

## مروری بر فرایند پلاسما به عنوان فرایندی نوین جهت فراوری نشاسته نگین بیات ماکو

دانشجوی دکتری مهندسی علوم و صنایع غذایی، گرایش فناوری مواد غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ممقان

### چکیده

پلاسمای سرد یک فناوری نوظهور غیرحرارتی در بخش فرآوری مواد غذایی است. در بررسی حاضر، گزارش‌های علمی اخیر در مورد خواص نشاسته‌های اصلاح‌شده توسط پلاسمای سرد را مورد بحث قرار خواهیم داد. این مقاله مکانیسم اصلاح نشاسته توسط گونه‌های فعال پلاسما را بررسی می‌کند و به‌طور خلاصه در مورد اثرات آن بر خواص نشاسته بحث می‌کند. اثر پلاسمای سرد بر روی نشاسته به نوع گاز مورد استفاده، ولتاژ اعمال‌شده و زمان بستگی دارد. تغییر در خواص نشاسته عمدتاً به دلیل پلیمریزاسیون و اتصال متقاطع زنجیره‌های جانبی آمیلوز و آمیلوپکتین است. پس از تیمار پلاسما، وزن مولکولی، ویسکوزیته و دمای ژلاتینه شدن کاهش می‌یابد. پلاسمای سرد سبب افزایش انرژی سطحی و آب‌دوستی مولکول‌های نشاسته می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پلاسمای سرد به‌عنوان فناوری جایگزین برای اصلاح خواص نشاسته روشی مفید خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** پلاسمای سرد، پلیمریزاسیون، غیرحرارتی، نشاسته

## مقدمه

نشاسته اولین ذخیره انرژی در گیاهان است و از دو پلی ساکارید آمیلوز و آمیلوپکتین تشکیل شده است. آمیلوز عمدتاً یک پلی ساکارید خطی است که از واحدهای D-(۱-۴)- $\alpha$ -گلوکوزیل با چند پیوند  $\alpha$ -(۱-۶) ساخته شده است (هیزوکوری و همکاران، ۱۹۸۱). با این حال، آمیلوپکتین یک پلیمر بسیار منشعب با زنجیره‌های خطی از واحدهای D-(۱-۴)- $\alpha$ -گلوکوزیل است که با پیوندهای  $\alpha$ -(۱-۶) به هم مرتبط هستند (Hizukuri, ۱۹۸۳). نشاسته را می‌توان از دانه‌ها، ریشه‌ها، غده‌ها، برگ‌ها، گرده‌ها و حتی جلبک‌ها استخراج کرد. مولکول‌های نشاسته در زیر میکروسکوپ به اشکال مختلف مانند بیضی، کره و بیضی ظاهر می‌شوند. قطر دانه‌های نشاسته بسته به منشأ گیاهی آن‌ها می‌تواند از ۰/۱ میکرومتر تا ۱۰۰ میکرومتر باشد (Pérez and Bertoft, ۲۰۱۰). منابع مهم نشاسته برای کاربردهای تجاری عبارت است از: ذرت، سیب‌زمینی، کاساوا و گندم (Vamadevan and Bertoft, ۲۰۱۵). جای تعجب نیست که ارزش بازار نشاسته صنعتی تا سال ۲۰۲۲ به ۱۰۶.۶۴ میلیارد دلار برسد (روهان، ۲۰۱۶)؛ زیرا نشاسته کاربردهای متعددی در صنایع غذایی و غیر غذایی دارد. نشاسته به عنوان یک عامل ژل کننده، غلیظ کننده، تثبیت کننده و کپسوله کننده طعم در صنایع پخت و شیرینی پزی استفاده می‌شود (Mason, ۲۰۰۹). کاربردهای غیر غذایی نشاسته شامل چسب‌ها برای ساخت تخته‌های کاغذ، ضد یخ و همچنین مواد اولیه تخمیر برای محصولات دارویی است (گلیتنبرگ، ۲۰۱۲). با این وجود، نشاسته در حالت طبیعی خود بسیار غیرفعال و در آب سرد نامحلول است؛ بنابراین، باید برای بهبود حلالیت، خواص بافتی و پایداری حرارتی برای کاربردهای صنعتی متنوع، نشاسته اصلاح شود (Laovachirasuwan, ۲۰۱۰). اصطلاح پلاسما توسط ایروینگ لانگمویر در دهه ۱۹۲۰ به عنوان چهارمین حالت ماده علاوه بر جامدات، مایعات و گازها معرفی شد. پیش از آن، در سال ۱۸۱۶، مایکل فارادی وجود چهارمین حالت ماده را که ماده تابشی نامیده بود، بیان کرد (Charoux, ۲۰۱۹). ویلیام کروکس وجود پلاسما را به عنوان ماده تابشی در لوله کرکس در سال ۱۸۷۹ اثبات کرد. پلاسما یک گاز یونیزه کامل یا جزئی است که از الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد، فوتون‌ها، اشعه ماوراءبنفش، گونه‌های واکنش‌پذیر و مولکول‌ها در حالت‌های پایه یا برانگیخته‌شان تشکیل شده و بار خنثی خالصی را حمل می‌کند (Pankaj et al., ۲۰۱۸). پلاسما می‌تواند طبیعی یا مصنوعی باشد از نمونه‌های پلاسمای طبیعی می‌توان به خورشید، رعدوبرق و شفق قطبی اشاره کرد. در مقابل، نمونه‌هایی از پلاسمای ساخته شده توسط انسان عبارت است از علائم نئون، چراغ‌های فلورسنت (Snoeckx and Bogaerts, ۲۰۱۷). پلاسما را می‌توان به دو گروه اصلی: پلاسما با دمای پایین به عنوان پلاسمای تعادلی غیرحرارتی و پلاسمای با درجه حرارت بالا پلاسمای تعادلی حرارتی تقسیم‌بندی کرد زیرا همه گونه‌های ذرات در تعادل دمای ترمودینامیک در یک دما وجود دارند (شکل ۱). پلاسمای دمای بالا با گرم شدن گاز تقریباً تا دمای ۱۹۷۲۶.۸۵ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود. پلاسمای دمای پایین به دو زیرمجموعه پلاسمای حرارتی یا گرم و پلاسمای غیرحرارتی یا سرد تقسیم می‌شود. پلاسمای گرم به عنوان پلاسمای تعادلی شناخته می‌شود و پلاسمای غیرحرارتی معروف به پلاسمای غیر تعادلی یا پلاسمای سرد به دلیل دمای پایین گاز است. گونه‌های ذرات پلاسمای حرارتی در حالت تعادل حرارتی محلی قرار دارند. همچنین پلاسمای سرد می‌تواند انواع مختلفی از فشارها از جمله پلاسمای سرد کم‌فشار (کمتر از ۱ پاسکال) پلاسمای فشار متوسط (۱۰۰ پاسکال) پلاسمای سرد فشار اتمسفر (۱۰۱۳۲۵ پاسکال) را ایجاد کند. پلاسمای سرد اتمسفر نقش اصلی را برای صنایع غذایی ایفا می‌کند. پلاسمای سرد برخلاف پلاسمای حرارتی که به ورودی توان بالاتری (حدود ۵۰ مگاوات) نیاز دارد، به توان ورودی بسیار کمتری نیاز دارد. پلاسماهای حرارتی در دماهای بالا ( $4000 \text{ K} \leq K$ ) و فشار ( $Pa \leq 10^5$ ) تولید می‌شوند (Moreau et al., ۲۰۰۸). پلاسماهای حرارتی گازهای کاملاً یونیزه شده هستند زیرا همه گونه‌ها (الکترون‌ها، یون‌ها، ذرات سنگین) دارای دمای یکسانی هستند. پلاسماهای حرارتی در تعادل ترمودینامیکی موضعی هستند (Snoeckx and Bogaerts, ۲۰۱۷). با این حال، دماهای بسیار بالا برای تیمار مواد حساس به حرارت مانند نشاسته مناسب نیستند، به همین دلیل است که پلاسمای سرد روش مناسب‌تری برای اصلاح نشاسته و سایر کاربردهای غذایی است (Liao et al., ۲۰۲۰).

