

هیدروژناسیون روغن سویا با تکنیک پلاسما سرد با ترکیب گازی هیدروژن - نیتروژن

ضحی چهاردهی سیرتی^a، مریم قراچورلو^{b*}، حمیدرضا قمی مرزدشتی^c، رضا عزیزی نژاد^d

^a دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^b استاد گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^c دانشیار پژوهشگر لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^d استادیار گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

۵

چکیده

مقدمه: به دلیل بالا بودن میزان اسیدهای چرب غیر اشباع در روغن سویا، احتمال اکسیداسیون در این محصول بالا و کاربرد آن در صنعت غذا محدود می‌باشد؛ لذا جهت افزایش پایداری اکسیداتیو و توسعه کاربردهای غذایی آن، فرایندهای اصلاحی متعددی مورد توجه قرار گرفته است که در این پژوهش فرایند هیدروژناسیون با استفاده از تکنولوژی نوین پلاسمای سرد جهت تولید روغن نیمه هیدروژنه با اسیدهای چرب ترانس بسیار پایین، انجام شده است.

مواد و روش‌ها: اثر استفاده از پلاسمای سرد تخلیه مانع دی الکتریک سطحی با استفاده از تیمار ۱۳ ساعته، ولتاژ ۱۵ کیلوولت و ترکیب گازی هیدروژن ۵۰٪ - نیتروژن ۵۰٪ بر روی خصوصیات فیزیکوشیمیایی روغن سویا مورد بررسی قرار گرفت. در بازه‌های زمانی مشخص از نمونه‌های تیمار شده نمونه برداری گردید و ترکیب اسیدهای چرب، اندیس یدی، ضریب شکست، محتوی کارتنوئید، نقطه ذوب، اندیس پراکسید، محتوی توکوفرول و استرول آن‌ها اندازه گیری شد.

یافته‌ها: نتایج حاصله نشان داد که در اثر استفاده از تیمار پلاسمای سرد تخلیه مانع دی الکتریک سطحی ۱۳ ساعته، محتوی اسیدهای چرب غیر اشباع از ۵۸/۶۲٪ به ۴۰/۲۴٪، محتوی کارتنوئید از ۲۶/۳۸ ppm به ۶/۳۲ ppm، ضریب شکست از ۱/۴۶۷۲ به ۱/۴۴۰۰، اندیس یدی از ۱۲۹/۶۴ به ۱۰۰/۴۵، میزان استرول کل از ۲۶۳۶/۵۱ ppm به ۲۳۱۵/۸۶ ppm به طور معناداری کاهش و اندیس پراکسید از ۲/۴ به ۵/۸ meq O₂/kg oil و نقطه ذوب به ۷ °C افزایش یافتند (p<0.05). همچنین میزان اسیدهای چرب ترانس تولید شده به صورت بسیار جزئی (۰/۸۵٪) مشاهده گردید.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج بدست آمده از بررسی‌های صورت گرفته، می‌توان از تیمار پلاسما دی‌بی‌دی سطحی به عنوان فناوری نوین جهت هیدروژناسیون روغن‌ها و احتمالاً رنگبری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: اسید چرب ترانس، پلاسمای سرد، خواص فیزیکوشیمیایی، روغن سویا، هیدروژناسیون

