید تقریباً ۸۰ - ۷۰٪ از کل نشاسته را تشکیل می‌دهد [۲].

نشاسته به شکل گرانولی سنتز می‌شود و می‌توان آن را از گرانول‌ها، ریشه‌ها، غده‌ها، برگ‌ها، گرده‌ها و حتی جلبک‌ها به دست آورد. گرانول‌های نشاسته در زیر میکروسکوپ به شکل‌های مختلف مانند کره و بیضی ظاهر می‌گردند. قطر گرانول‌های نشاسته بسته به منشأ گیاهی آن‌ها می‌تواند از ۱/۰ میکرومتر تا بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر متغیر باشد [۳]. منابع مهم نشاسته برای کاربردهای تجاری عبارتند از: ذرت، سیب‌زمینی، کاساوا و گندم [۴]. انتظار می‌رود بازار نشاسته با میزان رشد متوسط ۴/۷ درصد در طول سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۳۰ افزایش یابد. رشد بازار در درجه اول تحت تأثیر تقاضای مصرف‌کننده، فعالیت‌های تحقیق و توسعه، و افزایش آگاهی در مورد کاربردهای نشاسته قرار دارد. 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 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.

نشاسته می‌تواند به‌عنوان یک عامل ژل‌کننده، غلیظ‌کننده، تثبیت‌کننده و محصورکننده طعم در فرایندهای پخت، دم کردن و شیرینی‌سازی، همچنین به‌عنوان پوشش و فیلم، در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد [۵]. کاربردهای غیر غذایی نشاسته شامل چسب‌ها برای ساخت تخته، ضد یخ و عامل کند کننده بتن و همچنین مواد اولیه تخمیر برای فرآورده‌های دارویی است [۶]. با این حال، به دلیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی و درون‌مولکولی و ساختار نیمه کریستالی، در دمای محیط نسبت به آب نفوذناپذیر، و در آب سرد نامحلول است [۷]. از طرف دیگر نشاسته به راحتی رترورگید می‌شود. بنابراین، نشاسته‌ها باید برای افزایش حلالیت، بهبود ویژگی‌های بافتی و افزایش تحمل گرما جهت کاربردهای صنعتی متنوع اصلاح شوند [۸].

خواص رئولوژیکی نشاسته به خواص خمیری شدن نشاسته در طول ژلاتینه شدن و رئولوژی دینامیکی تشکیل ژل اشاره دارد [۹]. این خواص هدف مهمی برای اصلاح نشاسته است که بر کاربرد نهایی آن تأثیرگذار می‌باشد. خواص رئولوژیکی به تغییر شکل و رفتارهای جریان یک ماده در پاسخ به تنش است، که می‌توان با اندازه‌گیری ویسکوزیته به آن پی برد و ویسکوزیته این‌گونه تعریف می‌شود، مقاومت سیال (یا نیمه سیال) در برابر جریان در هنگام اعمال تنش برشی [۱۰].

۲- روش‌های اصلاح نشاسته

به‌طور معمول، نشاسته را می‌توان به‌صورت شیمیایی، آنزیمی و فیزیکی اصلاح کرد [۱۱، ۱۲]. اصلاح شیمیایی شامل اکسیداسیون، سوکسینیل‌اسیون، استریفیکاسیون، اتریفیکاسیون و فسفریلاسیون است [۱۳]. در این روش

باشد [۱۸]. چيو^۳ و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که نشاسته تیمار شده با ترکیبی از α -آمیلازها و β -آمیلازها یا α -آمیلازها و آمیل گلوکوزیدازها ظرفیت شیرین سازی و ظرفیت قهوه‌ای شدن را بهبود می‌بخشد [۱۹]. همچنین هانس^۴ و همکاران (۲۰۰۸)، گزارش کردند که نشاسته سیب‌زمینی، ذرت و نخود تیمار شده با آمیلومالتازها بافت ژل (تشکیل شبکه ژل، افزایش نیروی فشرده‌سازی و شکستگی اندک یا جزئی ژل) را بهبود می‌بخشد [۲۰]. 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 [۲۱].

اصلاح فیزیکی می‌تواند حرارتی (تیمار حرارت مرطوب، خشک کردن پاششی، پیش ژلاتینه‌سازی و...) یا غیرحرارتی (میدان الکتریکی پالسی، فراصوت، فشار هیدرو استاتیک بالا، فناوری پلاسما سرد^۶ (CP) و...) باشد. روش‌های اصلاح فیزیکی نشاسته، جایگزینی سریع و سازگار با محیط‌زیست بدون تولید باقی‌مانده‌های شیمیایی و مواد سمی هستند [۲۲]. 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 [۱۲، ۲۳].

هان^۷ و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که تیمار میدان الکتریکی پالسی باعث تنظیم مجدد و تخریب گرانول‌های نشاسته می‌شود که منجر به کاهش بلورینگی نسبی، ژلاتینه شدن و ویژگی‌های ویسکوزیته می‌شود [۲۴]. گیل^۸ و

اصلاح نشاسته، ترکیب گروه‌های عاملی مختلف با مولکول نشاسته باعث بهبود خواص عملکردی و تغییراتی در دمای ژلاتینه شدن نشاسته، pH و خواص رئولوژیکی و خواص خمیری شدن نشاسته می‌شود [۱۲]. نابشیم^۱ و همکاران (۲۰۰۱)، گزارش کردند که فسفات نشاسته کاساوا مقاومت بیشتری در برابر دمای بالا، pH پایین دارد و ویسکوزیته بالاتری را ایجاد می‌کند همچنین این نشاسته اصلاح شده خواص بافتی را ایجاد می‌کند [۱۴]. همچنین بیمیلر^۲ و همکاران (۲۰۰۷)، دریافتند که نشاسته اصلاح‌شده با استفاده از سوکسینات منجر به خواص مطلوبی مانند قدرت ضخیم‌کنندگی بالا، دمای ژلاتینه شدن پایین و تمایل کم به رترورگراسیون می‌شود [۱۵]. از طرف دیگر ضیاءالدین و همکاران (۲۰۱۵)، گزارش کردند که نشاسته استیل‌شده کاربردهای متعددی در صنایع غذایی مانند محصولات پخته‌شده، سس‌ها، غذاهای منجمد، غذاهای کودک و غذاهای میان وعده دارد [۱۶]. 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 [۱۷].

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 شیرین سازی نشاسته، افزایش ظرفیت قهوه‌ای شدن و بهبود بافت ژل می‌گردند [۱۲]. اما استفاده از اصلاح آنزیمی دوگانه ممکن است اقدامات و هزینه‌های بیشتری را به دنبال داشته

3-Chiu

4-Hansen

5 -Ao

6 -Cold Plasma

7 -Han

8. Gill

1 -Nabeshima

2 -Bemiller

به‌عنوان (ماده تابشی) در لوله در سال ۱۸۷۹، اثبات نمود [۳۱].

پلاسمای یک گاز یونیزه شده است که اجزای اصلی آن شامل ذرات باردار، رادیکال‌های آزاد، مولکول‌ها، اتم‌ها، مولکول‌ها در حالت‌های پایه یا برانگیخته است و بار خنثی خالصی را حمل می‌کند. با توجه به تعادل ترمودینامیکی، پلاسمای را می‌توان به پلاسمای تعادل ترمودینامیکی کامل، پلاسمای تعادل ترمودینامیکی موضعی، پلاسمای تعادلی غیر ترمودینامیکی تقسیم کرد. پلاسمای تعادل ترمودینامیکی کامل (پلاسمای حرارتی) که در این نوع پلاسمای رابطه‌ی زیر برقرار است: چگالی الکترون = (Te) دمای یون = (Ti) دمای گاز = (Tg) ، پلاسمای تعادل ترمودینامیکی موضعی (Te, Ti, Tg) به‌صورت موضعی به تعادل ترمودینامیکی می‌رسند، پلاسمای تعادلی غیر ترمودینامیکی (پلاسمای سرد) در این نوع پلاسمای برخلاف پلاسمای حرارتی، چگالی الکترون بیشتر از دمای یون و دمای گاز است $(Te \gg Ti \approx Tg)$ [32].

پلاسمای سرد (پلاسمای غیرحرارتی) یک گاز نیمه یونیزه است که با اعمال انرژی کافی (میدان‌های حرارتی، الکترومغناطیسی یا الکتریکی، میکروویو و فرکانس‌های رادیویی) به گاز خنثی در فشار کم یا اتمسفر تولید می‌شود [۳۳]. هنگامی که انرژی اعمال می‌شود، الکترون‌های آزاد که به‌طور طبیعی در گاز وجود دارند، انرژی را سریع‌تر از یون‌ها دریافت می‌کنند. سپس الکترون‌های شتاب‌گرفته انرژی را از طریق برخوردهای الاستیک و غیر کشسان به مولکول‌های گاز سنگین‌تر منتقل می‌کنند. در نتیجه این برخوردها، گاز چندین واکنش فازی یونیزاسیون، برانگیختگی

همکاران (۲۰۱۹)، گزارش کردند که تیمار فراصوت می‌تواند ویژگی‌های مورفولوژیکی گرانول‌ها، الگوی کریستالی، خواص خمیری شدن (به‌عنوان 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، دپلمیریزاسیون زنجیره‌های مولکولی و افزایش قدرت تورم و حلالیت گرانول‌های نشاسته از منشأ مختلف از جمله ذرت، برنج، گندم، کاساوا و نشاسته سیب‌زمینی شود [۲۵، ۲۶]. باین وجود، نتایج با توجه به خواص دیگر، مانند خواص خمیری شدن (به‌عنوان مثال، RVA) و رفتارهای حرارتی (به‌عنوان مثال، DSC) گاهی مخالف هستند. به‌عنوان مثال، فراصوت ویسکوزیته خمیری شدن نشاسته ذرت، برنج و گندم را کاهش داد، اما ویسکوزیته نشاسته سیب‌زمینی را افزایش داد، دلیل این تفاوت ساختارهای آمورف و کریستالی گرانول‌های نشاسته پس از فراصوت تحت تأثیر متفاوت قرار گرفتند [۲۷، ۲۸].

روش‌های اصلاح فیزیکی به‌عنوان روش‌های موفق اصلاح نشاسته ثابت شده‌اند [۲۹]. پلاسمای سرد بر ساختار گرانول‌ها و کریستالی نشاسته تأثیر می‌گذارد و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نشاسته را بدون تشکیل محصولات ناخواسته یا غیرقابل استفاده تغییر می‌دهد [۳۰].