## اصول کلی پلاسما

هنگامی که گاز در الکترون های آزاد، یون ها، پروتون ها، اتم ها و مولکول ها و رادیکال های آزاد فعال شود با تولید اشعه ماوراء بنفش و تشکیل درخشش پلاسما، یونیزه شده و می توان پلاسما را ایجاد کرد. درحالی که هوا برای ساختن گاز مورد استفاده قرار می گیرد، یک گروه قدرتمند رادیکال آزاد حاوی گونه های اکسیژن واکنش پذیر و گونه های نیتروژن واکنش پذیر تولید می شود، علاوه بر فوتون های ماوراء بنفش، یون های مثبت و منفی و الکترون های آزاد که باهم فرایند اکسیداسیون قوی روی چربی ها و پروتئین های غشای سلول را تقویت می کنند تولید می شوند (Liao et al. ۲۰۲۰). طبق پیش بینی جهانی - گزارش جهانی تا سال ۲۰۲۴ انتظار می رود اندازه بازار جهانی پلاسمای سرد تا ۱.۵۰۰ دلار از ۱.۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۹ به ۳.۱ میلیارد دلار برسد، درحالی که ۱۵.۶٪ CAGR در دوره پیش بینی بود (Okoyere, ۲۰۲۲). از فناوری پلاسمای سرد برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی و افزایش کیفیت ظاهر آن ها استفاده می شود و همچنین فناوری های فرآوری غیرحرارتی با غیرفعال سازی سلول های میکروبی، عملکرد ایمنی و حفظ مواد غذایی را انجام می دهند. تیمار با پلاسمای سرد بر خواص فیزیکی مواد غذایی غنی شده تأثیر مثبتی دارد. از پلاسمای سرد برای تیمار نودل های غنی شده با آرد انبه توسط ابیدین و همکاران استفاده شد. (۲۰۱۸). نودل های تیمار شده با پلاسمای سرد به دلیل افزایش استحکام گلوتن و بهبود بافت با تیمار پلاسما نسبت به نمونه های شاهد سخت تر و منسجم تر بودند. Akasapu (۲۰۲۰) از پلاسمای سرد برای تقویت نشاسته برنج با آهن استفاده کرد. نشاسته برنج در پلاسمای DBD در ۲۰ کیلوولت در زمان های مختلف تیمار شد. سپس برنج تیمار شده با پلاسمای سرد با سولفات آهن (آهن) غنی شد. پس از پخت، برنج تیمار شده با پلاسما قبل از غنی سازی، فراهمی زیستی آهن بیشتری نسبت به نمونه های برنج شاهد نشان داد. از پلاسمای سرد برای تیمار دانه های برنج قهوه ای استفاده شد (Park, ۲۰۱۷).

### خواص مولکولی

ثابت شده است که سیستم های پلاسمای کم فشار ابزار مؤثری در اصلاح خواص مولکولی نشاسته هستند. پلاسمای جفت شده خازنی درجه هیدرولیز نشاسته برنج را پس از تیمار ۶۰ وات به مدت ۱۰ دقیقه از ۹۱ درصد به ۸۷ درصد کاهش داد (Thirumdas et al. ۲۰۱۷). این کاهش به دلیل اتصال متقاطع زنجیره های نشاسته برنج و محدود کردن سرعت هیدرولیز آنزیمی بود. تجزیه و تحلیل تشدید مغناطیسی هسته ای (NMR) حالت جامد  $^{13}\text{C}$  نشاسته های مومی نشان داد که اصلاح با پلاسما منجر به افزایش واحدهای گلوکز در نزدیکی پیوندهای  $\alpha$ -(۱,۶) - گلیکوزیدی می شود (Okoyere et al. ۲۰۱۹)؛ بنابراین، تیمار پلاسما به طور مؤثر زنجیره نشاسته پلیمری را به واحدهای گلوکز تجزیه می کند. علاوه بر این، Zhang (۲۰۱۵) کاهش مارپیچ های منفرد و دوگانه را در نشاسته سیب زمینی اصلاح شده با پلاسما پس از تجزیه و تحلیل NMR در حالت جامد مشاهده کردند. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که تیمار با پلاسما باعث تبدیل بلورهای نشاسته به ساختارهای آمورف می شود. محتوای آمیلوز نشاسته کیتول پس از اصلاح پلاسما کاهش یافت که منجر به کاهش متعاقب ظرفیت اتصال ید این نشاسته ها شد (Sudheesh et al. ۲۰۱۹). هیدرولیز نشاسته به واحدهای گلوکز کوچک تر توانایی آن را برای اتصال با ید محدود می کند (Bailey and Whelan, ۱۹۶۱)؛ بنابراین، کاهش مشاهده شده در ظرفیت اتصال ید به دلیل تجزیه آمیلوز پلاسما به واحدهای گلوکز بود. Banura (۲۰۱۸) و Thirumdas (۲۰۱۷b) همچنین کاهش محتوای آمیلوز ذرت و نشاسته برنج را پس از اصلاح پلاسما گزارش کرد. شدت قله های ارتعاش خمشی H-O-H نشاسته کیتول پس از تیمار پلاسما کاهش یافت، همان طور که با تجزیه و تحلیل مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) نشان داد. نویسندگان گزارش کردند که سطوح بالاتر توان پلاسما و زمان های تیمار طولانی تر منجر به جدا شدن پیوندهای هیدروژنی در نشاسته می شود، بنابراین شدت پیک های ارتعاش خمشی H-O-H را کاهش می دهد (Okoyere et al. ۲۰۱۹). Sudheesh et al. (۲۰۲۲) توانایی یک پلاسمای فرکانس رادیویی را برای ایجاد پیوند متقابل در ذرت مومی غیر دانه ای و برنج و همچنین نشاسته های مومی دانه ای سیب زمینی و برنج همان طور که توسط تجزیه و تحلیل بازتاب کامل فروسرخ-تضعیف فوریه تبدیل فوریه (FTIR-ATR) نشان داده شده است، گزارش کرد. نویسندگان همچنین تغییرات جزئی را در واحد نشاسته مومی و ساختار زنجیره داخلی پس از اصلاح پلاسمای RF گزارش کردند. شکرالهی و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی اثر متغیرهای تیمار پلاسما شامل نوع گاز (هوا و آرگون) و زمان تیمار (۱، ۱۰ و ۲۰ دقیقه) بر شفافیت، حلالیت (در دماهای ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سانتی گراد)، تورم (در دماهای ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سانتی گراد) و مقاومت به انجماد-ذوب (در ۴ دوره متوالی) نشاسته سورگوم بررسی شد. نتایج نشان داد که پلاسمای هوا (در مقایسه با پلاسمای آرگون) و همچنین زمان های بیشتر تیمار (در مقایسه

بازمان کم)، در بهبود شفافیت، حلالیت و مقاومت به انجماد-ذوب (در دوره دوم تا چهارم) موفق تر عمل کردند. مقدار شفافیت، حلالیت (در ۸۵ درجه سانتی گراد)، تورم (در ۸۵ درجه سانتی گراد) و مقاومت به انجماد-ذوب (در دوره چهارم) در نشاسته تیمار نشده به ترتیب ۱۴/۰۲ درصد، ۱۶/۹۵ درصد، ۲۰/۶۶ گرم/گرم و ۵۶/۸۵ درصد بود که در نمونه هوا-۲۰ دقیقه به ۵۶/۱۰ درصد، ۷۰/۰۲ درصد، ۱۵/۶۷ گرم/گرم و ۴۹/۰۶ درصد و در نمونه آرگون-۲۰ دقیقه به ۱۷/۰۹ درصد، ۳۳/۴۷ درصد، ۲۳/۲۴ گرم/گرم، ۵۸/۳۰ درصد رسید. احتمالاً واکنش اصلی در پلاسمای هوا، اکسیداسیون و دپلمیریزاسیون بوده، اما در پلاسمای آرگون در زمان ۱ دقیقه، اغلب اتصال عرضی رخ داده و پس از آن با افزایش زمان، اثر اکسیداسیون و دپلمیریزاسیون بر اتصال عرضی غالب گردیده است.