مقدمه

روغن سویا به دلیل در دسترس بودن، ارزان بودن و ویژگی‌های بسیار مطلوب، دومین روغن گیاهی پرمصرف در جهان است. این روغن حاوی حدود ۱۸-۲۰٪ اسیدهای چرب اشباع، ۲۲-۲۴٪ اسیدهای چرب تک غیر اشباع و ۵۸-۶۰٪ اسیدهای چرب چند غیر اشباع به ویژه اسیدهای چرب لینولنیک و لینولئیک می‌باشد (Subroto *et al.*, 2020). محتوای نسبتاً بالای اسیدهای چرب با دو و سه پیوند دوگانه منجر به کاهش پایداری اکسیداتیو و کوتاه نمودن مدت ماندگاری روغن سویا طی فرآوری و انبارداری می‌گردد (Indiarto & Qonit, 2020). از این رو جهت بهبود پایداری اکسیداتیو روغن سویا و توسعه کاربردهای غذایی آن، این روغن در صنعت تحت فرایندهای اصلاحی مختلفی (هیدروژناسیون جزئی، اینتراستریفیکاسیون، جزء به جزء کردن و مخلوط سازی) قرار می‌گیرد. در میان این روش‌ها، فرآیند هیدروژناسیون جزئی مدت زمان زیادی است که به صورت صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرآیند هیدروژناسیون جزئی روغن‌های خوراکی یک فرآیند شیمیایی است که از طریق کاهش میزان اسیدهای چرب چند غیراشباعی منجر به بهبود پایداری اکسیداتیو و افزایش ماندگاری روغن سویا و از طریق افزایش تعداد اسیدهای چرب اشباع منجر به اصلاح خصوصیات فیزیکی روغن مانند افزایش نقطه ذوب و ایجاد بافت نیمه جامد مطلوب برای استفاده در تولید محصولات قنادی می‌گردد. در روش سنتی هیدروژناسیون جزئی، اسیدهای چرب غیراشباع با گاز هیدروژن در دمای بالا (۱۵۰-۲۴۰ °C) تحت فشار بیش از ۱ اتمسفر و با حضور کاتالیزور نیکل (۰/۰۸-۰/۱-۰/۱٪) به مدت ۱-۴ ساعت واکنش می‌دهند. متأسفانه در نتیجه حضور کاتالیزورهای فلزی و شرایط دمایی بالا در این فرآیند سنتی چالش‌های غیر قابل اجتنابی ایجاد می‌گردد که از مهم‌ترین آن می‌توان به تشکیل اسیدهای چرب ترانس مضر (تقریباً ۲۵-۴۰٪) و سمیت کاتالیزور باقی مانده مورد استفاده، اشاره نمود (Adu *et al.*, 2019).

ایزومر موقعیتی ترانس، پایداری ترمودینامیکی و نقطه ذوب بالاتری نسبت به ایزومر سیس خود دارد و این امر

ثابت شده است که اسیدهای چرب ترانس می‌توانند منجر به بیماری‌های قلبی عروقی، فشار خون بالا و اضافه وزن در انسان گردند. در نتیجه در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای جهت جایگزینی این فرآیند سنتی هیدروژناسیون کاتالیستی با فرایندهای جدید غیرحرارتی و بدون کاتالیزور ایجاد شده است.

یک فناوری جدید جایگزین هیدروژناسیون کاتالیستی، فناوری پلاسما است که یکی از فناوری‌های سبز است (Nayebzadeh *et al.*, 2019). پلاسما به حالت چهارم ماده بعد از حالت‌های جامد، مایع و گاز اشاره دارد که با افزایش انرژی مولکولی گاز، حالت ماده تغییر کرده و گازی از اتم‌ها شکل می‌گیرد که ذرات باردار، الکترون‌ها و یون‌های مثبت آزادانه در آن حرکت می‌کنند (Misra *et al.*, 2016). به منظور تولید پلاسمای سرد از انواع روش‌های مختلف نظیر پلاسمای ناشی از مایکروویو، فرکانس رادیویی، تخلیه تابش اتمسفری، تخلیه سد دی الکتریک، جت پلاسما و کرونا می‌توان استفاده نمود که روش رایج برای تولید پلاسمای سرد در صنعت غذا تخلیه سد دی الکتریک (DBD)^۱ می‌باشد (Thirumdas *et al.*, 2017). DBD از نظر انعطاف پذیری، پیکربندی هندسی، پارامترهای عملیاتی، طراحی ساده، هزینه، ایمنی و ویژگی‌های منبع تغذیه مزایای متعددی دارد (Feizollahi *et al.*, 2021). دو شکل اصلی برای تولید DBD وجود دارد: DBD حجمی و DBD سطحی. DBD حجمی از دو صفحه موازی ساخته شده است که در آن‌ها پلاسما در یک حجم تولید می‌شود. DBD سطحی شامل دو الکترود است که در دو طرف یک پانل دی الکتریک تحت قرار دارند که در آن تخلیه بین الکترودهای تخلیه و دی الکتریک اتفاق می‌افتد.