۳- پلاسمای

اصطلاح پلاسمای توسط ایروینگ لانگمویر^۱ در دهه ۱۹۲۰، به‌عنوان چهارمین حالت ماده علاوه بر جامدات، مایعات و گازها معرفی شد. پیش از آن، در سال ۱۸۱۶، مایکل فارادی^۲ وجود چهارمین حالت ماده را که ماده تابشی نامیده بود، عنوان کرد. ویلیام کروکس^۳ قبلاً وجود پلاسمای

4-Electron Density
5-Gas Temperature
6- Ion Temperature

1-Irving Langmuir
2-Michael Faraday
3-William Crookes

و تفکیک را طی می‌کند تا چندین گونه فعال (گونه‌های فعال اکسیژن و گونه‌های نیتروژن فعال)، الکترون‌ها، یون‌ها و رادیکال‌های آزاد جدید تولید کند. میلا^۱ و پالمبو^۲ در سال ۲۰۱۴، دریافتند که دمای الکترون در پلاسمای سرد نسبتاً بالا است (۱ eV-۱۰)، درحالی‌که انرژی انتقالی ذرات سنگین (مولکول‌ها، یون‌ها) نزدیک به دمای اتاق است. چراکه الکترون‌ها جرم سبک‌تری نسبت به ذرات سنگین دارند [۳۴]. بنابراین، الکترون‌ها سریع‌تر از ذرات سنگین به انرژی جنبشی (درجه حرارت) بالاتر می‌رسند. بنابراین، پلاسمای سرد به دلیل این تفاوت در دما بین الکترون‌ها و ذرات سنگین، در تعادل ترمودینامیکی نامتعادل است [۳۵].

پلاسمای سرد در مقایسه با پلاسمای حرارتی به توان ورودی بسیار کمتری نیاز دارد. پلاسماهای حرارتی در دماهای بالا ۲۰۰۰۰-۴۰۰۰۰ کلوین و فشار بالاتر از ۱۰۵ پاسکال تولید می‌شوند [۳۳]. پلاسماهای حرارتی گازهای کاملاً یونیزه شده هستند چراکه همه گونه‌ها (الکترون‌ها، یون‌ها، ذرات سنگین) دارای دمای یکسانی هستند. کاربردهای پلاسمای حرارتی متنوع است که تعدادی از آن‌ها شامل متالورژی استخراجی، هم‌افزایی پودر ریز و فناوری پوشش است [۳۵]. پلاسمای حرارتی به دلیل فشار و دمای بالا برای نشاسته‌های حساس به حرارت مناسب نیست به همین دلیل است که پلاسمای سرد روش مناسب‌تری برای اصلاح نشاسته و سایر کاربردهای غذایی است [۳۶].

هدف از این مطالعه تقسیم‌بندی و بررسی ساختمان سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای سرد و بررسی اثر پلاسمای سرد بر روی انواع نشاسته‌های مختلف است.

۴- تقسیم‌بندی سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای

سرد

پلاسمای سرد را می‌توان در سیستم‌های فشار پایین و فشار اتمسفری تولید کرد.

۴-۱- سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای سرد در

فشار پایین

راه‌اندازی اولیه یک سیستم پلاسمای سرد در فشار پایین نیازمند یک محفظه خلأ، یک واحد پمپاژ (برای حذف گازهای ناخواسته در سیستم)، مخازن تغذیه گاز، کنترل‌کننده‌های گاز و گیج‌های فشار است. علاوه بر اجزای ذکر شده نیاز به الکترودهایی است که این الکترودها می‌توانند توسط ژنراتورهای الکترومغناطیسی با استفاده از جریان مستقیم DC، جریان متناوب (AC)، فرکانس‌های رادیویی یا فرکانس‌های میکروویو تغذیه شوند. این سیستم کم‌فشار را می‌توان توسط یک میکروکنترلر و کامپیوتر کنترل نمود. مزیت اصلی این سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای سرد در فشار پایین، کنترل آسان‌تر میزان و ترکیب اتمسفر گاز بحرانی است که پلاسمای آن تولید می‌شود؛ چراکه این سیستم در یک محفظه سربسته تحت خلأ قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، به دلیل این‌که این سیستم‌ها در یک محفظه سربسته هستند توزیع یکنواخت پلاسمای صورت می‌گیرد [۳۷]. با این حال، سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای در فشار پایین برای فراوری پیوسته بر روی خط مناسب نیستند و فقط می‌توانند به صورت ناپیوسته عمل کنند. از طرف دیگر تجهیزات خلأ مورد نیاز برای تنظیم پلاسمای گران است [۳۸].

۴-۱-۲- تقسیم‌بندی سیستم‌های تولیدکننده

پلاسمای سرد در فشار پایین برای اصلاح نشاسته

و استفاده در صنعت غذا

۴-۱-۲-۱- پلاسمای سرد تخلیه تابشی

در این سیستم، با اعمال جریان الکتریکی (۱۰۰ ولت یا بالاتر) بر روی گاز در یک جفت یا یک سری الکترودها، پلاسمای سرد تولید می‌شود. این جریان الکتریکی می‌تواند

1-Milella
2-Palumbo

الکتریکی می‌شود [۴۴]. یک هدایت‌کننده موج، امواج الکترومغناطیسی را از طریق یک محفظه تیمار پر از الکترون‌های گازی هدایت می‌کند. در نتیجه، الکترون‌ها انرژی میکروویو را جذب می‌نمایند و از طریق برخوردهای غیر الاستیک تحت واکنش‌های یونیزاسیون قرار می‌گیرند و پلاسمای تولید می‌کنند. در مقایسه با سیستم پلاسمای سرد تخلیه فرکانس رادیویی (RF)، سیستم پلاسمای سرد تخلیه میکروویو گونه‌های فعال بیشتری را تولید می‌کند و چگالی الکترونی بالاتری دارد، چراکه فرکانس برخورد الکترون‌ها به فرکانس میکروویو نزدیک است [۴۴]. مزیت دیگر این سیستم کارایی در فشار پایین و فشار اتمسفر است [۴۵]. با این وجود، عملیات آن گران بوده و در اصلاح نشاسته کاربرد چندانی ندارد [۴۶].

۲-۴-۲- سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای سرد در فشار اتمسفر

انواع سیستم‌های تولیدکننده پلاسمای سرد در فشار اتمسفر کار می‌کنند عبارتند از جت پلاسمای، تخلیه سد دی‌الکتریک و تخلیه کرونا. این سیستم‌ها به‌طور گسترده در ولتاژ بالاتر (برحسب کیلوولت) کار می‌کنند. مزیت سیستم‌های اتمسفری این است که می‌توان نمونه را به‌طور پیوسته تیمار کرد و از طرف دیگر نیازی به تجهیزات خلاء که گران‌قیمت هستند ندارند [۳۸].

۲-۴-۱- جت پلاسمای (APPJ)

به‌صورت جریان متناوب (AC)، جریان مستقیم (DC)، فرکانس پایین (۵۰ هرتز) یا فرکانس رادیویی (RF) (۴۰ کیلوهرتز، ۱۳،۵۶ مگاهرتز) باشد. الکترون‌های تولیدشده در این نوع پلاسمای انرژی کافی را از طریق برخوردهای برانگیخته به دست می‌آورند و فوتون‌ها تابش مرئی تولید می‌کنند [۳۹، ۴۰].

۲-۴-۱-۲- پلاسمای سرد تخلیه فرکانس رادیویی (RF)

این نوع پلاسمای معمولاً در محدوده فرکانس رادیویی ۱۰۰ - ۱ مگاهرتز کارایی دارد. توان تأمین‌شده از میدان الکتریکی را می‌توان به ۲ صورت با پلاسمای جفت کرد: خازنی [۴۱] یا القایی [۴۲]. پلاسمای فرکانس رادیویی جفت شده خازنی از دو الکتروود موازی تشکیل شده است. یک الکتروود به منبع تغذیه فرکانس رادیویی و الکتروود دیگر به زمین متصل است [۴۲]. ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکتروود باعث شتاب الکترون‌ها و از طریق برخورد غیر الاستیک با گونه‌های گاز خنثی باعث تولید الکترون‌های ثانویه و یون‌های مثبت می‌شود [۴۲]. پلاسمای فرکانس رادیویی جفت شده القایی، با وارد کردن جریان الکتریکی به یک سیم‌پیچ باعث القاء میدان مغناطیسی در پلاسمای فرکانس رادیویی می‌گردد. از طرف دیگر میدان مغناطیسی یک میدان القایی ایجاد می‌کند و باعث شتاب الکترون‌هایی می‌شود که منجر تولید و پایداری پلاسمای می‌گردند. پلاسمای فرکانس رادیویی جفت شده القایی در مقایسه با پلاسمای فرکانس رادیویی جفت شده خازنی بازده بالاتری ارائه می‌دهد [۴۳].

۲-۴-۱-۳- پلاسمای سرد تخلیه میکروویو

این سیستم تولید پلاسمای، یک روش بدون الکتروود است که به‌طور معمول با فرکانس الکترومغناطیسی ۲/۴۵ گیگاهرتز کار می‌کند [۴۰]. در پلاسمای تخلیه میکروویو یک مگنترون امواج الکترومغناطیسی را ساطع نموده و باعث ایجاد تخلیه

سیستم تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) شامل الکترودهایی است که با مواد دی‌الکتریک مانند پلاستیک، کوارتز یا سرامیک پوشیده شده‌اند. برای جلوگیری از خروج ذرات پلاسما معمولاً الکترودها را در ظرف سربسته قرار می‌دهند، در این سیستم نمونه برای تیمار مستقیم بین الکترودها قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از ایجاد جرقه، الکترودها را با مواد دی‌الکتریک پوشش می‌دهند و از طرف دیگر هوای مورد استفاده در این سیستم‌ها به‌عنوان مانع جریان عمل می‌کند. این سیستم به احتراق ولتاژ بالا (۱۰ کیلوولت) نیاز دارد [۵۱] که می‌تواند توسط منبع AC یا DC تولید شود. پارامترهای طراحی در ساخت دستگاه استفاده از الکترودهای لبه‌گرد [۵۲]، انتخاب مواد دی‌الکتریک [۵۳] و اعمال ولتاژ بالاتر در نظر گرفته می‌شوند. اعمال ولتاژ بالا باعث جلوگیری از ایجاد قوس در طول تولید پلاسما می‌شود. گازهایی که معمولاً در این سیستم استفاده می‌شوند شامل هوای اتمسفر، نیتروژن، آرگون و هلیوم می‌باشند.

۴-۲-۳- سیستم‌های پلاسمای تخلیه کرونا

این سیستم یک سیستم پلاسمای تخلیه پالسی است که در اتمسفر یا فشار نزدیک به اتمسفر عمل می‌کند. با فراتر رفتن میدان الکتریکی غیریکنواخت از آستانه شکست تخلیه کرونا صورت می‌گیرد. راه‌اندازی سیستم تخلیه کرونا به منبع تغذیه ولتاژ بالا، الکترودها (که اغلب نامتقارن هستند؛ مانند یک نقطه و یک صفحه [۵۴]) و محفظه‌ی تیمار نمونه نیازمند است. تخلیه کرونا به‌صورت یک تابش درخشان در اطراف نوک الکترودها ظاهر می‌شود [۵۵]. بر اساس نوع ولتاژ بالای اعمال‌شده به الکترودها، تخلیه کرونا می‌تواند مثبت (ولتاژ بالا در آند) یا منفی (ولتاژ بالا در کاتد) باشد. گازهای مورد استفاده برای تولید تخلیه کرونا معمولاً شامل هوا، نیتروژن، آرگون، مخلوطی از هلیوم و اکسیژن، یا آرگون و اکسیژن است [۵۶]. محل قرارگیری نمونه‌ها در این سیستم،

این سیستم‌های تولیدکننده پلاسما در فشار اتمسفر کار می‌کنند و نیازی به محفظه‌های خلأ ندارند به همین دلیل ساخت آن‌ها در مقایسه با سیستم‌های پلاسمای فشار پایین آسان است. این سیستم را می‌توان بر اساس نوع تنظیمات و حالت تحریک بر روی سیستم‌های غذایی به دو سیستم الکتروودوگانه و جت میدان انتهایی (تک الکتروود) تقسیم کرد.