### مورفولوژی گرانول

Okyere و همکارانش (۲۰۱۹) هیچ تأثیری بر شکل دانه‌های نشاسته ذرت، برنج و سیبزمینی پس از ۱۲۰ وات تیمار در پلاسما با فرکانس رادیویی (RF) به مدت ۶۰ دقیقه مشاهده نکردند. به طور مشابه، مورفولوژی نشاسته سیبزمینی پس از تیمار پلاسمای درخشان نیتروژن به مدت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه هنگامی که تحت یک میکروسکوپ نوری معمولی و پلاریزه مشاهده شد، تغییری نکرد (Zhang, ۲۰۱۵). از طرف دیگر رسوبات در نشاسته پس از تیمار پلاسما گزارش شده است. Banura و همکارانش (۲۰۱۸) وجود سطوح و رسوبات ناهموار بر روی دانه‌های نشاسته ذرت را پس از تیمار در پلاسمای RF جفت شده خازنی (۶۰ وات، ۲۰ دقیقه) گزارش کردند. این با گزارش‌های قبلی مطابقت دارد. (۲۰۰۲). نویسندگان پس از قرار گرفتن در معرض پلاسمای درخشان به مدت ۳۰ دقیقه، رسوبات روی نشاسته سیبزمینی و ذرت را مشاهده کردند. همچنین، شکاف یا حفره در نشاسته برنج پس از تیمار در پلاسمای RF جفت شده خازنی (۶۰ وات، ۱۰ دقیقه) مشاهده شد (Thirumdas et al. ۲۰۱۷b). سودهش و همکاران (۲۰۱۹) همچنین شکاف‌هایی را بر روی گرانول‌های نشاسته کیتول پس از اصلاح پلاسمای تخلیه درخشش کم فشار مشاهده کرد. به طور مشابه، شکاف‌هایی در نشاسته ذرت پس از تیمار پلاسمای هگزا متیل دی سیلوکسان RF-HDMSO) مشاهده شد (Sifuentes-Nieves et al. ۲۰۲۱).

### ژلاتینه شدن نشاسته

در طول آماده سازی خمیر، مولکول‌های پروتئین گلوتن هیدراته می شوند و برای ایجاد یک ساختار سه وجهی با هم واکنش می دهند بطوریکه بصورت غیر یکنواخت گرانول‌های نشاسته پراکنده می شوند که ویژگی‌های رئولوژیک خمیر را تعیین می کند. طی پخت نان گرانول‌های نشاسته مستعد تورم و ژلاتینه شدن هستند. شرایطی که در آن این حوادث روی می دهند، تعیین کننده کیفیت نهایی محصولات غذایی هستند. در مقالات علمی از افزودنی‌ها و عناصر مختلفی جهت تغییر فرایند ژلاتینه شدن- ژله ای شدن استفاده می شود که ویژگیهای خمیری شدن نشاسته نام دارند. قندهای اضافه شده به مخلوط نشاسته دمای ژلاتینه شدن و ویسکوزیته خمیر را بوسیله کاهش آب موجود، افزایش می دهد. افزودن نمک باعث بهبود انسجام گرانول‌های نشاسته و افزایش قوام خمیر می شود. نمک‌ها همچنین موجب تأخیر در بازگشت به عقب نشاسته می شود (Sikora, ۲۰۱۰). هنگامی که نشاسته در آب گرم می شود، نظم مولکولی داخل گرانول‌ها مختل می شود. این منجر به تورم گرانول‌ها، از دست دادن و ذوب ساختار هاو بهبود ویسکوزیته و انحلال می شود (Jane, ۱۹۹۹). وقوع این پدیده را ژلاتینه شدن نشاسته می نامند. پژوهشگران از کالری سنج اسکن تفاضلی (DSC) برای مطالعه رفتارهای ژلاتینه شدن نشاسته پس از اصلاح پلاسمای سرد استفاده کرده اند. Zhang و همکاران (۲۰۱۵) کاهش دماهای ژلاتینه شدن و آنتالپی ژلاتینه شدن ( $\Delta H$ ) سیبزمینی را پس از اصلاح پلاسمای نیتروژن و هلیوم مشاهده کردند. بی و همکاران (۲۰۱۶) همچنین کاهش  $\Delta H$  نشاسته کاساوا را پس از اصلاح پلاسمای اکسیژن و هلیوم گزارش کرد. علاوه بر این، نویسندگان پلاسمای درخشان اکسیژن را به عنوان عاملی مؤثرتر در تغییر خواص حرارتی نشاسته کاساوا پیشنهاد کردند. به طور مشابه، Thirumdas (۲۰۱۷a) کاهش حرارتی را پس از اصلاح برنج با استفاده از پلاسمای RF (۶۰ وات، ۱۰ دقیقه) گزارش کرد. Banura و همکارانش (۲۰۱۸) کاهش آنتالپی ( $\Delta H$ ) نشاسته ذرت را پس از اصلاح پلاسمای RF گزارش کردند.

### خواص رئولوژیکی

نشاسته در طول فرآوری در معرض دماهای بالا و برش های متفاوتی قرار می گیرد. از این رو، اندازه گیری خواص رئولوژیکی برای درک کامل تغییر شکل و رفتار جریان نشاسته ضروری است (لی و همکاران، ۲۰۰۲). اعمال تیمار پلاسما در حدود ۶۰ وات در زمان های ۵ و