به تازگی DBD حجمی به عنوان یک تکنیک جدید برای هیدروژناسیون روغن‌های خوراکی مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های موجود در این تحقیقات نشان داده‌اند که این تیمارها می‌توانند منجر به کاهش محتوی اسیدهای چرب چند غیر اشباعی و افزایش اسیدهای چرب اشباع در روغن‌های پالم و سویا و در نتیجه تولید روغن به طور جزئی هیدروژنه گردند (Yepez & Keener, 2016; Yepez *et al.*, 2020; Puprasit *et al.*, 2020).

¹ Dielectric Barrier Discharge

الکترودها با هندسه و شکل دلخواه ایجاد می‌نماید. دلیل انتخاب مس نیز خاصیت رسانایی بالای آن می‌باشد که یک لایه قلع بر روی آن جهت جلوگیری از اکسید شدن الکترودها قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام شده الگوی الکترودها لانه زنبوری (شکل ۱) در PCB عملکرد بالایی در هیدروژناسیون روغن ایجاد می‌نماید (Sirati *et al.*, 2023). در این مطالعه نیز این الگو از الکترودها انتخاب گردید و با نرم افزار eagle طراحی گردید. سپس این الگو با روش ماژیک ضد اسید روی الکترودها پیاده سازی شد. اندازه PCB ۱۰ × ۱۰ cm با ضخامت ۱/۵ mm بود.

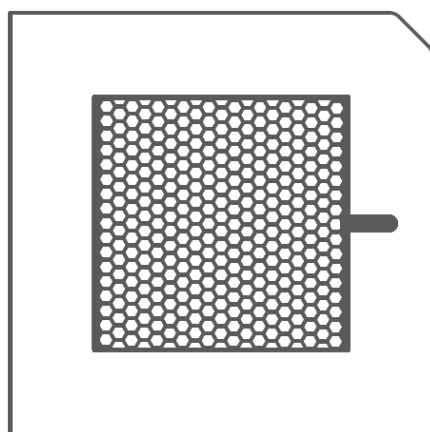


Figure 1- fabricated PCB with honeycomb pattern
شکل ۱- طراحی PCB شده با الگوی لانه زنبوری

- طراحی راکتور پلازما دی بی دی سطحی

راکتور پلازما با روش تخلیه دی بی دی سطحی به صورت شکل ۲ ساخته شد. از یک منبع تغذیه مدل DC PLUS ساخت ایران استفاده گردید که ولتاژ ورودی ۲۳۰ ولت (AC) در فرکانس ۵۰ هرتز را به ولتاژ خروجی ۱۵-۰ کیلوولت در فرکانس ۲۰-۶ کیلوهرتز تبدیل می‌کند. یک ظرف پلاستیکی پروپیلنی با ابعاد ۲۲۰ × ۱۶۰ × ۷۰ mm³ (حجم ۱/۶ لیتر) به عنوان محفظه انتخاب گردید. پتری دیش حاوی روغن در کف محفظه قرار گرفت. PCB ساخته شده بر روی درب ظرف سوار شد به گونه‌ای که الکترودها گودار به سمت و نزدیک سطح روغن (الکترودها پایینی) و الکترودها پلیت شکل به سمت درب ظرف (الکترودها بالایی) قرار گرفتند. الکترودها بالایی و الکترودها گودار به ترتیب به کابل‌های زمین و ولتاژ بالا متصل شدند (شکل ۲). جهت کنترل موثر دما یک هیت سینک^۲ به پی سی بی

سیستم به کار رفته در تمامی این مطالعات DBD حجمی بوده است و در مقابل از DBD سطحی تاکنون برای هیدروژناسیون روغن خوراکی استفاده نگردیده است. در DBD سطحی، میکرو تخلیه‌هایی که روی سطح دی الکترونیک ایجاد می‌شوند، منجر به یک پلازما هموزن تر نسبت به پلازما ایجاد شده توسط DBD حجمی می‌گردند. همچنین به دلیل سادگی ساخت، تولید پلازما در هوای محیط با مقادیر ولتاژ نسبتاً کم و با تجهیزات کم هزینه، توزیع یکنواخت گونه‌های خنثی فعال در کل سطح مواد و پتانسیل مقیاس پذیری بالا، DBD سطحی می‌تواند مناسب‌تر باشد (Breden *et al.*, 2018; Figueroa- (Pinochet *et al.*, 2022). بنابراین هدف از این تحقیق امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی جدید پلازما سرد دی بی دی سطحی برای تولید روغن سویا به طور جزئی هیدروژنه شده حاوی مقادیر بسیار ناچیز اسید چرب ترانس است که این روغن تولید شده از نظر خصوصیات فیزیکوشیمیایی قابل رقابت با روغن به طور جزئی هیدروژنه شده با روش سنتی باشد.