سیستم الکتروودوگانه شامل ژنراتور پلاسما و سیستم کنترل‌کننده جریان هوا و ورودی گاز است. ژنراتور پلاسما معمولاً شامل یک پوشش بیرونی است که به‌عنوان الکتروود زمین عمل می‌کند و یک الکتروود داخلی که به منبع تغذیه متصل شده است و جنس این الکتروود فولاد ضدزنگ، لوله پیرکس یا شیشه است. با برقراری جریان الکتریکی بالا (۲/۵ کیلوولت تا ۶۰ کیلوولت) گاز قرارگرفته بین این دو الکتروود یونیزه می‌شود. این الکترودها می‌توانند به شکل مستطیل، مخروطی یا استوانه‌ای باشند [۴۷]. گازهای مورد استفاده برای تولید پلاسما که خواص نگهداری بهتری دارند عبارتند از هوای فشرده یا ترکیبی از آرگون/نیتروژن و اکسیژن/هوای فشرده [۴۸]. انتخاب میزان جریان گاز برای دستیابی به طول جت پلاسمای مورد نیاز بر اساس پارامترهای طراحی سیستم جت پلاسما بسیار متفاوت است. سیستم جت میدان انتهایی (تک الکتروود) شامل یک بدنه تفلون است که در آن یک سیم مسی در داخل لوله موئین قرار گرفته، و این سیم مسی تامین کننده ولتاژ بالا است [۴۹]. این سیستم در مقایسه با سیستم الکتروودوگانه، برای تولید پلاسما به جریان ورودی گاز کمتری در دقیقه نیاز دارد [۵۰].

۴-۲-۲- تخلیه سد دی‌الکتریک^۱ (DBD)

1 - Dielectric Barrier Discharge

تغییرات ساختاری در سطح مولکولی نشاسته (ترتیب مولکولی کوتاه‌برد) را می‌توان با استفاده از طیف FTIR کمی کرد [۶۳] چراکه نوارهای FTIR در ۱۰۰۰، ۱۰۲۲ و ۱۰۴۷ سانتی‌متر نسبت به تغییرات ساختار نشاسته حساس می‌باشند [۶۴]. نوارهای ۱۰۴۷ و ۱۰۰۰ سانتی‌متر در ساختار کریستالی نشاسته بسیار مشخص‌تر هستند، درحالی‌که نوارهای ۱۰۲۲ سانتی‌متر در ساختار آمورف غالب‌تر است [۶۵]. بنابراین، نسبت‌های نوری در ۱۰۰۰/۱۰۲۲ سانتی‌متر و ۱۰۴۷/۱۰۲۲ سانتی‌متر به‌طورکلی به‌عنوان معیار ترتیب مولکولی کوتاه‌برد در نشاسته در نظر گرفته می‌شود [۶۵، ۶۶].

گوو^۶ و همکاران در سال ۲۰۲۲، کاهش شدت نوار FTIR را در ۲۸۷۱ سانتی‌متر در سیب‌زمینی تیمار شده با پلاسمای DBD مشاهده کردند که این کاهش به دلیل حذف برخی از مولکول‌های آب از نشاسته توسط تیمار پلاسمای است. همچنین یان^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۹ با بررسی نوارهای FTIR، تغییراتی را در ترتیب مولکولی کوتاه‌برد نشاسته سیب‌زمینی بعد از تیمار با جت پلاسمای گزارش دادند. از طرف دیگر، یان و همکاران در سال ۲۰۲۱، ازدست‌دادن نظم مولکولی در ترتیب کوتاه‌برد نشاسته برنج را بعد از تیمار با پلاسمای سرد مشاهده کردند که این کاهش نظم مولکولی به این دلیل است که تیمار پلاسمای سرد باعث از بین رفتن زنجیره‌های جانبی آمیلوپکتین می‌شود و قطعات نشاسته‌ای کوچک‌تری تولید می‌کند. از سوی دیگر تیمار پلاسمای سرد می‌تواند آمیلوز را در ناحیه آمورف تجزیه کند و مقدار زیادی آمیلوز کوچک‌تر تولید و آزاد نماید که در نتیجه باعث کاهش نظم مولکولی در ترتیب کوتاه‌برد می‌شود. همچنین بی^۸ و

در زیر الکتروود یا هدایت از طریق شیلنگ‌ها به محفظه تیمار است.

پلاسمای به‌عنوان یک تکنیک فراوری غیرحرارتی، برای طیف وسیعی از کاربردها در صنایع غذایی، مانند آلودگی‌زدایی میکروبی مواد غذایی، نگهداری مواد غذایی، غیرفعال‌سازی آنزیم و اصلاح ویژگی‌های عملکردی برخی اجزای تشکیل‌دهنده غذا مورد بررسی قرار گرفته است. پلاسمای سرد در اصلاح اجزای غذا از جمله نشاسته، پروتئین، غنی‌سازی مواد غذایی [۵۷]، اصلاح فیلم‌ها [۵۸]، قابلیت چاپ پذیری در بسته‌بندی و غیره مورد بررسی قرار گرفته است [۵۹، ۶۰]. جت پلاسمای به دلیل سهولت دسترسی با سیستم‌های فراوری مداوم، در فراوری مواد غذایی مانند آجیل‌ها، آب‌میوه‌ها، ادویه‌ها و سبزی‌ها استفاده می‌شود [۵۰، ۶۱، ۶۲].

۵- بررسی اثر پلاسمای سرد اتمسفری بر خواص

نشاسته منابع مختلف

۵-۱- خواص مولکولی

ترتیب مولکولی کوتاه‌برد، وزن مولکولی و محتوای آمیلوز تحت عنوان خواص مولکولی نشاسته بررسی می‌شوند و برای تجزیه و تحلیل خواص مولکولی نشاسته‌های مختلف پس از اصلاح با پلاسمای سرد می‌توان از تکنیک‌هایی مانند کروماتوگرافی تبادل آنیونی با کارایی بالا (HPAEC)، کروماتوگرافی با عملکرد بالا همراه با پراکندگی نور لیزری چند زاویه‌ای (HPSEC-MALLS-RI)، FTIR، NMR^۴ و طیف‌سنجی فوتوالکترونی اشعه ایکس (XPS)^۵ استفاده کرد [۳۰].

۵-۱-۱- بررسی ترتیب مولکولی کوتاه‌برد

- 1- High-Performance Anion-Exchange Chromatography
- 2- High-Performance Size-Exclusion Chromatography coupled with Multi-Angle Laser Light Scattering
- 3- Fourier-transform infrared spectroscopy
- 4- Nuclear Magnetic Resonance
- 5- X-ray Photoelectron Spectroscopy

6 -Guo
7 -Yan
8 -Bie

مترو ۹۲۱ سانتی‌متر در طیف FTIR نشان‌دهنده انبساط و انقباض پیوند C-O-C در حلقه شش عضوی کربن - اکسیژن هستند. پلاسمای سرد باعث کاهش قابل‌توجهی از اوج در ۹۲۱ سانتی‌متر می‌شود؛ چراکه دپلمیرزاسیون عمدتاً با قطع پیوندهای گلیکوزیدی C-O-C مولکول‌های نشاسته رخ می‌دهد. تیمار پلاسمای سرد باعث تحریک تولید ذرات فعال مختلف می‌گردد که این ذرات فعال با نشاسته واکنش داده و ساختار پلیمری را از بین می‌برند. همچنین رادیکال‌های آزاد تشکیل‌شده پیوند گلیکوزیدی را در موقعیت کربن شماره ۱ مولکول گلوکز در ماکرومولکول نشاسته از بین برده و منجر به دپلمیرزاسیون زنجیره نشاسته می‌شود [۷۱]. از سوی دیگر در طیف FTIR قله ۲۹۳۰ سانتی‌متر بیان‌کننده کشش C-H است. همچنین قله‌ی ۳۴۳۰ سانتی‌متر نشان‌دهنده‌ی اوج جذب ارتعاش کششی O-H است.

کارالیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، افزایشی را در نواحی پیوندهای C-O-C در نشاسته آریا پس از تیمار پلاسمای تخلیه‌ی دی‌الکترونیک (۱۴-۱۰ کیلوولت) مشاهده کردند. همچنین ونگساگونساپ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۴ و دیایی و همکاران در سال ۲۰۱۳، افزایشی را در مناطق نسبی پیوندهای C-O-C در نشاسته پس از تیمار پلاسمای مشاهده کردند.

علاوه بر این، ونگساگونساپ و همکاران در سال ۲۰۱۴، کاهش شدت نسبی پروتون‌های گروه OH⁻ نشاسته تاپوکای گرانولی و غیر گرانولی را پس از تیمار پلاسمای در ۵۰ و ۱۰۰ وات مشاهده کردند. این به دلیل ایجاد اتصال عرضی در این نشاسته‌ها و از بین رفتن گروه‌های OH بود.

۵-۱-۲- وزن مولکولی

تجزیه و تحلیل XPS افزایش در پیوندهای O-C-OH در نشاسته ذرت و کاهش متعاقب آن در پیوندهای (C-H) C،

همکاران در سال ۲۰۱۶ و ژو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹، کاهش نسبت نواری ۱۰۲۲/۱۰۴۷ در نشاسته ذرت را پس از تیمار با پلاسمای سرد مشاهده کردند. به‌طور مشابه کارالیو^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۱، با بررسی طیف FTIR نشاسته آریا بعد از تیمار با پلاسمای سرد به کاهش نسبت نواری ۱۰۲۲/۱۰۴۷ پی بردند. از سوی دیگر، یان و همکاران در سال (۲۰۲۰) با بررسی طیف FTIR نشاسته موز بعد از تیمار با پلاسمای سرد، افزایش نسبت شدت جذب در ۱۰۲۲/۱۰۴۷ سانتی‌متر را گزارش دادند. سان^۳ و همکاران در سال (۲۰۲۲)، افزایش نسبت شدت جذب را در ۱۰۲۲/۱۰۴۷ سانتی‌متر مشاهده کردند. کاهش در ترتیب کوتاه‌برد نشاسته بعد از تیمار با پلاسمای به دلیل پلیمریزه شدن پیوندهای گلیکوزیدی در نشاسته است [۶۷].