۱۵ دقیقه توانایی نشاسته کیتول را برای تشکیل ژل های قوی کاهش می دهد، همانطور که با کاهش میزان مدول ذخیره و مدول اتلاف نشان داده می شود (Sudheesh et al. ۲۰۱۹). به طور مشابه، Thirumdas و همکارانش (۲۰۱۷b) کاهش G' و G'' در نشاسته برنج را پس از تیمار پلاسما گزارش کردند؛ بنابراین می توان استنباط کرد که اصلاح پلاسما باعث تخریب مولکولی می شود که شروع رتروگراسیون را کاهش می دهد و در نتیجه نشاسته هایی ایجاد می کنند که ژل های نرم تری را تشکیل می دهند. اصلاح نشاسته ها با استفاده از سیستم های پلاسمایی با فشار اتمسفر ممکن است بسته به شرایط تیمار، ژل های قوی تر یا ضعیف تر ایجاد کند. گو و همکاران (۲۰۲۲) کاهش تمایل به رتروگراسیون ژل های نشاسته سیب زمینی را پس از تیمار با پلاسمای DBD مشاهده کردند. همچنین، نویسندگان افزایش قابل توجهی در G' و G'' را گزارش کردند. آنها این افزایش را به ایجاد پیوند متقابل در مولکول های نشاسته ناشی از تیمار پلاسما نسبت دادند. همچنین Wongsagonsup و همکاران. (۲۰۱۴) از APPJ با آرگون به عنوان جایگزینی برای اصلاحات شیمیایی نشاسته استفاده کرد. نویسندگان گزارش کردند که قرار دادن نشاسته تاپوکای دانه ای در تیمار پلاسمایی ۵۰ وات منجر به تشکیل ژل های قوی تر می شود. این را می توان به اتصال عرضی زنجیره های نشاسته ای نسبت داد. با این حال، افزایش شدت تیمار به ۱۰۰ وات، ساختار ژل را به دلیل پلیمریزاسیون ضعیف کرد. علاوه بر این، Bie (۲۰۱۶b) کاهش ویسکوزیته نشاسته ذرت را پس از تیمار پلاسما مشاهده کردند. گونه های فعال در پلاسما باعث ایجاد اتصال متقابل زنجیره های جانبی می شوند که از شسته شدن دانه های نشاسته به داخل محلول جلوگیری می کند (Zou et al. ۲۰۰۴).

#### مقیاس صنعتی فناوری پلاسمای سرد برای اصلاح نشاسته

ثابت شده است که سیستم های پلاسما با فشار کم و اتمسفری ابزارهای موثری در اصلاح خواص نشاسته هستند. توانایی آنها در اصلاح نشاسته به شرایط تصفیه پلاسما (قدرت، زمان، گاز/فشار، رطوبت، رطوبت) و منشا گیاهی نشاسته بستگی دارد. نشان داده شده است که محدوده فشار ۱ تا ۲۰۰۰ پاسکال به طور موثر باعث ایجاد تغییرات در ساختار و عملکرد نشاسته می شود. زمان تیمار از ۲ تا ۶۰ دقیقه می تواند تغییرات عملکردی و شیمیایی مناسبی را در ساختار نشاسته ایجاد کند. گازهای نجیب مانند آرگون و هلیوم سریعتر از اکسیژن، دی اکسید کربن و هوا یونیزه می شوند. از این رو، آنها به ورودی انرژی بسیار کمتری نیاز دارند (Thirumdas et al. ۲۰۱۷a; Zhu, ۲۰۱۷). با این حال، به دلیل ناتوانی آن ها در تولید گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن، می توان از ترکیب یک گاز نجیب و دی اکسید کربن بهره برد که ممکن است منجر به اصلاح نشاسته با مصرف انرژی کمتر شود. علاوه بر این، ترکیب پلاسمای سرد با سایر روش های فیزیکی اصلاح نشاسته (Sun et al. ۲۰۲۲) یا روش های آنزیمی اصلاح نشاسته (Ge et al. ۲۰۲۱b) نیز می تواند به طور موثر خواص نشاسته را تغییر دهد. تایید نشاسته های پلاسمای سرد برای دستیابی به وضعیت GRAS توسط FDA به تحقیقات علمی کافی در مورد ایمنی آن نیاز دارد و در میان کارشناسان علمی اتفاق نظر وجود دارد که اطلاعات ارائه شده در پژوهش ها دارای اعتبار کافی برای ایمن دانستن آن است. مطالعات تطبیقی که بهترین شرایط اصلاح را برای نشاسته های گیاهی مختلف بهینه می کنند، به طور ایده آل مقیاس صنعتی این فناوری سبز را تسریع می کنند. پلاسمای سرد با موفقیت در صنایع پزشکی (ترمیم زخم، درمان سرطان)، نساجی (تمام کردن، چاپ)، الکترونیک و صنایع نیمه هادی (پوشش و اچینگ) استفاده می شود پس می توان از آن در صنایع غذایی نیز بهره برد.

#### نتیجه گیری

اهمیت اصلاح نشاسته با استفاده از فناوری پلاسمای سرد که شامل آب فعال شده با پلاسما است، جایگزینی نوظهور برای اصلاحات شیمیایی ثابت شده است. سیستم های پلاسمای اتمسفر دارای انعطاف پذیری خوبی برای عملیات مداوم و تولید PAW هستند. هر دو سیستم پلاسمایی با فشار کم و فشار اتمسفر نشاسته های متقاطع تولید می کنند که در برابر هضم مقاوم هستند. علاوه بر این، نشاسته های اصلاح شده با پلاسمای سرد، ظرفیت جذب آب خوبی دارند و در طول پردازش حرارتی پایداری بیشتری هستند. تغییرات در خواص نشاسته به نوع گاز مورد استفاده برای تولید پلاسما، شرایط عملیاتی پلاسما (شامل قدرت، زمان، فشار) و منبعی که نشاسته از آن به دست می آید بستگی دارد. نتیجه گرفته می شود که پلاسمای سرد را می توان برای کاربردهای تجاری اصلاحات نشاسته، تکمیل و مقیاس بندی کرد. سیستم های پلاسما در فشار اتمسفر ممکن است برای افزایش مقیاس مقرون به صرفه تر باشند، زیرا به سیستم خلاء گران قیمت

نیاز ندارند و انعطاف پذیری را برای عملیات مداوم ارائه می دهند.

## منابع

شکرالهی گاوزن، شهیدی، فخری، وریدی، کوچکی، فرشاد صحبت زاده لنبر. (۲۰۲۱). اثر پلاسمای غیرحرارتی بر بهبود ویژگی های عملکردی نشاسته سورگوم. پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران.

Abidin N. Rukunudin I. Zaaba S. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment a new technique to improve microstructure and textural properties of healthy noodles fortified with mango flour. J. Telecommun. Electron. Comput. Eng. ۲۰۱۸;۱۰

Abou-Ghazala A. Katsuki S. Schoenbach K.H. Dobbs F.C. Moreira K.R. Bacterial decontamination of water by means of pulsed-corona discharges. IEEE Trans. Plasma Sci. ۲۰۰۲; ۳۰:۱۴۴۹-۱۴۵۳. doi: ۱۰.۱۱۰۹/TPS.۲۰۰۲.۸۰۴۱۹۳. - DOI

Abuzairi T. Ramadhanty S. Puspohadiningrum D.F. Ratnasari A. Poespawati N.R. Purnamaningsih R.W. Presented at the 2nd Biomedical Engineering's Recent Progress in Biomaterials, Drugs Development, and Medical Devices: Proceedings of the International Symposium of Biomedical Engineering (ISBE) ۲۰۱۷. ۲۰۱۸. Investigation on physicochemical properties of plasma-activated water for the application of medical device sterilization; p. ۴۰۰۱۷. Bali, Indonesia. - DOI

Adhikari B. Adhikari M. Ghimire B. Park G. Choi E.H. Cold atmospheric plasma-activated water irrigation induces defense hormone and gene expression in tomato seedlings. Sci. Rep. ۲۰۱۹;۹:۱۶۰۸۰. doi: ۱۰.۱۰۳۸/s۴۱۵۹۸-۰۱۹-۰۲۶۴۶-Z. - DOI - PMC - PubMed

Aditya S. Gnanasekaran S. Stephen J. Radhakrishnan M. Enhancing the properties of eggshell powder by cold plasma for improved calcium fortification in black coffee. J. Food Process. Eng. ۲۰۲۰;۴۳ doi: ۱۰.۱۱۱۱/jfpe.۱۳۴۵۰. - DOI