مواد و روش‌ها

روغن سویای خام از کارخانه روغن ورامین شماره یک (تهران، ایران) تهیه گردید و تا زمان شروع فرایند در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شد. همچنین مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت مرک (آلمان) خریداری شدند.

- آماده‌سازی نمونه روغن سویا

حجم مشخصی از روغن (۱۵g) در پتری دیش پلاستیکی (پلی پروپیلن) ریخته و پتری دیش در داخل محفظه پلازما قرار گرفت.

- طراحی الکترودها

در این مطالعه نوع DBD اعمال شده DBD سطحی بود که در آن دو الکترودها مسی در دو طرف یک دی الکترونیک فایبرگلاس قرار داده شد که به آن برد مدار چاپی یا PCB^۱ گفته می‌شود. فایبرگلاس قدرت دی الکترونیک خوبی در محدوده ولتاژ این تحقیق دارد و یک ماده به راحتی در دسترس است که بستر مناسب و آسانی برای ساخت

^۱ Printed Circuit Board

^۲ Heat Sink

تا چگونگی روند هیدروژناسیون توسط پلاسما سرد دی بی دی سطحی مشخص گردد.

- آزمون‌های فیزیکوشیمیایی نمونه روغن سویا هیدروژنه شده

- ترکیب اسیدهای چرب

برای تهیه متیل استر اسیدهای چرب، مخلوط ۱۰ mg روغن سویای خام، ۰/۵ml هگزان، ۲ml سود ۰/۰۱ نرمال در متانول خشک، به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب °C ۶۰ نگهداری شد و سپس معرف BF₃ به میزان ۳ml اضافه و ۱۰ دقیقه دیگر نیز در حمام آب °C ۶۰ نگهداری گردید. پس از گذشت مدت زمان عنوان شده ۲ml محلول نمک کلرید سدیم ۲۰٪ و ۱ml هگزان تحت جریان آب سرد به نمونه اضافه شد. در نهایت مخلوط حاصله سانتریفوژ گردید و لایه هگزانی حاوی متیل استر اسیدهای چرب جداسازی و برای آنالیز به دستگاه کروماتوگرافی گازی منتقل گردید (Bajaniya et al., 2015).

برای آنالیز متیل استر اسیدهای چرب، از دستگاه کروماتوگرافی گازی مجهز به دکتور یونش شعله‌ای (مدل Hewlett Packard model 7673, Anondale-USA) با یک ستون موئینه (۳۰ m × ۰/۲۵ mm) پوشیده شده با ۰/۲ میکرومتر فاز سیانو پروپیل فینیل-بی سیانو پروپیل استفاده شد. دمای ابتدا ستون °C ۱۳۰ بود سپس با سرعت $3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ به °C ۱۴۵ افزایش یافته و پس از آن با سرعت $1/2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ به °C ۱۶۵ افزایش یافت. آشکارساز و تزریق کننده، در دمای °C ۲۵۰ تنظیم شدند. گاز هلیوم به عنوان گاز حامل در نرخ جریان $1/2 \frac{\text{mL}}{\text{min}}$ به کار برده شد. درصد نسبی اسیدهای چرب، با استفاده از مخلوط رفرنس استرهای متیله اسیدهای چرب ارزیابی گردیدند. همچنین میزان اسیدهای چرب اشباع (SFAs)، تک غیر اشباعی (MUFAs) و چند غیر اشباعی (PUFAs) با معادله‌های زیر محاسبه گردید (Rezaei et al., 2014).