همچنین شن^۴ و همکاران ۲۰۲۲ با بررسی طیف FTIR نشاسته گندم بعد از تیمار با پلاسمای سرد، کاهش نسبت شدت جذب در ۱۰۲۲/۱۰۴۷ سانتی‌متر را گزارش دادند که این درجه‌ی کاهش متناسب با زمان تیمار پلاسمای بود چراکه تیمار پلاسمای باعث دپلمیرزاسیون مولکول‌های نشاسته شد [۶۸].

از طرف دیگر، افزایش نسبت ۱۰۲۲/۱۰۴۷ سانتی‌متر به دلیل تجزیه و آزادسازی آمیلوز از نواحی آمورف می‌باشد که باعث کاهش ساختار آمورف می‌گردد [۶۹]. تیمار پلاسمای سرد می‌تواند باعث ایجاد پیوند ماریپیچ دوتایی کوتاه برد شود که ایجاد این پیوندها باعث افزایش ترتیب کوتاه برد نشاسته می‌شود [۷۰].

علاوه بر بررسی ترتیب مولکولی کوتاه‌برد، طیف FTIR می‌تواند روشی برای تشخیص اتصال عرضی در نشاسته باشد. قله‌های ۱۱۶۰ سانتی‌متر، ۱۰۸۴ سانتی‌متر، ۱۰۱۸ سانتی

1-Zhou

2-Carvalho

3-Sun

4-Shen

5-Wongsagonsup

آمیلوپکتین به تدریج کاهش می‌یابد، این کاهش وزن مولکولی بیان‌کننده‌ی این است که پلاسمای با موفقیت تخریب بین مولکول‌های نشاسته را انجام می‌دهد. این با مشاهدات جی^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۱، مطابقت دارد. از طرف دیگر شایژن و همکاران در سال ۲۰۲۱، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسمای تخلیه دی‌الکتریک بر روی لوبیا آزوکی باعث کاهش وزن مولکولی شد که دلیل این کاهش را به شکسته شدن یا دپلمریزه شدن زنجیره جانبی پلیمر آمیلوپکتین نسبت دادند. همچنین سارانژنجکت^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ دریافتند که افزایش ولتاژ و زمان تیمار پلاسمای باعث کاهش وزن مولکولی نشاسته تاپوکا شد و این کاهش را به دپلمریزاسیون تیمار پلاسمای نسبت دادند [۷۳].

کاهش وزن مولکولی توسط تیمار پلاسمای سرد می‌تواند به دو دلیل زیر باشد: ۱- واکنش بین یون‌های پرانرژی که توسط تیمار پلاسمای سرد به وجود آمده‌اند با زنجیره‌های جانبی آمیلوز و آمیلوپکتین مولکول نشاسته باعث دپلمریزاسیون و تشکیل قطعات کوچک‌تر می‌شود. ۲- توانایی اکسیداسیون بالای گونه‌های واکنش‌گر تولیدشده توسط پلاسمای سرد با انتهای احیاکننده مولکول نشاسته باعث تجزیه مولکول نشاسته می‌گردد [12]. از سویی دیگر شایژن سان^۶ و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسمای سرد بر روی نشاسته برنج، وزن مولکولی آمیلوز را از $105 \times 0,75$ گرم در مول به $105 \times 3,82$ گرم در مول افزایش داد. اگرچه، وزن مولکولی آمیلوپکتین ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت، چراکه زمان تیمار پلاسمای سرد طولانی شد. افزایش وزن

C-O و O-C-O به دلیل اکسیداسیون این پیوندها توسط گونه‌های واکنش‌گر پلاسمای در مقابل گروه‌های کربوکسیل (O--C-OH) را نشان داد [۷۲]. شن و همکاران در سال ۲۰۲۲ گزارش کردند که افزایش زمان تیمار پلاسمای به طور قابل توجهی وزن مولکولی آمیلوپکتین مولکول‌های نشاسته گندم را کاهش داد، در حالی که وزن مولکولی مواد واسطه و آمیلوز را در مقایسه با ماده اصلی افزایش داد. چراکه تیمار پلاسمای می‌تواند به تدریج مولکول‌های نشاسته را با افزایش زمان تیمار، دپلمریزه کند [۶۸].

همچنین بی و همکاران در سال ۲۰۱۶، دریافتند که اعمال تیمار پلاسمای بر روی نشاسته ذرت باعث افزایش متوسط وزن مولکولی شد این افزایش به دلیل پلیمریزاسیون نشاسته توسط پلاسمای است. از سوی دیگر سان و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسمای تخلیه دی‌الکتریک بر روی نشاسته‌ی برنج باعث افزایش وزن مولکولی آمیلوز گردید. محققان این افزایش را به پلیمریزه شدن زنجیره‌های آمیلوز، ناشی از تیمار پلاسمای نسبت دادند. از طرف دیگر کالایوندان^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسمای ۱۷۰ ولت بر روی نشاسته انبه باعث افزایش ویسکوزیته وزن مولکولی (MW_v)^۲ شد. اگرچه افزایش تیمار پلاسمای به ۲۳۰ ولت باعث کاهش MW_v گردید. دلیل این افزایش و کاهش را این‌گونه بیان کردند که ولتاژ تیمار پایین‌تر باعث ایجاد اتصال بین مولکولی مولکول‌های نشاسته غیرپلیمریزه شده، در زنجیره‌های مجاور می‌شود و در نتیجه MW_v را افزایش می‌دهد. درحالی‌که، در ولتاژ تیمار بالاتر، دپلمریزاسیون به‌طور کامل در داخل مولکول نشاسته اتفاق می‌افتد و بنابراین MW_v را کاهش می‌دهد. همچنین شایژن^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۲، دریافتند که با افزایش زمان تیمار پلاسمای سرد وزن مولکولی آمیلوز و

4 -Ge
5 -Srngansomjit
6 -Xiangxiang Sun

1-Kalaivendan
2-Molecular Weight Viscosity
3- Xiangzhen

آمیروز نشاسته ذرت را کاهش دهد. همچنین سارانژنکت و همکاران در سال ۲۰۲۲ دریافتند که افزایش ولتاژ و زمان تیمار پلاسما باعث افزایش محتوای آمیروز تاپوکا شد [۷۳].

این نتایج نشان می‌دهد که تیمار پلاسما سرد اثرات متفاوتی بر محتوای آمیروز نشاسته از منابع مختلف دارد. افزایش محتوای آمیروز را می‌توان به این نسبت داد که تیمار پلاسما سرد می‌تواند باعث پلیمریزاسیون زنجیره‌های آمیروز، تغییر ساختار ماریچ آمیروز و بهبود مقدار آمیروز گردد. همچنین، دپلیمریزاسیون زنجیره‌های آمیروز می‌تواند محتوای آمیروز نشاسته‌ها را کاهش دهد.

علاوه بر این، وزن مولکولی آمیروز می‌تواند بر محتوای آمیروز تأثیر بگذارد. در نتیجه سیستم‌های پلاسما فشار اتمسفر می‌توانند مولکول‌های نشاسته را دپلیمریزه کنند یا باعث ایجاد اتصال عرضی شوند. این بستگی به عوامل مختلفی مانند زمان تیمار، قدرت اعمال شده، فشار، نوع گاز و منبع گیاهی نشاسته دارد [۱۲].

۲-۵- مورفولوژی گرانول

اوکیره^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹، پس از اعمال تیمار پلاسما با فرکانس رادیویی (RF) ۱۲۰ وات به مدت ۶۰ دقیقه، هیچ تأثیری بر شکل گرانول‌های نشاسته ذرت، برنج و سیب‌زمینی مشاهده نکردند.

از طرف دیگر ژانگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۵، با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری معمولی و پلاریزه، مورفولوژی نشاسته سیب‌زمینی بعد از تیمار با پلاسما نیتروژن به مدت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه هیچ‌گونه تغییری گزارش نکردند. علاوه بر انجام مطالعاتی مبنی بر بررسی مورفولوژی گرانول‌های نشاسته بعد از تیمار با پلاسما سرد، مطالعاتی نیز در مورد وجود رسوبات در نشاسته پس از

مولکولی آمیلوپکتین عمدتاً به پلیمریزاسیون مولکول‌های نشاسته ناشی از رادیکال‌های فعال نسبت داده می‌شود [۳۰].

اثرات متفاوت بر وزن مولکولی بین آمیلوپکتین و آمیروز پس از تیمار پلاسما سرد ممکن است به ساختار آمیلوپکتین نسبت داده شود که به ترکیب تیمارها حساس‌تر است. این را می‌توان با ممانعت فضایی پیوند $\alpha(1 \rightarrow 6)$ که از پیوند $\alpha(1 \rightarrow 4)$ کوچک‌تر است توضیح داد، بنابراین پیوند $\alpha(1 \rightarrow 6)$ راحت‌تر شکسته می‌شود [۷۴].

۵-۱-۳- محتوای آمیروز

کاروالیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک تا ۱۴ کیلوولت بر روی نشاسته آریا باعث کاهش در محتوای آمیروز شد که این کاهش را به دپلیمریزاسیون نشاسته آریا به قندهای ساده نسبت دادند. در حالی که افزایش ولتاژ تولید پلاسما تا ۲۰ کیلوولت منجر به افزایش محتوای آمیروز شد بنابراین، تولید پلاسما با ولتاژ بالاتر باعث پلیمریزاسیون زنجیره‌های نشاسته‌ی آریا می‌شود. همچنین تیمار پلاسما سرد محتوای آمیروز نشاسته کینوا [71] و نشاسته برنج [41] را کاهش داد. علاوه بر این، مکانیسم دپلیمریزاسیون پلاسما سرد باعث کاهش قابل توجه محتوای آمیروز می‌شود [۷۲]. همچنین شن و همکاران در سال ۲۰۲۲ گزارش کردند که با افزایش زمان اعمال تیمار پلاسما محتوای آمیروز نشاسته گندم کاهش می‌یابد که این کاهش را به دپلیمریزاسیون جزئی زنجیره‌های آمیروز که توسط گونه‌های فعال پلاسما مورد حمله قرار می‌گیرد نسبت دادند [۶۸].