Akasapu K. Ojah N. Gupta A.K. Choudhury A.J. Mishra P. An innovative approach for iron fortification of rice using cold plasma. Food Res. Int. ۲۰۲۰; ۱۳۶:۱۰۹۵۹۹. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodres.۲۰۲۰.۱۰۹۵۹۹. - DOI - PubMed

Alimi B.A. Workneh T.S. Structural and physicochemical properties of heat moisture treated and citric acid modified acha and iburu starches. Food Hydrocolloids. ۲۰۱۸; ۸۱:۴۴۹-۴۵۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۱۸.۰۳.۰۲۷. - DOI

Amini M. Ghoranneviss M. Effects of cold plasma treatment on antioxidants activity, phenolic contents and shelf life of fresh and dried walnut (*Juglans regia* L.) cultivars during storage. Lebensm. Wiss. Technol. ۲۰۱۶; ۷۳:۱۷۸-۱۸۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۱۶.۰۶.۰۱۴. - DOI

Andrade C.T. Simão R.A. Thiré R.M.S.M. Achete C.A. Surface modification of maize starch films by low-pressure glow ۱-butene plasma. Carbohydr. Polym. ۲۰۰۵; ۶۱:۴۰۷-۴۱۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۰۵.۰۵.۰۰۱. - DOI

I Y.P. Liu Y.C. Han K.Y. She T.C. Construction of a low-pressure microwave plasma reactor and its application in the treatment of volatile organic compounds. Environ. Sci. Technol. ۲۰۰۴; ۳۸:۳۷۸۵-۳۷۹۱. doi: ۱۰.۱۰۲۱/es.۳۴۶۹۷a. - DOI - PubMed

Bailey J.M. Whelan W.J. Physical properties of starch. J. Biol. Chem. ۱۹۶۱; ۲۳۶:۹۶۹-۹۷۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۰۲۱-۹۲۵۸(۱۸)۶۴۲۶-۷. - DOI - PubMed

Banura S. Thirumdas R. Kaur A. Deshmukh R.R. Annapure U.S. Modification of starch using low pressure radio frequency air plasma. Lebensm. Wiss. Technol. ۲۰۱۸; ۸۹:۷۱۹-۷۲۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۱۷.۱۱.۰۵۶. - DOI

Bello-Pérez L.A. Ottenhof M.A. Agama-Acevedo E. Farhat I.A. Effect of storage time on the retrogradation of banana starch extrudate. J. Agric. Food Chem. ۲۰۰۵; ۵۳:۱۰۸۱-۱۰۸۶. doi: ۱۰.۱۰۲۱/jf.۴۸۸۵۸۱. - DOI - PubMed

Bemiller J.N. Starch modification: challenges and prospects. Starch - Stärke. ۱۹۹۷;۴۹(۴):۱۲۷-۱۳۱. doi: ۱۰.۱۰۰۲/star.۱۹۹۷.۰۴۹.۰۴۰۲. - DOI

Bie P. Li X. Xie F. Chen L. Zhang B. Li L. Supramolecular structure and thermal behavior of cassava starch treated by oxygen and helium glow-plasmas. Innovat. Food Sci. Emerg. Technol. ۲۰۱۶; ۳۴:۳۳۶-۳۴۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ifset.۲۰۱۶.۰۳.۰۰۵. - DOI

Bie P. Pu H. Zhang B. Su J. Chen L. Li X. Structural characteristics and rheological properties of plasma-treated starch ۱۰. Innovat. Food Sci. Emerg. Technol. ۲۰۱۶; ۳۴:۱۹۶-۲۰۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ifset.۲۰۱۶.۰۳.۰۰۵. - DOI

Brandenburg R. Corrigendum: dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments ۲۰۱۷ Plasma Sources Sci. Technol. ۲۶ ۰۵۳۰۰۱. Plasma Sources Sci. Technol. ۲۰۱۸;۲۷ doi: ۱۰.۱۰۸۸/۱۳۶۱-۶۵۹۵/aaced۹. - DOI

Bu F. Nayak G. Bruggeman P. Annor G. Ismail B.P. Impact of plasma reactive species on the structure and functionality of pea protein isolate. Food Chem. ۲۰۲۲; ۳۷۱:۱۳۱۱۳۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۲۱.۱۳۱۱۳۵. - DOI - PubMed

Buléon A. Gérard C. Riekel C. Vuong R. Chanzy H. Details of the crystalline ultrastructure of C-starch granules revealed by synchrotron microfocus mapping. Macromolecules. ۱۹۹۸; ۳۱:۶۶۰۵-۶۶۱۰.

Bursać Kovačević D. Gajdoš Kljusurić J. Putnik P. Vukušić T. Herceg Z. Dragović-Uzelac V. Stability of polyphenols in chokeberry juice treated with gas phase plasma. Food Chem. ۲۰۱۶; ۲۱۲:۲۲۳-۲۳۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۶.۰۵.۱۹۲. - DOI - PubMed