$$\text{SFAs} = \text{C16:0} + \text{C18:0}$$

$$\text{MUFAs} = \text{C18:1-9t} + \text{C18:1-9c}$$

$$\text{PUFAs} = \text{C18:2-9t}, 12\text{t} + \text{C18:2-9c}, 12\text{c} + \text{C18:39c}, 12\text{c}, 15\text{c}$$

متصل گردید. کل ظرف به واسطه واشر تعبیه شده داخل سر ظرف با درب‌بندی ظرف آب‌بندی^۱ شد به گونه‌ای که امکان ورود و خروج هوا وجود نداشت. دو ورودی و خروجی گاز روی بدنه محفظه ایجاد گردید. ورودی با استفاده از شلنگ به کپسول گاز مورد نظر متصل شد و خروجی نیز گازها و گونه‌های فعال و اشتعال پذیر ایجاد شده را جهت کاهش خطر انفجار و ایجاد یک فشار اتمسفری به خارج از محفظه هدایت می‌کرد. تمامی آزمایشات زیر هود آزمایشگاهی انجام پذیرفت تا این ترکیبات گازی به محیط خارج از آزمایشگاه هدایت شوند (Sirati et al., 2023).

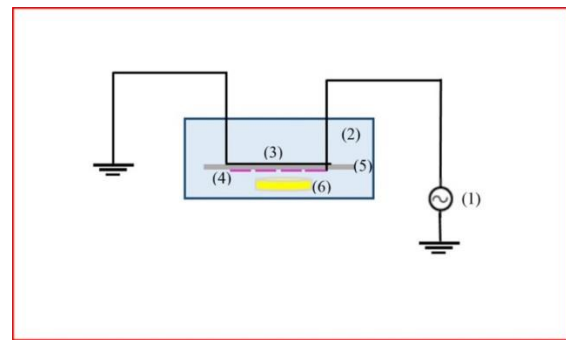


Figure 2- setup of the surface dielectric barrier discharge cold plasma. Source of power (1), plasma chamber (2), grounded electrode (3), high voltage electrode (4), dielectric barriers (5), and oil sample (6)
شکل ۲- ستاپ پلاسما دی بی دی سطحی: منبع تغذیه (۱)، محفظه پلاسما (۲)، الکترود گراند (۳)، الکترود ولتاژ بالا (۴)، مانع دی الکتریک (۵)، نمونه روغن (۶)

- طراحی آزمایش هیدروژناسیون پلاسما دی بی دی سطحی

۲۰g نمونه روغن سویای خام به مدت ۱۳ ساعت تحت تیمار پلاسما دی بی دی سطحی در فشار اتمسفری و دمای محیط، ترکیب گازی ۵۰٪ H₂ - ۵۰٪ N₂، ولتاژ ۱۵ kV کیلوولت و فرکانس ۶ kHz با توان دستگاه ۵۰w و دیوتی سایکل ۱۰٪ قرار گرفتند. تیمارها در بیج‌های ۲۰^۲ دقیقه‌ای انجام شدند. بعد از هر بیج نمونه‌های روغن به مدت ۱۵ دقیقه خنک شدند و سپس تیمار مجدداً تا بیج بعدی ادامه یافت. این روند تا ۱۳ ساعت ادامه پیدا کرد. از نمونه‌های تیمار شده در بازه‌های زمانی ۰، ۱/۵، ۳، ۵، ۹ و ۱۳ ساعت نمونه برداری گردید. سپس آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی بر روی نمونه‌های تیمار شده انجام پذیرفت

¹ Seal

² Batch

- اندیس یدی

اندیس یدی نمونه‌ها به طور مستقیم از ترکیب اسیدهای چرب بدست آمده بوسیله کروماتوگرافی گازی (GC) با به کار بردن فرمول زیر محاسبه گردید (Kmiecik *et al.*, 2021).

$$IV = (0.95 \times \%C16:1) + (0.86 \times \%C18:1) + (1.732 \times \%C18:2) + (2.616 \times \%C18:3) + (0.785 \times \%C20:1) + (0.732 \times \%C22:1)$$