از سویی دیگر شایژن سان و همکاران در سال ۲۰۲۲، دریافتند که تیمار پلاسما سرد محتوای آمیروز نشاسته برنج را افزایش داد. با این حال، بینرا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸، مشاهده کردند که تیمار پلاسما سرد می‌تواند محتوای

2- Okyere
3- Zhang

1- Banura

شود. از طرف دیگر شایژن و همکاران در سال ۲۰۲۲، گزارش کردند که بعد از اعمال تیمار پلاسمای سرد تخلیه دی‌الکترونیک ۴۰ ولت به مدت ۹،۶،۳،۱ دقیقه بر روی نشاسته برنج هیچ تغییری در مورفولوژی گرانول‌های این نشاسته مشاهده نشد. همچنین شایژن سان و همکاران در سال ۲۰۲۲، با بررسی مورفولوژی گرانول‌های نشاسته برنج بعد از تیمار پلاسمای سرد تخلیه دی‌الکترونیک ۴۰ ولت به مدت ۱۰،۶،۲ به این نتیجه رسیدند که تیمار پلاسمای سرد می‌تواند تغییر کمی در مورفولوژی گرانول‌های نشاسته ایجاد کند. با وجود این، یکپارچگی گرانول‌های نشاسته حفظ می‌شود، این موضوع نشان می‌دهد که این اصلاح عمدتاً در داخل گرانول‌های نشاسته رخ می‌دهد. از طرف گیت^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۱، بعد از تیمار نشاسته لوبیا ردازوک با پلاسمای سرد تخلیه دی‌الکترونیک ۴۰ ولت به مدت ۱۰،۵،۱ دقیقه مشاهده کردند که یکپارچگی گرانول‌های نشاسته لوبیا ردازوک پس از تیمار پلاسمای سرد تغییر نکرد. تیمار پلاسمای تخلیه دی‌الکترونیک DBD به دلیل تولید گونه‌های بسیار پرنرژی در طی تولید پلاسمای باعث بمباران سطح گرانول نشاسته می‌شود که این بمباران باعث تبخیر سطح نشاسته (حکاکی پلاسمای) می‌شود. همچنین تیمار پلاسمای تخلیه دی‌الکترونیک DBD باعث ایجاد ترک در سطح نشاسته موز [۶۹]، نشاسته لوبیای قرمز آزوکی [76] و نشاسته سیب‌زمینی [۷۷] شد. از طرف دیگر کاروالیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، تشکیل شکاف‌ها و تجمع ذرات را در گرانول‌های نشاسته آریا پس از تیمار پلاسمای DBD (۲۰ کیلوولت) مشاهده کردند.

۳-۵- بلورینگی

تیمار با پلاسمای سرد گزارش شده است. بینیرا و همکاران در سال ۲۰۱۸، وجود رسوبات ناهموار بر روی سطوح گرانول‌های نشاسته ذرت را پس از تیمار در پلاسمای RF جفت شده خازنی ۶۰ وات به مدت ۲۰ دقیقه گزارش کردند. نتایج این مطالعه با گزارش‌های قبلی لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲، مطابقت دارد. محققان پس از قرار گرفتن نشاسته سیب‌زمینی و ذرت در معرض پلاسمای تابشی به مدت ۳۰ دقیقه، رسوباتی روی سطح این دو نشاسته مشاهده کردند. از سوی دیگر پانکاج^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷، از AFM^۳ برای مطالعه توپوگرافی سطح فیلم‌های اصلاح شده با پلاسمای سرد اتمسفری در ولتاژ بالا (HVAC) استفاده کردند. آن‌ها افزایش زبری سطح این فیلم‌های اصلاح شده را به دلیل قابلیت حکاکی پلاسمای مشاهده کردند. محققان گزارش کردند که فیلم نشاسته برنج نسبت به حکاکی سطح حساس‌تر است. از طرف دیگر شیخی و همکاران در سال ۲۰۲۰، نیز افزایش زبری فیلم نشاسته گندم را پس از تیمار با پلاسمای تخلیه درخشان گزارش کردند. شکاف‌ها، حفره‌ها، رسوب‌ها و ناهمواری‌ها در اثر مکانیسم حکاکی کردن گونه‌های واکنش‌گر ایجاد شده در طی اصلاح نشاسته‌ها با پلاسمای سرد ایجاد می‌شوند [۱۲، ۶۴، ۷۵]. اثرات پلاسمای مورفولوژی نشاسته به شرایط تیمار، نوع پلاسمای و منبع گیاهی نشاسته بستگی دارد.

همچنین شن و همکاران در سال ۲۰۲۲ گزارش کردند که نشاسته گندم تیمار شده با پلاسمای شکل اصلی گرانول خود را حفظ کرد، در حالی که باعث ایجاد برخی فرورفتگی‌ها و خوردگی‌ها روی سطح گرانول‌ها به دلیل پدیده حکاکی پلاسمای شد [۶۸].

نتایج مطالعات نشان داده‌اند که تیمار با پلاسمای تخلیه تابش می‌تواند به‌طور مؤثری باعث ایجاد شکاف در نشاسته

1- Lee

2 -Pankaj

3 -Atomic Force Microscopy

4 -Geet

مشاهده کردند که تیمار پلاسما سرد بر روی نشاسته‌ی برنج ساختار کریستالی نشاسته برنج را تغییر نمی‌دهد، چراکه تیمارهای فیزیکی عمدتاً بر ناحیه آمورف به‌جای ناحیه کریستالی گرانول‌های نشاسته تأثیر می‌گذارد [۲۵]. محققان این کاهش تبلور نسبی را به اختلال در سازمان‌دهی مجدد مولکول‌های نشاسته نسبت می‌دهند. از طرف دیگر دپلمیریزاسیون زنجیره‌های نشاسته ناشی از تیمار پلاسما نیز باعث کاهش بلورینگی نسبی می‌شود و ساختار کریستالی نشاسته را تغییر می‌دهد [۸۰].

اگرچه و^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۸، افزایش تبلور نسبی نشاسته موز را پس از تیمار پلاسما تخلیه کرونا مشاهده کردند. همچنین گائو و همکاران در سال ۲۰۲۲ گزارش کردند که افزایش مدت زمان و ولتاژ تیمار پلاسما باعث افزایش تبلور نسبی نشاسته گندم سیاه تارتاری شد [۸۱].

این افزایش تبلور نسبی به دلیل واکنش گونه‌های فعال در پلاسما با مولکول نشاسته که می‌تواند باعث هیدروکسیل‌زدایی نواحی آمورف و از طریق تشکیل پیوند اتری باعث می‌شود که مولکول‌های نشاسته دوباره به یک ساختار بلوری کامل‌تر تبدیل شوند. محققان به این نتیجه رسیدند که پلاسما اتمسفر می‌تواند تغییراتی را در تبلور نشاسته نوع B و C بیشتر از نشاسته‌های نوع A ایجاد کند.

۴-۵- ژلاتینه شدن

ونگساگونساپ و همکاران در سال ۲۰۱۴، افزایش در ΔH نشاسته تاپوکای گرانولی اصلاح‌شده با پلاسما ۵۰ و ۱۰۰ وات مشاهده کردند. ولی دمای ژلاتینه شدن تفاوت معنی‌داری با نمونه‌های تیمار نشده نداشت. همچنین گائو و همکاران در سال ۲۰۱۹، مشاهده کردند که تیمار پلاسما سرد بر روی نشاسته گندم سیاه تارتاری باعث افزایش

زو و همکاران در سال ۲۰۱۹، مشاهده کردند که تبلور نسبی (RC) نشاسته ذرت مومی (۴۶/۷٪ - ۴۲/۰٪) و معمولی (۴۰/۱٪ - ۳۵/۷٪) پس از تیمار جت پلاسما کاهش یافت [۶۷]. به‌طور مشابه، یان و همکاران در سال ۲۰۱۹، مشاهده کردند که پس از تیمار جت پلاسما نشاسته سیب‌زمینی تبلور نسبی بدون تغییر در ساختار کریستالی کاهش یافت [۷۸]. از سوی دیگر، مطالعه یان و همکاران در سال ۲۰۲۰، نشان داد که با افزایش زمان تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکترونیک، ساختار کریستالی نشاسته موز از نوع C به نوع A تغییر یافت [۶۹]. همچنین گوو و همکاران در سال ۲۰۲۲، کاهش تبلور نسبی نشاسته سیب‌زمینی را پس از تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکترونیک بدون هیچ تغییری در ساختار کریستالی نوع B مشاهده کردند. به‌طور مشابه، سان و همکاران در سال (۲۰۲۲) کاهش در تبلور نسبی نشاسته برنج پس از تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکترونیک بدون هیچ تغییری در ساختار کریستالی نوع A مشاهده کردند. از سوی دیگر شایژن و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که تیمار پلاسما سرد باعث کاهش تبلور نشاسته برنج شد [۴۱]. کاهش تبلور به دلیل دپلمیریزاسیون مولکول‌های نشاسته است [۷۹] همچنین سارائزنجکت و همکاران در سال ۲۰۲۲ دریافتند که افزایش ولتاژ و زمان تیمار پلاسما باعث کاهش تبلور نسبی تاپوکا شد [۷۳].

تیمار پلاسما سرد باعث تجزیه جزئی زنجیره‌های مولکولی نشاسته، به‌ویژه آمیلوپکتین در لایه سطحی گرانول‌های نشاسته و به دنبال آن بازآرایی سست زنجیره‌های نشاسته آسیب‌دیده می‌شود در نتیجه، ساختار کلی کریستالی لایه سطحی نشاسته برنج از بین می‌رود و با افزایش نواحی آمورف، ساختار مولکولی نشاسته تمایل به بی‌نظمی پیدا می‌کند. همچنین شایژن سان و همکاران در سال ۲۰۲۲،

ویسکوزیته نهایی، ویسکوزیته شکست، شکست ویسکوزیته و برگشت به عقب شد [۶۹]. چراکه افزایش شدت تیمار پلاسمای DBD باعث کاهش پیوندهای متقاطع، نیروهای واندروالس، و پیوندهای هیدروژنی بین زنجیره‌های نشاسته آسیب‌دیده و چسبناک گردید.

وو و همکاران در سال ۲۰۱۹، مشاهده کردند که اعمال تیمار جت پلاسمای بر نشاسته ذرت باعث کاهش در ویسکوزیته نهایی، ویسکوزیته شکست و ویسکوزیته حداکثر می‌شود و در شدت بالاتر از ۸۰۰ وات، ویسکوزیته به‌طور قابل توجهی به ۴۱۰ سانتی پویز کاهش می‌یابد، ولی هیچ تغییری در دمای خمیری شدن نشاسته ایجاد نمی‌شود. کالیوندان و همکاران در سال ۲۰۲۲، کاهش در ویسکوزیته حداکثر، شکست، برگشت به عقب و ویسکوزیته نهایی را در نشاسته انبه پس از تیمار با پلاسمای مشاهده کردند. محققان علت کاهش در ویسکوزیته حداکثر را به دپلمیریزاسیون زنجیره‌های نشاسته نسبت دادند و علت کاهش در ویسکوزیته شکست، برگشت به عقب و نهایی نشاسته انبه را اثر تثبیت‌کننده تیمار پلاسمای دانستند. همچنین شایژن سان و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که تیمار پلاسمای سرد برای مدت کوتاه هیچ تغییری در ویسکوزیته حداکثر نشاسته برنج ایجاد نکرد. از طرف دیگر شن و همکاران در سال ۲۰۲۱، هیچ تغییر قابل توجهی در ویسکوزیته حداکثر نشاسته برنج پس از تیمار پلاسمای سرد برای مدت کوتاهی مشاهده نکردند. اگرچه، تیمار پلاسمای سرد برای مدت طولانی‌تر به‌طور قابل توجهی ویسکوزیته حداکثر نشاسته برنج را کاهش داد. کاهش در ویسکوزیته حداکثر ممکن است به ارتباط بین زنجیره‌های نشاسته و افزایش نیروهای پیوند درون‌مولکولی نسبت داده شود [۷۱]. به‌طور مشابه، مطالعات گایت^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹، و مطالعه‌ی جی و همکاران در سال ۲۰۲۱، و مطالعه‌ی شن و همکاران در

ΔH و افزایش دمای ژلاتینه شدن نشاسته گندم سیاه تارتاری شد. بالا بودن ΔH و دمای ژلاتینه شدن نشان‌دهنده وجود مارپیچ‌های دوتایی طولانی‌تر می‌باشد که توسط انتهای پیچ‌خورده زنجیره‌های خارجی در آمیلوپکتین تشکیل شده است [۸۲]. نشاسته‌های با اتصال عرضی بالا در برابر حرارت و آسیب برشی در طی عملیات حرارتی مقاوم‌تر هستند [۸۳]. همچنین شن و همکاران در سال ۲۰۲۲ مشاهده کردند که تیمار پلاسمای سرد باعث افزایش دمای ژلاتینه شدن، آنتالپی ژلاتیناسیون نشاسته گندم می‌شود [۶۸].