- Bursać Kovačević D. Putnik P. Dragović-Uzelac V. Pedisić S. Režek Jambrak A. Herceg Z. Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice. *Food Chem.* ۲۰۱۶; ۱۹۰:۳۱۷–۳۲۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۵.۰۵.۰۹۹. - DOI - PubMed
- Carvalho A.P.M.G. Barros D.R. da Silva L.S. Sanches E.A. Pinto C.da, de Souza S.M. Clerici M.T. Rodrigues S. Fernandes F.A.N. Campelo P.H. Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied to the modification of Ariá (*Goeppertia allouia*) starch: effect of plasma generation voltage. *Int. J. Biol. Macromol.* ۲۰۲۱; ۱۸۲:۱۶۱۸–۱۶۲۷. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijbiomac.۲۰۲۱.۰۵.۱۶۵. - DOI - PubMed
- Chaiwat W. Wongsagonsup R. Tangpanichyanon N. Jariyaporn T. Deeyai P. Supphantharika M. Fuongfuchat A. Nisoa M. Dangtip S. Argon plasma treatment of tapioca starch using a semi-continuous downer reactor. *Food Bioprocess Technol.* ۲۰۱۶; ۹:۱۱۲۵–۱۱۳۴. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۹۴۷-۰۱۶-۱۷۰۱-۶. - DOI
- Charoux Clémentine M.G. Free L. Hinds L.M. Vijayaraghavan R.K. Daniels S. O'Donnell C.P. Tiwari B.K. Effect of non-thermal plasma technology on microbial inactivation and total phenolic content of a model liquid food system and black pepper grains. *Lebensm. Wiss. Technol.* ۲۰۲۰; ۱۱۸:۱۰۸۷۱۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۱۹.۱۰۸۷۱۶. - DOI
- Chizoba Ekezie F.G. Sun D.W. Cheng J.H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: current applications and future trends. *Trends Food Sci. Technol.* ۲۰۱۷; ۶۹:۴۶–۵۸. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.tifs.۲۰۱۷.۰۸.۰۰۷. - DOI
- Crookes W. UK on Friday; Sheffield: ۱۸۷۹. On Radiant Matter. A Lecture to the British Association for the Advancement of Science. ۲۲nd August ۱۸۷۹.
- Crookes W. James W. Queen & Co; Philadelphia, PA: ۱۸۸۱. Radiant Matter: a Resume of the Principal Lectures and Papers of Prof. William Crookes, on the 'fourth State of Matter'.
- Dai Y. van Spronsen J. Witkamp G.J. Verpoorte R. Choi Y.H. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim.* ۲۰۱۳ - PubMed
- Dasan B.G. Boyaci I.H. Mutlu M. Nonthermal plasma treatment of *Aspergillus* spp. spores on hazelnuts in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system: impact of process parameters and surveillance of the residual viability of spores. *J. Food Eng.* ۲۰۱۷; ۱۹۶:۱۳۹–۱۴۹. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jfoodeng.۲۰۱۶.۰۹.۰۲۸. - DOI
- De Albuquerque M.D.F. Bastos D.C. Simão R.A. Surface modification of starch films by plasma. *Macromol. Symp.* ۲۰۱۴; ۳۴۳:۹۶–۱۰۱. doi: ۱۰.۱۰۰۲/masy.۲۰۱۳.۰۱۹۹. - DOI
- Deeyai P. Supphantharika M. Wongsagonsup R. Dangtip S. Characterization of modified tapioca starch in atmospheric argon plasma under diverse humidity by FTIR spectroscopy. *Chin. Phys. Lett.* ۲۰۱۲; ۳۰ doi: ۱۰.۱۰۸۸/۰۲۵۶-۳۰۷۸/۳۰/۱۰۱۸۱۰۳. - DOI
- Ebnasajjad S. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding. Elsevier; ۲۰۱۴. Plasma treatment of polymeric materials; pp. ۲۲۷–۲۶۹. - DOI
- Elez Garofulić I. Režek Jambrak A. Milošević S. Dragović-Uzelac V. Zorić Z. Herceg Z. The effect of gas phase plasma treatment on the anthocyanin and phenolic acid content of sour cherry Marasca (*Prunus cerasus* var. Marasca) juice. *Healthy Snacks Recent Trends Innov. Dev. Meet Curr. Needs.* ۲۰۱۵; ۶۲:۸۹۴–۹۰۰. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۱۴.۰۸.۰۳۶. - DOI
- Gao S. Liu H. Sun L. Liu N. Wang J. Huang Y. Wang F. Cao J. Fan R. Zhang X. Wang M. The effects of dielectric barrier discharge plasma on physicochemical and digestion properties of starch. *Int. J. Biol. Macromol.* ۲۰۱۹; ۱۲۸:۸۱۹–۸۳۰. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijbiomac.۲۰۱۹.۰۷.۱۴۷. - DOI - PubMed
- Ge X. Shen H. Su C. Zhang B. Zhang Q. Jiang H. Yuan L. Yu X. Li W. Pullulanase modification of granular sweet potato starch: assistant effect of dielectric barrier discharge plasma on multi-scale structure, physicochemical properties. *Carbohydr. Polym.* ۲۰۲۱; ۲۷۲:۱۱۸۴۸۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۲۱.۱۱۸۴۸۱. - DOI - PubMed
- Glittenberg D. Polymer Science: A Comprehensive Reference. Elsevier; ۲۰۱۲. Starch-based biopolymers in paper, corrugating, and other industrial applications; pp. ۱۶۵–۱۹۳. - DOI
- Go S.M. Park M.R. Kim H.S. Choi W.S. Jeong R.D. Antifungal effect of non-thermal atmospheric plasma and its application for control of postharvest *Fusarium oxysporum* decay of paprika. *Food Control.* ۲۰۱۹; ۹۸:۲۴۵–۲۵۲. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodcont.۲۰۱۸.۱۱.۰۲۸. - DOI
- Grzegorzewski F. Ehlbeck J. Schlüter O. Kroh L.W. Rohn S. Treating lamb's lettuce with a cold plasma – influence of atmospheric pressure Ar plasma immanent species on the phenolic profile of *Valerianella locusta*. *LWT - Food Sci. Technol. (Lebensmittel-Wissenschaft -Technol.)* ۲۰۱۱; ۴۴:۲۲۸۵–۲۲۸۹. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۱۱.۰۵.۰۰۴. - DOI
- Hizukuri S. Takeda Y. Yasuda M. Suzuki A. Multi-branched nature of amylose and the action of debranching enzymes. *Carbohydr. Res.* ۱۹۸۱; ۹۴:۲۰۵–۲۱۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۰۰۸-۶۲۱۵(۰۰)۸۰۷۱۸-۱. - DOI
- Hizukuri S. Kaneko T. Takeda Y. Measurement of the chain length of amylopectin and its relevance to the origin of crystalline polymorphism of starch granules. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Gen. Subj.* ۱۹۸۳; ۷۶۰:۱۸۸–۱۹۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/۰۳۰۴-۴۱۶۵(۸۳)۹۰۱۴۲-۳. - DOI
- Hong Y. Liu X. In: Physical Modifications of Starch. Sui Z, Kong X, editors. Springer; Singapore: ۲۰۱۸. Pre-gelatinized modification of starch.