- نقطه ذوب

اندازه‌گیری نقطه ذوب نمونه‌های تولیدی براساس لوله موین و روش Motamedzadegan و همکاران (۲۰۲۰)، با کمی تغییرات صورت گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها تا 10°C بالاتر از نقطه ذوبشان حرارت داده شدند و سپس لوله موین در داخل ظرف نمونه فرو برده شد تا روغن حدود ۱ cm از لوله موین بالا رود. سپس انتهای لوله‌های موین حاوی نمونه در بن ماری آب یخ فرو برده شد تا روغن جامد شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در دمای $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ قرار داده شد. پس از گذشت این زمان لوله موین به دماسنج متصل و در یک بشر که حاوی آب مقطر با دمای حداقل 10°C کمتر از نقطه ذوب احتمالی نمونه است، قرار داده شد. دمای حمام با نرخ $0.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ افزایش یافت. زمانی که اولین لغزش نمونه به سمت بالا در لوله موین مشاهده گردید، به عنوان نقطه ذوب لغزشی نمونه در نظر گرفته شد (Motamedzadegan *et al.*, 2020).

- ضریب شکست

ضریب شکست نمونه‌های مورد بررسی توسط رفرکتومتر (VEE GEE Scientific Abbe Refractometer Model C10, Vernon Hills, USA) در دمای 20°C اندازه‌گیری شد (Mukhametov *et al.*, 2023).

- محتوای کاروتنوئید

به منظور بررسی محتوای کاروتنوئید نمونه‌ها از اسپکتروفتومتری و روش Corbu و همکاران (۲۰۲۰) با کمی تغییرات انجام پذیرفت. بدین منظور ۱ گرم از نمونه با ۱۰۰ میلی‌لیتر سیکلوهگزان به حجم رسانیده و سپس جذب محلول حاصله با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل PG Instrument Limited, model T80 plus, England)

در طول موج ۴۴۵ نانومتر در سلول کوارتز ۱ سانتی‌متری در مقابل سیکلوهگزان (به عنوان شاهد) اندازه‌گیری شد. محتوای کاروتنوئید نمونه‌های روغن بر حسب بتا کاروتن ($\frac{mg}{kg}$) مطابق با معادله ۱ محاسبه گردید (Corbu *et al.*, 2020).

$$\text{معادله ۱} = \frac{V \times (AS - AB)}{0.2610 \times L \times W} = \text{محتوای کاروتنوئید}$$

V حجم به کار برده از نمونه (mL)، AS جذب نمونه‌ی تیمار شده، AB جذب نمونه شاهد، ۰,۲۶۱۰ ضریب خاموشی کاروتنوئید در سیکلوهگزان ($\frac{100 \text{ mL}}{\text{g} \times \text{cm}}$)، L طول سل کوارتز (cm)، W وزن نمونه (g)

- اندیس پراکسید

۵g از نمونه روغن در محلول اسید استیک-ایزواکتان حل شد و به آن محلول پتاسیم یدید اشباع اضافه گردید. سپس مخلوط حاصل با محلول تیوسولفات سدیم و محلول نشاسته به عنوان شناساگر تا بی رنگ شدن رنگ آبی تیترا شد. آزمایش فوق بدون روغن برای شاهد تکرار شد. مقدار پراکسید با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد:

$$\text{معادله ۲} = \frac{(S - B) \times N \times 1000}{W} = \text{اندیس پراکسید}$$

که S حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای نمونه‌های روغن (mL)، B حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای نمونه شاهد (mL)، N نرمالیت محلول تیوسولفات سدیم، W وزن نمونه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری اندیس پراکسید (g). اندیس پراکسید به صورت میلی‌اکی والان پراکسید یا اکسیژن فعال موجود در یک کیلوگرم از نمونه روغن و یا چربی بیان می‌شود (Ghahjaverestani *et al.*, 2022).

- محتوای استرول

تعیین میزان استرول تیمار ۱۳ ساعته بوسیله کروماتوگرافی گازی مجهز به ستون HP5 و آشکارکننده شعله‌ای طبق استاندارد ملی به شماره ۱۶۳۲۴ صورت پذیرفت.

- محتوای توکوفرول

شناسایی و تعیین میزان توکوفرول تیمار ۱۳ ساعته با استفاده از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)

هیدروژناسیون روغن سویا با تکنیک پلاسما سرد با ترکیب گازی هیدروژن - نیتروژن

دارای آشکارساز uv-visible طبق استاندارد ملی شماره ۷۲۱۱ صورت پذیرفت.

- تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق همه آزمون‌ها در سه تکرار بر پایه طرح کاملا تصادفی و در قالب آزمایش فاکتوریل انجام گرفتند. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۵ انجام شد. جهت مقایسه آماری ویژگی‌های روغن تولیدی از تجزیه واریانس یک طرفه (One-Way-ANOVA) استفاده گردید و سپس برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد و مقایسه‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام پذیرفت. همچنین تمامی نتایج به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه گردیدند.

یافته‌ها

در جدول ۱ تغییرات در ترکیب اسیدهای چرب نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده در طی ۱۳ ساعت با ولتاژ ۱۵ kV و مخلوط گاز (۵۰٪ H₂ - ۵۰٪ N₂) نشان داده شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که تاثیر فاکتور زمان بر روی تغییرات درصد ترکیب اسیدهای چرب در سطح ۹۵٪ معنی دار است. همچنین با استفاده از آزمون دانکن میانگین‌ها گروه بندی و مقایسه شدند.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد بیشترین محتوی اسیدهای چرب چند غیر اشباعی (۵۸/۶۲٪) مربوط به نمونه شاهد می‌باشد و کمترین محتوی اسیدهای چرب چند غیر اشباعی (۴۰/۲۴٪) مربوط به نمونه تیمار شده به مدت ۱۳ ساعت می‌باشد. در مقابل بیشترین محتوی اسیدهای چرب اشباع (۲۶/۰۴٪) و تک غیر اشباعی (۲۳/۱٪) مربوط به نمونه تیمار شده به مدت ۱۳ ساعت می‌باشد و کمترین محتوی اسیدهای چرب اشباع (۱۵/۹۶٪) و تک غیر اشباعی (۲۵/۳۶٪) مربوط به نمونه شاهد می‌باشد.

از زمان ۱/۵ ساعت، دو اسید چرب ترانس الایئیدیک اسید و لینوالاتیدیک اسید در مقادیر جزئی (۰/۲٪) شناسایی شدند و تا انتهای فرایند ۱۳ ساعته میزان آن‌ها تا حدود ۰/۸۵٪ افزایش یافتند.

در جدول ۲ تغییرات اندیس یدی نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده در طی ۱۳ ساعت با ولتاژ ۱۵ kV و مخلوط گاز (۵۰٪ H₂ - ۵۰٪ N₂) ارائه شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشخص شد بین میزان اندیس یدی نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده از لحاظ آماری تفاوت معنی داری وجود داشت (p<0/05). کمترین میزان اندیس یدی (۱۰۰/۴۵) مربوط به نمونه تیمار شده ۱۳ ساعته و بیشترین میزان اندیس یدی (۱۲۹/۶۴) مربوط به نمونه شاهد می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب اسیدهای چرب نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده با پلاسما سرد دی بی دی سطحی طی ۱۳ ساعت

Table 1- Fatty acid composition of raw soybean oil samples treated with DBD cold plasma over 13 hours

Fatty acid(%)	Time (h)					
	0	1.5	3	5	9	13
C16:0	12.20±0.1 ^a	11.55±0.3 ^a	11.66±0.1 ^b	12.01±0.1 ^b	14.57±0.1 ^c	17.8±0.1 ^d
C18:0	3.76±0.2 ^a	4.31±0.1 ^b	4.55±0.1 ^b	5.81±0.2 ^c	6.69±0.2 ^d	7.24±0.2 ^e
C18:1-9t	0.00	0.13±0.05 ^b	0.21±0.03 ^c	0.3±0.05 ^d	0.35±0.05 ^d	0.45±0.05 ^e
C18:1-9c	25.36±0.4 ^a	26.47±0.1 ^b	26.78±0.09 ^b	28.02±0.2 ^c	30.23±0.2 ^d	32.65±0.1 ^e
C18:2-9t,12t	0.00	0.07±0.01 ^b	0.08±0.01 ^b	0.15±0.08 ^c	0.27±0.07 ^d	0.4±0.09 ^e
C18:2-9c,12c	51.5±0.6 ^a	51.25±0.09 ^b	49.68±0.1 ^c	45.42±0.1 ^d	40.38±0.1 ^e	36.04±0.1 ^f
C18:3c,12c,15c	7.12±0.8 ^a	6.09±0.1 ^b	5.56±0.2 ^c	5.1±0.2 ^d	4.6±0.2 ^e	3.8±0.4 ^f
SFAs*	15.96	14.86	16.21	17.82	21.26	26.04
MUFAs**	25.36	26.6	26.99	28.32	30.58	33.1
PUFAs***	58.62	57.41	55.32	50.67	45.25	40.24
Total Trans	-	0.2	0.29	0.45	0.62	0.85