ولی، وو و همکاران در سال ۲۰۱۸، کاهش ΔH نشاسته موز و افزایش دمای ژلاتینه شدن پس از اصلاح پلاسمای تخلیه کرونا مشاهده کردند. از طرف دیگر کاروالیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، کاهش دمای ژلاتینه شدن را در نشاسته آریا پس از تیمار DBD (۱۴ کیلوولت) مشاهده کردند. همچنین ژو و همکاران در سال ۲۰۱۹، کاهش ΔH نشاسته‌های ذرت مومی و معمولی پس از تیمار با جت پلاسمای با توان ۷۵۰ وات به مدت ۷ تا ۱۰ دقیقه مشاهده کردند. به‌طور مشابه، گوو و همکاران در سال ۲۰۲۲، کاهش ΔH در نشاسته سیب‌زمینی پس از تیمار پلاسمای DBD مشاهده کردند.

دلیل کاهش دمای ژلاتینه شدن و کاهش آنتالپی، به تیمار پلاسمای سرد که باعث دپلمیری شدن زنجیره‌های نشاسته می‌گردد، نسبت داده می‌شود. تفاوت‌های مشاهده‌شده در آنتالپی‌ها و دمای ژلاتینه شدن همگی بر اساس نوع تنظیمات پلاسمای مورد استفاده، زمان، گاز/گاز، قدرت و فشار به‌کاررفته برای اصلاح نشاسته است.

۵-۵- خواص خمیری شدن

یان و همکاران در سال ۲۰۲۰، مشاهده کردند که با افزایش شدت تیمار پلاسمای DBD ویسکوزیته حداکثر نشاسته موز از ۵۲۴۲ به ۱۵۳ سانتی پویز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش شدت تیمار پلاسمای DBD باعث کاهش در مقادیر

پارامترهای مهمی برای خواص خمیری شدن نشاسته هستند که به شاخص تورم، حلالیت، خواص کریستالی و اصطکاک بین چرخش بستگی دارد.

در نتیجه خواص خمیری شدن نشاسته اصلاح شده با پلاسما سرد به انواع نشاسته، انواع پلاسما، شرایط تیمار پلاسما و زمان واکنش بستگی دارد.

۵-۶- رئولوژی

اصلاح نشاسته‌ها با استفاده از سیستم‌های پلاسمایی با فشار اتمسفر ممکن است بسته به شرایط تیمار، ژل‌های قوی‌تر یا ضعیف‌تری ایجاد کند. گوو و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکتریک DBD باعث کاهش تمایل به رتروگراداسیون ژل‌های نشاسته سیب‌زمینی شد. از طرف دیگر محققان گزارش کردند که تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکتریک DBD باعث افزایش قابل توجهی در مدول ذخیره و مدول اتلاف G' و G'' می‌شود، آن‌ها این افزایش را به ایجاد اتصالات عرضی در مولکول‌های نشاسته ناشی از تیمار پلاسما نسبت دادند.

همچنین ونگساگونساپ و همکاران در سال ۲۰۱۴، از جت پلاسما با گاز تغذیه‌ای آرگون به‌عنوان جایگزینی برای اصلاحات شیمیایی نشاسته استفاده کردند. محققان گزارش کردند که قراردادن گرانول نشاسته تاپیوکا در تیمار پلاسمایی ۵۰ وات منجر به تشکیل ژل‌های قوی‌تر می‌شود. دلیل این افزایش را می‌توان به اتصال عرضی زنجیره‌های نشاسته‌ای نسبت داد. باین‌حال، تیمار پلاسمایی ۱۰۰ وات باعث تضعیف ساختار ژل به دلیل دپلمریزاسیون شد. از سوی دیگر بی و همکاران در سال ۲۰۱۶، کاهش ویسکوزیته نشاسته ذرت را پس از تیمار پلاسما تخلیه دی‌الکتریک مشاهده کردند. زوو و همکاران در سال ۲۰۰۴، دریافتند که گونه‌های فعال در پلاسما باعث ایجاد اتصال متقابل

سال ۲۰۲۲ نشان داد که تیمار پلاسما سرد باعث کاهش در ویسکوزیته حداکثر نشاسته‌ها می‌شود. هرچند، تیرومداس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۷، دریافتند که ویسکوزیته حداکثر نشاسته ذرت و تاپیوکا پس از تیمار پلاسما سرد افزایش یافته است. همچنین کاروالیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، گزارش کردند که با افزایش ولتاژ تولید پلاسما مقادیر ویسکوزیته حداکثر ظاهری PAV^۲ به صورت قابل توجهی افزایش یافت. دلیل این افزایش ممکن است به اتصال عرضی مولکول‌های آمیلوز/آمیلوپکتین مربوط باشد [۳۰]، چراکه اتصال عرضی زنجیره‌ها باعث کاهش تجزیه گرانول‌های نشاسته شده و ممکن است ویسکوزیته خمیر را افزایش دهد [۸۴]. نشاسته‌های با مقادیر ویسکوزیته حداکثر ظاهری پایین ممکن است آسیب ببینند و در دمای پایین متلاشی شوند و سطوح دکسترین یا درجه مقاومت بالایی داشته باشند. شکست ویسکوزیته^۳ (BD) پارامتر مهمی از خواص خمیر نشاسته است و به سفتی گرانول‌های متورم مربوط می‌شود [۸۵]. افزایش ولتاژ تولید پلاسما منجر به افزایش ویسکوزیته شکست (TAV)^۴ در مقایسه با نشاسته طبیعی (تیمار نشده) شد. در مقابل، مقادیر BD با افزایش ولتاژ تولید پلاسما کاهش یافت. اگرچه گزارش‌های دیگر در مورد کاربرد پلاسما سرد در نشاسته موز [۸۶] و آرد گندم [۸۷] نشان داده است که افزایش ولتاژ پلاسما مقادیر TAV را کاهش می‌دهد.

ویسکوزیته برگشت به عقب^۵ (SB) مربوط به ژلاتینه شدن و رتروگریداسیون نشاسته است [۷۱]. افزایش ولتاژ پلاسما سرد باعث افزایش مقادیر SB در نشاسته طبیعی شد. اگرچه، سطوح مختلف ولتاژ تولید پلاسما تغییری در شکست SB ایجاد نکرد. محتوای آمیلوز و آمیلوپکتین

1 -Thirumdas

2- Peak Apparent Viscosity

3 -Breakdown

4 -Trough Apparent Viscosity

5 -Setback

این زنجیره‌ها به راحتی در آب پراکنده می‌شود. علاوه بر این، تیمار پلاسمای سرد باعث تجزیه جزئی مولکول‌های نشاسته، ایجاد قطعات کوچک‌تر با قدرت تورم بالاتر و در نتیجه حلالیت بالاتر می‌شود [71]. از سویی دیگر مطالعات شایزن ساب و همکاران در سال ۲۰۲۲، نشان داد که تیمار پلاسمای سرد باعث آسیب در سطح گرانول‌های نشاسته می‌شود و ممکن است شسته شدن آمیلوز از ناحیه آمورف را افزایش داده و حلالیت نشاسته را بهبود بخشد.

قدرت تورم نشان‌دهنده برهمکنش بین زنجیره‌های نشاسته‌ای در حوزه‌های آمورف و کریستالی است. آمیلوز و آمیلوپکتین با زنجیره بلند اثر بسیار خوبی در جلوگیری از تورم گرانول‌های نشاسته دارند [۸۹]. ولی آمیلوز و آمیلوپکتین با زنجیره بلند در نمونه‌های که با پلاسمای سرد تیمار شدند کاهش یا به‌طور کلی ناپدید شد. این تغییرات منجر به افزایش نیروی انبساط نمونه می‌شود و در نتیجه تیمار پلاسمای سرد باعث افزایش ظرفیت تورم نشاسته شد. نتایج مشابهی توسط تیرومداس و همکاران در سال ۲۰۱۷، و بینیرا و همکاران در سال ۲۰۱۸، نیز گزارش شد.

قدرت تورم مربوط به هیدراتاسیون، برهمکنش بین مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین، پیوندهای درون‌مولکولی و ارتباط مناطق کریستالی نشاسته است. مطالعات شایزن سان و همکاران در سال ۲۰۲۲، نشان داد که قدرت تورم نمونه‌های نشاسته تیمار شده با پلاسمای سرد بیشتر از نشاسته طبیعی در دمای پایین‌تر (۵۰-۶۰ °C) بود، در حالی که قدرت تورم نشاسته طبیعی بیشتر از نمونه‌های نشاسته تیمار شده با پلاسمای سرد در دماهای (۹۰-۷۰ °C) بود. علاوه بر این، سینگ، ایسونو و نودا در سال ۲۰۱۰، دریافتند که نشاسته با درصد بلورینگی بالاتر قدرت تورم کمتری را نشان می‌دهد [۹۰].

زنجیره‌های جانبی می‌شوند که از شسته شدن گرانول‌های نشاسته به داخل محلول جلوگیری می‌کند [83]. از طرفی دیگر گائو و همکاران در سال ۲۰۲۲ دریافتند که هر دو مدول G' و G'' گندم سیاه تارتاری با افزایش مدت زمان و ولتاژ تیمار پلاسمای کاهش یافت. G' و G'' پایین نشان دهنده ساختار ضعیف ژل نشاسته ای است که در طی اصلاح با تیمار پلاسمای شکل گرفته است. چراکه افزایش ولتاژ تیمار و مدت زمان اعمال تیمار منجر به افزایش میانگین سرعت و تعداد برخوردها می‌شود که باعث افزایش میزان دپلمیریزاسیون مولکولی و تشکیل ساختار ژل ضعیف می‌گردد. همه این نتایج نشان داد که اثرات تیمار پلاسمای در هر دو G' و G'' به شرایط تیمار مانند ولتاژ پلاسمای و طول زمان بستگی دارد. شرایط مختلف تیمار نقش کلیدی در تعیین اینکه کدام یک از دو واکنش رقابتی (اتصال عرضی و دپلمیریزاسیون) غالب باشد، ایفا می‌کند که منجر به ایجاد نشاسته اصلاح‌شده توسط حریر می‌شود [۸۱].