- Imberty A, Pérez S. Conformational analysis and molecular modelling of the branching point of amylopectin. *Int. J. Biol. Macromol.* ۱۹۸۹; ۱۱:۱۷۷-۱۸۵. - PubMed
- Iqdiam B.M, Abuagela M.O, Boz Z, Marshall S.M, Goodrich-Schneider R, Sims C.A, Marshall M.R, MacIntosh A.J, Welt B.A. Effects of atmospheric pressure plasma jet treatment on aflatoxin level, physiochemical quality, and sensory attributes of peanuts. *J. Food Process. Preserv.* ۲۰۲۰; ۴۴ doi: ۱۰.۱۱۱۱/jfpp.۱۴۳۰۵. - DOI
- Jane J, Chen Y.Y, Lee L.F, McPherson A.E, Wong K.S, Radosavljevic M, Kasemsuwan T. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chem. J.* ۱۹۹۹; ۷۶:۶۲۹-۶۳۷. doi: ۱۰.۱۰۹۴/CCHEM.۱۹۹۹.۷۶.۵.۶۲۹. - DOI
- Kalaivendan R.G.T, Mishra A, Eazhumalai G, Annature U.S. Effect of atmospheric pressure non-thermal pin to plate plasma on the functional, rheological, thermal, and morphological properties of mango seed kernel starch. *Int. J. Biol. Macromol.* ۲۰۲۲; ۱۹۶:۶۳-۷۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijbiomac.۲۰۲۱.۱۲.۰۱۳. - DOI - PubMed
- Kaur A, Singh N, Ezekiel R, Guraya H.S. Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from different potato cultivars grown at different locations. *Food Chem.* ۲۰۰۷; ۱۰۱:۶۴۳-۶۵۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۰۶.۰۱.۰۵۴. - DOI
- Kim S.J, Chung T.H, Bae S.H, Leem S.H. Characterization of atmospheric pressure microplasma jet source and its application to bacterial inactivation. *Plasma Process. Polym.* ۲۰۰۹; ۶:۶۷۶-۶۸۵.
- Korachi M, Gurol C, Aslan N. Atmospheric plasma discharge sterilization effects on whole cell fatty acid profiles of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *J. Electrostat.* ۲۰۱۰; ۶۸:۵۰۸-۵۱۲. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.elstat.۲۰۱۰.۰۶.۰۱۴. - DOI
- Laovachirasuwan P, Peerapattana J, Srijesdaruk V, Chitropas P, Otsuka M. The physicochemical properties of a spray dried glutinous rice starch biopolymer. *Colloids Surf. B Biointerfaces.* ۲۰۱۰; ۷۸:۳۰-۳۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.colsurfb.۲۰۱۰.۰۲.۰۰۴. - DOI - PubMed
- Laroque D.A, Seó S.T, Valencia G.A, Laurindo J.B, Carciofi B.A.M. Cold plasma in food processing: design, mechanisms, and application. *J. Food Eng.* ۲۰۲۲; ۳۱۲:۱۱۰۷۴۸. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jfoodeng.۲۰۲۱.۱۱۰۷۴۸. - DOI
- Lee H-C. Review of inductively coupled plasmas: nano-applications and bistable hysteresis physics. *Appl. Phys. Rev.* ۲۰۱۸; ۵ doi: ۱۰.۱۰۶۳/۱.۵۰۱۲.۰۱. - DOI
- Liao X, Cullen P.J, Muhammad A.I, Jiang Z, Ye X, Liu D, Ding T. Cold plasma-based hurdle interventions: new strategies for improving food safety. *Food Eng. Rev.* ۲۰۲۰; ۱۲:۳۲۱-۳۳۲. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۲۹۳-۰۲۰-۰۹۲۲۲-۳. - DOI
- Lii C, Liao C, Stobinski L, Tomasik P. Exposure of granular starches to low-pressure glow ethylene plasma. *Eur. Polym. J.* ۲۰۰۲; ۳۸:۱۶۰۱-۱۶۰۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۱۴۳-۰۵۷(۰۲)۰۰۲۲-۸. - DOI
- Lin C-M, Hsiao C-P, Lin H-S, Liou J.S, Hsieh C-W, Wu J-S, Hou C.Y. The antibacterial efficacy and mechanism of plasma-activated water against *Salmonella enteritidis* (ATCC ۱۳۰۷۶) on shell eggs. *Foods.* ۲۰۲۰; ۹:۱۴۹۱. doi: ۱۰.۳۳۹۰/foods۹۱۰۱۴۹۱. - DOI - PMC - PubMed
- Lippens P. In: *Plasma Technologies for Textiles*. Europlasma N.V, Belgium Shishoo R, editors. Woodhead publishing series in textiles; ۲۰۰۷. Low-pressure cold plasma processing technology.
- Los A, Ziuzina D, Van Cleynenbreugel R, Boehm D, Bourke P. Assessing the biological safety of atmospheric cold plasma treated wheat using cell and insect models. *Foods.* ۲۰۲۰; ۹:۸۹۸. doi: ۱۰.۳۳۹۰/foods۹۰۷۰۸۹۸. - DOI - PMC - PubMed
- Lu P, Boehm D, Bourke P, Cullen P.J. Achieving reactive species specificity within plasma-activated water through selective generation using air spark and glow discharges. *Plasma Process. Polym.* ۲۰۱۷; ۱۴:۱۶۰۲۰۷. doi: ۱۰.۱۰۰۲/ppap.۲۰۱۶.۰۲۰۷. - DOI
- Lukes P, Clupek M, Babicky V, Sunka P. Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. *Plasma Sources Sci. Technol.* ۲۰۰۸; ۱۷ doi: ۱۰.۱۰۸۸/۰۹۶۳-۰۲۵۲/۱۷/۲/۰۲۴۰۱۲. - DOI
- Mahdavian Mehr H, Koocheki A. Effect of atmospheric cold plasma on structure, interfacial and emulsifying properties of Grass pea (*Lathyrus sativus* L.) protein isolate. *Food Hydrocolloids.* ۲۰۲۰; ۱۰۶:۱۰۵۸۹۹. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۲۰.۱۰۵۸۹۹. - DOI
- Mason W.R. *Starch*. Elsevier; ۲۰۰۹. Starch use in foods; pp. ۷۴۵-۷۹۵. - DOI
- Milella A, Palumbo F. In: *Encyclopedia of Membranes*. Drioli E, Giorno L, editors. Springer Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg; ۲۰۱۴. Cold plasma; pp. ۱-۲. - DOI
- Moiseev T, Misra N.N, Patil S, Cullen P.J, Bourke P, Keener K.M, Mosnier J.P. Post-discharge gas composition of a large-gap DBD in humid air by UV-Vis absorption spectroscopy. *Plasma Sources Sci. Technol.* ۲۰۱۴; ۲۳ doi: ۱۰.۱۰۸۸/۰۹۶۳-۰۲۵۲/۲۳/۶/۰۶۵۰۳۳. - DOI
- Moreau M, Orange N, Feuilloley M.G.J. Non-thermal plasma technologies: new tools for bio-decontamination. *Biotechnol. Adv.* ۲۰۰۸; ۲۶:۶۱۰-۶۱۷. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.biotechadv.۲۰۰۸.۰۸.۰۰۱. - DOI - PubMed
- Niemira B.A. Cold plasma decontamination of foods. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* ۲۰۱۲; ۳:۱۲۵-۱۴۲. doi: ۱۰.۱۱۴۶/annurev-food-۰۲۲۸۱۱-۱۰۱۱۳۲. - DOI - PubMed
- Oh J-S, Kakuta M, Furuta H, Akatsuka H, Hatta A. Effect of plasma jet diameter on the efficiency of reactive oxygen and nitrogen species generation in water. *Jpn. J. Appl. Phys.* ۲۰۱۶; ۵۵ doi: ۱۰.۷۵۶۷/JJAP.۵۵.۰۶HD.۰۱. -