۵-۷- حلالیت و قدرت تورم

حلالیت یک شاخص ضروری برای ارزش استفاده از نشاسته محلول در آب سرد است که نشان‌دهنده میزان انحلال و رسوب زنجیره‌های مولکولی است. شایزن جی^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که تیمار پلاسمای سرد انحلال نشاسته برنج را از ۳۲/۶۵ به ۵۱/۵۷٪ افزایش داد این افزایش نشان می‌دهد که پلاسمای سرد توانایی آب را برای نفوذ به گرانول‌های نشاسته افزایش می‌دهد. چراکه ساختار نیمه کریستالی قوی نشاسته طبیعی مانع از نفوذ آب سرد به‌طور کامل به گرانول‌های نشاسته می‌شود [۸۸]. همچنین شایزن جی و همکاران در سال ۲۰۲۲، مشاهده کردند که اعمال تیمار پلاسمای سرد بر روی نشاسته برنج باعث تشکیل آسان پیوند های هیدروژنی زنجیره‌های نشاسته در آب می‌شود و

1 -Xiangzhen Ge

عملکرد آسان و سازگار با محیط زیست است که می‌تواند نشاسته‌ای با ظرفیت جذب آب بالا و پایدار در طول فرایند حرارتی تولید کند. تغییرات در ویژگی‌های نشاسته به نوع گاز مورد استفاده برای تولید پلاسما، شرایط عملیاتی پلاسما (شامل قدرت، زمان و فشار) و منبعی که نشاسته از آن به دست می‌آید بستگی دارد. پیشنهاد می‌شود که تمرکز بر روش‌های اصلاح دوگانه (به‌عنوان مثال، ازن و فراصوت) برای تحقیقات بیشتر ضروری است.

۷- منابع

- [1] Hizukuri, S., Takeda, Y., Yasuda, M., and Suzuki, A. 1981. Multi-branched nature of amylose and the action of debranching enzymes. *J. Carbohydr. Res*, 94(2): 205-213.
- [2] Hizukuri, S., Kaneko, T., and Takeda, Y. 1983. Measurement of the chain length of amylopectin and its relevance to the origin of crystalline polymorphism of starch granules. *J. Biochim Biophys Acta Gen Subj*, 760(1): 188-191.
- [3] Pérez, S., and Bertoft, E. 2010. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *J. Starch-Stärke*, 62(8): 398-420.
- [4] Vamadevan, V., and Bertoft, E. 2015. Structure-function relationships of starch components. *J. Starch-Stärke*, 67(1-2): 55-68.
- [5] Mason, W. 2009. Starch Use in Foods. *J. Food Sci. Technol*, 20: 745-795.
- [6] Glittenberg, D. 2012. Starch-based biopolymers in paper, corrugating, and other industrial applications. *J. Polym. Sci: A Comprehensive Reference*, 10: 165-193.
- [7] Majzoobi, M., and Farahnaky, A. 2021. Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications, a review, *J. Food Hydrocoll*, 111: 106393.
- [8] Laovachirasuwan, P., Peerapattana, J., Srijesdaruk, V., Chitropas, P., and Otsuka, M. 2010. The physicochemical properties of a spray

۶- نتیجه گیری

- ثابت شده است که اصلاح نشاسته با استفاده از فناوری پلاسما سرد جایگزین جدیدی برای اصلاحات شیمیایی است. با استفاده از سیستم پلاسما سرد اتمسفری در مقایسه با سیستم‌های پلاسما سرد کم‌فشار، می‌توان نمونه را به‌طور پیوسته تیمار کرد، از طرفی این سیستم نیاز به تجهیزات گران‌قیمت خلأ ندارد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که پلاسما سرد یک فناوری اصلاح فیزیکی باران‌دمان بالا، dried glutinous rice starch biopolymer. *J. Colloids Surf. B*, 78(1): 30-35.
- [9] Ai, Y., and Jane, I. 2015. Gelatinization and rheological properties of starch. *J. Starch-Stärke*, 67(3-4): 213-224.
 - [10] Costa, K., Garcia, M.C., Ribeiro, K.O., Soares Junior, M.S., and Caliari, M. 2016. Rheological properties of fermented rice extract with probiotic bacteria and different concentrations of waxy maize starch. *J. LWT*, 72: 71-77.
 - [11] 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.
 - [12] Thirumdas, R., Kadam, D., and Annapure, U. 2017. Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *J. Food Biophys*, 12: 129-139.
 - [13] Neelam, K., Vijay, S., and Lalit, S. 2012. Various techniques for the modification of starch and the applications of its derivatives. *J. Int. Res. J. Pharm*, 3(5): 25-31.
 - [14] Nabeshima, E., and Grossmann, M. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. *J. Carbohydr. Polym*, 45(4): 347-353.
 - [15] BeMiller, J.N. 2018. Carbohydrate chemistry for food scientists. *J. Elsevier*.

- [16] Chen, L., Xiong, Z., Xiong, H., Wang, Z., Din, Z., Nawaz, A., Wang, P., and Hu, C. 2018. Effects of nano-TiO₂ on bonding performance, structure stability and film-forming properties of starch-g-VAc based wood adhesive. *J. Carbohydr. Polym.*, 200: 477-486.
- [17] Chaiwat, W., Wongsagonsup, 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.
- [18] Gu, Z., Chen, B., and Tian, Y. 2021. Highly branched corn starch: Preparation, encapsulation, and release of ascorbic acid. *J. Food Chem*, 343: 128485.
- [19] Chiu, C.W., and Solarek, D. 2009. Modification of starches, in *Starch. J. Food Sci. Technol*, 17: 629-655.
- [20] Hansen, M.R., Blennow, A., Pedersen, S., Nørgaard, L., and Engelsen, S.B. 2008. Gel texture and chain structure of amylopectin-modified starches compared to gelatin. *J. Food Hydrocoll*, 22(8): 1551-1566.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Han, Z., Zeng, X., Zhang, B., and Yu, S. 2009. Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch. *J. Food Eng*, 93(3): 318-323.
- [25] Luo, Z., Fu, X., He, X., Lou, 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Sujka, M., and Jamroz, J. 2013. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *J. Food Hydrocoll*, 31(2): 413-419.
- [29] Din, Z., Xiong, H., and Fei, P. 2017. Physical and chemical modification of starches: A review. *J. Crit Rev Food Sci Nutr*, 57(12): 2691-2705.
- [30] Zhu, F. 2017. Plasma modification of starch. *J. Food Chem*, 232: 476-486.
- [31] Daguinet, C. 1882. W. CROOKES.-On heat conduction in highly rarefied air (Conductibilité calorifique dans l'air fortement raréfié); *Nature*, 6 janvier 1881. *J. Phys. Theor. Appl*, 1(1): 53-54.
- [32] Misra, N.N., Tiwari, B.K., Raghavarao, K., and Cullen, P.J. 2011. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *J. Food Eng. Rev*, 3: 159-170.
- [33] Moreau, M., Orange, N., and Feuilleley, M. 2008. Non-thermal plasma technologies: new tools for bio-decontamination. *J. Biotechnol. Adv*, 26(6): 610-617.
- [34] Rossi, F., and Kylián, O. 2012. Sterilization and decontamination of surfaces by plasma discharges. *J. Woodhead Publ Ser Biomater*, 117-150.
- [35] Snoeckx, R., and Bogaerts, A. 2017. Plasma technology—a novel solution for CO₂

- conversion?. *J. Chem. Soc. Rev*, 46(19): 5805-5863.
- [36] Liao, X., Cullen, P.J., Muhammad, A.I., Jiang, Z., Ye, X., Liu, D., and Ding, T. 2020. Cold plasma-based hurdle interventions: new strategies for improving food safety. *J. Food Eng. Rev*, 12: 321-332.
- [37] De Iorio, I., Leone, C., Nele, L., and Tagliaferri, V. 1997. Plasma treatments of polymeric materials and Al alloy for adhesive bonding. *J. Mater. Process. Technol*, 68(2): 179-183.
- [38] Choudhury, A.R. 2017. Various ecofriendly finishes. *Principles of textile finishing*. J. Woodhead Publ, 467-525.
- [39] Thornhill, W. 2007. The Z-Pinch Morphology of Supernova 1987A and Electric Stars. *IEEE transactions on plasma science*, 35(4): 832-844.
- [40] Vaideki, K. 2016. Plasma technology for antimicrobial textiles. *J. Antimicrobial Textiles*, 73-86.
- [41] Thirumdas, A., Trimukhe, A., Deshmukh, R.R., Annature, U.S. 2017. Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *J. Carbohydr. Polym*, 157: 1723-1731.
- [42] Wilczek, S., Schulze, J., Brinkmann, R.P., Donko, Z., Trieschmann, J., and Mussenbrock, T. 2020. Electron dynamics in low pressure capacitively coupled radio frequency discharges. *J. Appl. Phys*, 127(18): 181101.
- [43] Braithwaite, N., and Chabert, P. 2011. *Physics of radio-frequency plasmas*. Cambridge University Press.
- [44] Laroque, D.A., Seo, S.T., Valencia, G.A., Laurindo, J.B., and Carciofi, A.M. 2022. Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *J. Food Eng*, 312: 110748.
- [45] Thomas, M., and Mittal, K.L. 2013. Atmospheric pressure plasma treatment of polymers: relevance to adhesion. John Wiley & Sons.
- [46] Yet-Pole, I., Liu, Y.C., Han, K.Y., and She, T.C. 2004. Construction of a low-pressure microwave plasma reactor and its application in the treatment of volatile organic compounds. *J. Environ. Sci. Technol*, 38(13): 3785-3791.
- [47] Weltmann, K.D., Kindel, E., Brandenburg, R., Meyer, C., Bussiahn, R., Wilke, C., and Von Woedtke, T. 2009. Atmospheric pressure plasma jet for medical therapy: plasma parameters and risk estimation. *J. Contrib. Plasma Phys*, 49.
- [48] Surowsky, B., Fröhling, A., Gottschalk, N., Schlüter, O., and Knorr, D. 2014. Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: Inactivation kinetics and mechanisms. *J. Int. J. Food Microbiol*, 174: 63-71.
- [49] Kovačević, D.B., Kljusurić, J.G., Putnik, P., Vukušić, T., Herceg, Z., and Dragović-Uzelac, V. 2016. Stability of polyphenols in chokeberry juice treated with gas phase plasma. *J. Food Chem*, 212: 323-331.
- [50] Iqdiem, B.M., Abuagela, M.O., Boz, Z., Marshall, S.M., Goodrich-Schneider, R., Sims, C.A., Marshall, R., MacIntosh, A.J., and Welt, B.A. 2020. Effects of atmospheric pressure plasma jet treatment on aflatoxin level, physiochemical quality, and sensory attributes of peanuts. *J. Food Process. Preserv*, 44(1): 14305.
- [51] Ekezie, F.G.C., Sun, D.W., and Cheng, J.H. 2017. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *J. Trends Food Sci Technol*, 69: 46-58.
- [52] Moiseev, T., Misra, N.N., Patil, S., Cullen, P.J., Bourke, P., Keener, K.M., and Mosnier, J.P. 2014. Post-discharge gas composition of a large-gap DBD in humid air by UV-Vis absorption spectroscopy. *J. PSST*, 23(6): 065033.
- [53] Brandenburg, R. 2017. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *J. PSST*, 26(5): 053001.

- [54] Turner, M. 2016. Chapter 2-Physics of Cold Plasma in Cold Plasma in Food and Agriculture (eds. Misra, NN, Schlüter, O. & Cullen, PJ), 17–51.
- [55] Kim, S.J., Chung, T.H., Bae, S.H., and Leem, S.H. 2009. Characterization of atmospheric pressure microplasma jet source and its application to bacterial inactivation. *J. Plasma Process Polym*, 6(10): 676-685.
- [56] Park, B.J., Lee, D.H., Park, J.C., Lee, IS., and Lee, K.Y. 2003. Sterilization using a microwave-induced argon plasma system at atmospheric pressure. *J. Plasma Phys*, 10(11): 4539-4544.
- [57] Aditya, S., Gnanasekaran, S., Stephen, J., and Radhakrishnan, M. 2020. Enhancing the properties of eggshell powder by cold plasma for improved calcium fortification in black coffee. *J. Food Process Eng*, 43(8): 13450.
- [58] Song, J., Jiang, B., Wu, Y., Chen, S., Li, S., Sun, H., and Li, X. 2019. Effects on surface and physicochemical properties of dielectric barrier discharge plasma-treated whey protein concentrate/wheat cross-linked starch composite film. *J. Food Sci*, 84(2): 268-275.
- [59] Mehr, H.M., and Koocheki, A. 2020. Effect of atmospheric cold plasma on structure, interfacial and emulsifying properties of Grass pea (*Lathyrus sativus* L.) protein isolate. *J. Food Hydrocoll*, 106: 105899.
- [60] Bu, F., Nayak, G., Bruggeman, P., Annor, G., and Ismail, B.P. 2022. Impact of plasma reactive species on the structure and functionality of pea protein isolate. *J. Food Chem*, 371: 131135.
- [61] Amini, M., and Ghoranneviss, M. 2016. Effects of cold plasma treatment on antioxidants activity, phenolic contents and shelf life of fresh and dried walnut (*Juglans regia* L.) cultivars during storage. *J.LWT*, 73: 178-184.
- [62] Charoux, C.M., Free, L., Hinds, L.M., Vijayaraghavan, R.K., Daniels, S., O'Donnell, C.P., and Tiwari, B.K. 2020. Effect of non-thermal plasma technology on microbial inactivation and total phenolic content of a model liquid food system and black pepper grains. *J. LWT*, 118: 108716.
- [63] Zehra, N., Ali, T.M., and Hasnain, A. 2020. Comparative study on citric acid modified instant starches (alcoholic alkaline treated (isolated from white sorghum and corn grains. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 150: 1331-1341.
- [64] Wrobel, A.M., Lamontagne, B., and Wertheimer, M.R. 1988. Large-area microwave and radiofrequency plasma etching of polymers. *J. Plasma Chem. Plasma Process*, 8: 315-329.
- [65] Warren, F.J., Gidley, M.J., and Flanagan, B.M. 2016. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. *J. Carbohydr. Polym*, 139: 35-42.
- [66] Bello-Perez, L.A., Ottenhof, M.A., Agamaacevedo, E., and Farhat, I.A. 2005. Effect of storage time on the retrogradation of banana starch extrudate. *J.Agric. Food Chem*, 53(4): 1081-1086.
- [67] Zhou, Y., Yan, Y., Shi, M., and Liu, Y. 2018. Effect of an atmospheric pressure plasma jet on the structure and physicochemical properties of waxy and normal maize starch. *J. Polymers*, 11(1): 8.
- [68] Shen, H., Ge, X., Zhang, Q., Zhang, X., Lu, Y., Jiang, H., Zhang, G., and Li, W. 2022. Dielectric barrier discharge plasma improved the fine structure, physicochemical properties and digestibility of α -amylase enzymatic wheat starch. *J. IFSET*, 78: 102991.
- [69] Yan, S.L., Chen, G.Y., Hou, Y.J., and Chen, Y. 2020. Improved solubility of banana starch by dielectric barrier discharge plasma treatment. *J. Int. J. Food Sci*, 55(2): 641-648.
- [70] Sun, X., Saleh, A.S.M., Sun, Z., Ge, X., Shen, Q., Zhang, Q., Yu, X., Yuan, L., and Li, W. 2022. Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments. *J. LWT*, 153: 112483.
- [71] Gao, S., Liu, H., Sun, L., Liu, N., Wang, J., Huang, Y., Wang, F., Cao, J., Fan, R., Zhang,

- X., and Wang, M. 2019. The effects of dielectric barrier discharge plasma on physicochemical and digestion properties of starch. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 138: 819-830.
- [72] Bie, P., Li, X., Xie, F., Chen, L., Zhang, B., and Li, L. 2016. Supramolecular structure and thermal behavior of cassava starch treated by oxygen and helium glow-plasmas. *J. IFSET*, 34: 336-343.
- [73] Srangsomjit, N., Bovornratanaraks, T., Chotineeranat, S., and Anuntagool, J. 2022. Solid-state modification of tapioca starch using atmospheric nonthermal dielectric barrier discharge argon and helium plasma. *J. Food Res. Int*, 162: 111961.
- [74] Zhang, B., Zhang, Q., Wu, H., Su, C., Ge, X., Shen, H., Han, L., Yu, X., and Li, W. 2021. The influence of repeated versus continuous dry-heating on the performance of wheat starch with different amylose content. *J. LWT*, 136: 110380.
- [75] Pankaj, S.K., Wan, Z., De Leon, J.E., Mosher, C., Colonna, w., and Keener, K.M. 2017. High-voltage atmospheric cold plasma treatment of different types of starch films. *J. Starch-Stärke*, 69(11-12): 1700009.
- [76] Ge, X., Shen, H., Su, C., Zhang, B., Zhang, Q., Jiang, H., and Li, W. 2021. The improving effects of cold plasma on multi-scale structure, physicochemical and digestive properties of dry heated red adzuki bean starch. *J. Food Chem*, 349: 129159.
- [77] Guo, Z., Gou, Q., Yang, L., Yu, Q.I., and Han, L. 2022. Dielectric barrier discharge plasma: A green method to change structure of potato starch and improve physicochemical properties of potato starch films. *J. Food Chem*, 370: 130992.
- [78] Yan, Y., Zhou, Y., Shi, M., Liu, H., and Liu, Y. 2019. Influence of atmospheric pressure plasma jet on the structure of microcrystalline starch with different relative crystallinity. *J. Int. J. Food Sci*, 54(2): 567-575.
- [79] Zhang, B., Chen, L., Li, X., Li, L., and Zhang, H. 2015. Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: A structure-functionality relationship. *J. Food Hydrocoll*, 50: 228-236.
- [80] Wongsagonsup, R., Deeyai, P., Chaiwat, W., Horrungsawat, S., Leejariensuk, K., Suphantharika, M., Fuongfuchat, A., Dangtip, S. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma. *J. Carbohydr. Polym*, 102: 790-798.
- [81] Gao, S., Zhang, H., Pei, J., Liu, H., Lu, M., Chen, J., and Wang, M. 2022. High-voltage and short-time dielectric barrier discharge plasma treatment affects structural and digestive properties of Tartary buckwheat starch. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 213: 268-278.
- [82] Vamadevan, V., Bertoft, E., and Seetharaman, K. 2013. On the importance of organization of glucan chains on thermal properties of starch. *J. Carbohydr. Polym*, 92(2): 1653-1659.
- [83] Zou, J.J., Liu, C.J., and Eliasson, B. 2004. Modification of starch by glow discharge plasma. *J. Carbohydr. Polym*, 55(1): 23-26.
- [84] Polnaya, F., Marseno, D.M., and Cahyanto, M. 2013. Effects of phosphorylation and cross-linking on the pasting properties and molecular structure of sago starch. *J. Int. Food Res*, 20(4): 1609-1615.
- [85] Juhász, R., and Salgó, A. 2008. Pasting behavior of amylose, amylopectin and their mixtures as determined by RVA curves and first derivatives. *J. Starch-Stärke*, 60(2): 70-78.
- [86] Wu, T.Y., Sun, N.N., and Chau, C.F. 2018. Application of corona electrical discharge plasma on modifying the physicochemical properties of banana starch indigenous to Taiwan. *J. JFDA*, 26(1): 244-251.
- [87] Chen, H.H. 2014. Investigation of properties of long-grain brown rice treated by low-pressure plasma. *J. Food Bioproc Tech*, 7: 2484-2491.
- [88] Kaveh, Z., Damirchi, S.A., Yousefi, G., and Hosseini, S.M.H. 2020. Effect of different alcoholic-alkaline treatments on physical and

mucoadhesive properties of tapioca starch. *J. Int. J. Biol. Macromol*, 153: 1005-1015.

[89] Wang, S., and Copeland, L. 2013. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: a review. *J. Food Funct*, 4(11): 1564-1580.

[90] 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.



Scientific Research

The significant effect of cold plasma on the modification of the characteristics of cereal starches

Mohammadkazem heydarian¹, Alireza Heydarian², seyed Ali Mortazavi^{3*}

1. Department of Food Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran .

2. Department of Food Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran .

3. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran .

ABSTRACT

Native starches have limited use in the food industry owing to their insolubility in cold water and lack of reactivity. Native starches are susceptible to chemical, physical, and enzymatic modification. This article examines cold plasma as one of the physical mechanisms of starch modification. The structure of each system is analyzed, and the effects of cold plasma at atmospheric pressure on the functional, thermal, molecular, morphological, and physicochemical aspects of various starches researched by different researchers are described. Changes in the characteristics of DBD plasma-modified starch are primarily caused by the depolymerization and cross-linking of amylose and amylopectin side chains. The molecular weight, viscosity, and gelatinization temperature decrease after DBD plasma treatment. The plasma etching of starch granules improves their surface energy and hydrophilicity. Cold plasma is an alternate approach for changing starch characteristics; it may be inferred.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2023/2/12

Accepted: 2023/4/5

Keywords:

Starch,
cold plasma,
modification,
depolymerization

DOI: 10.22034/FSCT.20.144.24

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.144.2.6

*Corresponding Author E-Mail:

morteza@um.ac.ir