- Okyere, A. Y, Rajendran, S, & Annor, G. A. (۲۰۲۲). Cold plasma technologies: Their effect on starch properties and industrial scale-up for starch modification. *Current Research in Food Science*, ۵, ۴۵۱-۴۶۳.
- Okyere A.Y, Bertoft E, Annor G.A. Modification of cereal and tuber waxy starches with radio frequency cold plasma and its effects on waxy starch properties. *Carbohydr. Polym.* ۲۰۱۹; ۲۲۳:۱۱۵۰۷۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۱۹.۱۱۵۰۷۵. - DOI - PubMed
- Okyere A.Y, Boakye P.G, Bertoft E, Annor G.A. Structural characterization and enzymatic hydrolysis of radio frequency cold plasma treated starches. *J. Food Sci.* ۲۰۲۲; ۱۷۵۰-۳۸۴۱:۱۶۰۳۷. doi: ۱۰.۱۱۱۱/۱۷۵۰-۳۸۴۱.۱۶۰۳۷. - DOI - PubMed
- Pankaj S.K, Wan Z, De León J.E, Mosher C, Colonna W, Keener K.M. High-voltage atmospheric cold plasma treatment of different types of starch films: cold plasma treatment of starch films. *Starch - Stärke.* ۲۰۱۷; ۶۹:۱۷۰۰۰۹. doi: ۱۰.۱۰۰۲/star.۲۰۱۷.۰۰۰۹. - DOI
- Pankaj S, Wan Z, Keener K. Effects of cold plasma on food quality: a review. *Foods.* ۲۰۱۸; ۷:۴. doi: ۱۰.۳۳۹۰/foods۷۰۱۰۰۴. - DOI - PMC - PubMed
- Park S.H, Na Y, Kim J, Kang S.D, Park K-H. Properties and applications of starch modifying enzymes for use in the baking industry. *Food Sci Biotechnol.* ۲۰۱۷ doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۰۶۸-۰۱۷-۰۲۶۱-۵. - DOI - PMC - PubMed
- Sifuentes-Nieves I, Mendez-Montealvo G, Flores-Silva P.C, Nieto-Pérez M, Neira-Velazquez G, Rodriguez-Fernandez O, Hernández-Hernández E, Velazquez G. Dielectric barrier discharge and radio-frequency plasma effect on structural properties of starches with different amylose content. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* ۲۰۲۱; ۶۸:۱۰۲۶۳۰. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ifset.۲۰۲۱.۱۰۲۶۳۰. - DOI
- Snoeckx R, Bogaerts A. Plasma technology – a novel solution for CO<sub>2</sub> conversion? *Chem. Soc. Rev.* ۲۰۱۷; ۴۶:۵۸۰۵–۵۸۶۳. doi: ۱۰.۱۰۳۹/C6CS۰۰۰۶۶E. - DOI - PubMed
- Song J, Jiang B, Wu Y, Chen S, Li S, Sun H, Li X. Effects on surface and physicochemical properties of dielectric barrier discharge plasma-treated whey protein concentrate/wheat cross-linked starch composite film. *J. Food Sci.* ۲۰۱۹; ۸۴:۲۶۸–۲۷۵. doi: ۱۰.۱۱۱۱/۱۷۵۰-۳۸۴۱.۱۴۳۸۷. - DOI - PubMed
- Sudheesh C, Sunooj K.V, Sinha S.K, George J, Kumar S, Murugesan P, Arumugam S, Ashwath Kumar K, Sajeew Kumar V.A. Impact of energetic neutral nitrogen atoms created by glow discharge air plasma on the physico-chemical and rheological properties of kithul starch. *Food Chem.* ۲۰۱۹; ۲۹۴:۱۹۴–۲۰۲. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۹.۰۵.۰۶۷. - DOI - PubMed
- Sun X, Saleh A.S.M, Sun Z, Ge X, Shen H, Zhang Q, Yu X, Yuan L, Li W. Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments. *Lebensm. Wiss. Technol.* ۲۰۲۲; ۱۵۳:۱۱۲۴۸۳. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.lwt.۲۰۲۱.۱۱۲۴۸۳. - DOI
- Surowsky B, Fröhling A, Gottschalk N, Schlüter O, Knorr D. Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: inactivation kinetics and mechanisms. *Int. J. Food Microbiol.* ۲۰۱۴; ۱۷۴:۶۳–۷۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijfoodmicro.۲۰۱۳.۱۲.۰۳۱. - DOI - PubMed
- Thirumdas R, Kadam D, Annapure U.S. Cold plasma: an alternative technology for the starch modification. *Food Biophys.* ۲۰۱۷; ۱۲:۱۲۹–۱۳۹. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۴۸۳-۰۱۷-۹۴۶۸-۵. - DOI
- Thirumdas R, Trimukhe A, Deshmukh R.R, Annapure U.S. Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *Carbohydr. Polym.* ۲۰۱۷; ۱۵۷:۱۷۲۳–۱۷۳۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۱۶.۱۱.۰۵۰. - DOI - PubMed
- Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U, Siliveru K, Blundell R, Gatt R, Valdramidis V.P. Plasma-activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends Food Sci. Technol.* ۲۰۱۸; ۷۷:۲۱–۳۱. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.tifs.۲۰۱۸.۰۵.۰۰۷. - Thirumdas, R, Kadam, D, & Annapure, U. S. (۲۰۱۷). Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *Food Biophysics*, ۱۲, ۱۲۹-۱۳۹.
- Thomas M, Mittal K.L. Wiley; Salem: ۲۰۱۲. Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Polymers: Relevance to Adhesion, Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Polymers: Relevance to Adhesion.
- Thornhill W. vol. ۳۵. ۲۰۰۷. The Z-pinch morphology of supernova ۱۹۸۷A and electric stars; pp. ۸۳۴–۸۴۴. (IEEE Trans. Plasma Sci). - DOI
- Timoshkin I.V, Maclean M, Wilson M.P, Given M.J, MacGregor S.J, Wang T, Anderson J.G. Bactericidal effect of corona discharges in atmospheric air. *IEEE Trans. Plasma Sci.* ۲۰۱۲; ۴۰:۲۳۲۲–۲۳۲۳.
- Trinh K.S. Formation of boiling-stable resistant cassava starch using the atmospheric argon-plasma treatment. *J. Bioenergy Food Sci.* ۲۰۱۸; ۵:۹۷–۱۰۵. doi: ۱۰.۱۸۰۶۷/jbfs.۲۰۱۳.۲۲۴. - DOI
- Turner M. In: Cold Plasma in Food and Agriculture. Misra N.N, Schlüter O, Cullen P.J, editors. Academic Press; ۲۰۱۶. Chapter ۲—physics of cold plasma; pp. ۱۷–۵۱. - DOI
- Vaideki K. Antimicrobial Textiles. Elsevier; ۲۰۱۶. Plasma technology for antimicrobial textiles; pp. ۷۳–۸۶. - DOI
- Yan S, Chen G, Hou Y, Chen Y. Improved solubility of banana starch by dielectric barrier discharge plasma treatment. *Int. J. Food Sci. Technol.* ۲۰۲۰; ۵۵:۶۴۱–۶۴۸. doi: ۱۰.۱۱۱۱/ijfs.۱۴۳۱۸. - DOI

- Yan Y, Feng L, Shi M, Cui C, Liu Y. Effect of plasma-activated water on the structure and in vitro digestibility of waxy and normal maize starches during heat-moisture treatment. Food Chem. ۲۰۲۰;۳۰۶:۱۲۵۵۸۹. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۹.۱۲۵۵۸۹. - DOI - PubMed
- Zhang B, Xiong S, Li X, Li L, Xie F, Chen L. Effect of oxygen glow plasma on supramolecular and molecular structures of starch and related mechanism. Food Hydrocolloids. ۲۰۱۴;۳۷:۶۹-۷۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۱۳.۱۰.۰۳۴. - DOI
- Zhang B, Chen L, Li X, Li L, Zhang H. Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: a structure-functionality relationship. Food Hydrocolloids. ۲۰۱۵;۵۰:۲۲۸-۲۳۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۱۵.۰۵.۰۰۲. - DOI
- Zhao Y, Patange A, Sun D, Tiwari B. Plasma-activated water: physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. ۲۰۲۰;۱۹:۳۹۵۱-۳۹۷۹. doi: ۱۰.۱۱۱۱/۱۵۴۱-۴۳۳۷.۱۲۶۴۴. - DOI - PubMed
- Zhou Y, Yan Y, Shi M, Liu Y. Effect of an atmospheric pressure plasma jet on the structure and physicochemical properties of waxy and normal maize starch. Polymers. ۲۰۱۹;۱۱ doi: ۱۰.۳۳۹۰/polym۱۱۰۱۰۰۰۸. - DOI - PMC - PubMed
- Zhu F. Plasma modification of starch. Food Chem. ۲۰۱۷;۲۳۲:۴۷۶-۴۸۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۷.۰۴.۰۲۴. - DOI - PubMed
- Zia-ud-Din, Xiong H, Fei P. Physical and chemical modification of starches: a review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. ۲۰۱۷;۵۷:۲۶۹۱-۲۷۰۵. doi: ۱۰.۱۰۸۰/۱۰۴۰۸۳۹۸.۲۰۱۵.۱۰۸۷۳۷۹. - DOI - PubMed
- Zou J-J, Liu C-J, Eliasson B. Modification of starch by glow discharge plasma. Carbohydr. Polym. ۲۰۰۴;۵۵:۲۳-۲۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۰۳.۰۶.۰۰۱. -

## An overview of the plasma process as a new process for starch processing

### Abstract

Plasma is an emerging non-thermal technology in the food processing sector. In the present review, we will discuss recent scientific reports on the properties of plasma refined starches. This paper reviews the mechanism of starch modification by plasma active species and briefly discusses its effects on properties. The effect of cold plasma on starch depends on the type of gas, applied voltage and treatment time. The change in properties is mainly due to polymerization and cross-linking of amylose and amylopectin side chains. After plasma treatment, molecular weight, viscosity and gelatinization temperature decrease. Plasma increases the surface energy and increases the hydrophilicity of starch grains. It can be concluded that cold plasma will be a useful method as an alternative technology to modify starch properties.

**Keywords:** cold plasma, polymerization, non-thermal, starch