Different letters in a row indicate a significant difference (p < 0.05).

*:saturated fatty acids, **: monounsaturated fatty acids, ***: polyunsaturated fatty acids

حروف متفاوت در یک ردیف بیانگر تفاوت معنی دار می باشد (p < 0.05)

*: اسیدهای چرب اشباع، **: اسیدهای چرب تک غیراشباعی، ***: اسیدهای چرب چند غیراشباعی

نمونه تیمار شده تا ۱۳ ساعت تفاوت معنی داری وجود دارد ($p < 0.05$).

میزان توکوفرول در زمان‌های ۰ و ۱۳ ساعت اندازه‌گیری شد همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد بین میزان توکوفرول نمونه شاهد و نمونه تیمار شده تا ۱۳ ساعت تفاوت معنی داری وجود دارد ($p < 0.05$). میزان توکوفرول‌ها در نمونه شاهد بیشتر از نمونه تیمار شده می‌باشد به صورتی که میزان آلفا توکوفرول در نمونه ۱۳ ساعت تیمار شده غیر قابل تشخیص می‌باشد.

میزان استرول در زمان‌های ۰ و ۱۳ ساعت اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد بین میزان استرول نمونه شاهد و نمونه تیمار شده تا ۱۳ ساعت تفاوت معنی داری وجود دارد ($p < 0.05$). میزان استرول کل حدود ۱۲/۱۶٪ کاهش یافت که بیشترین کاهش برای دلتا-۵ اونا استرول سپس کمپسترول و استیگماسترول می‌باشد.

بحث

- ترکیب اسیدهای چرب

نمونه روغن خام سویا به مدت ۱۳ ساعت تحت تیمار پلاسما دی بی دی سطحی در ترکیب گازی $50\% N_2$ - $50\% H_2$ قرار گرفت. ترکیب اسیدهای چرب نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت در جدول ۱ آورده شده است. مطابق نتایج حاصله، فاکتور تغییرات زمان در فرایند هیدروژناسیون نمونه روغن سویا خام، بر تغییرات درصد اسیدهای چرب معنادار بود ($P < 0.05$)؛ بطوریکه محتوای اسیدهای چرب چند غیر

میزان ضریب شکست نمونه شاهد و نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده طی ۱۳ ساعت با ولتاژ ۱۵ kV و مخلوط گاز ($50\% H_2 - 50\% N_2$) در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که تاثیر فاکتور زمان بر روی ضریب شکست در سطح ۹۵٪ معنی دار است. همچنین با استفاده از آزمون دانکن میانگین‌ها گروه بندی و مقایسه شدند. بین نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده (به جز نمونه تیمار شده به مدت ۱/۵ ساعت) تفاوت معنی داری وجود داشت. بیشترین میزان ضریب شکست مربوط به نمونه شاهد می‌باشد و کمترین ضریب شکست مربوط به نمونه تیمار شده به مدت ۱۳ ساعت می‌باشد.

در جدول ۲ میزان کارتنوئید نمونه شاهد و نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده طی ۱۳ ساعت با ولتاژ ۱۵ kV و مخلوط گاز ($50\% H_2 - 50\% N_2$) ارائه شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که تاثیر فاکتور زمان بر روی میزان کارتنوئید در سطح ۹۵٪ معنی دار است. بیشترین میزان کارتنوئید (۲۶/۳۸ ppm) مربوط به نمونه شاهد می‌باشد و کمترین میزان کارتنوئید (۶/۳۲ ppm) مربوط به نمونه تیمار شده به مدت ۱۳ ساعت می‌باشد.

نقطه ذوب نمونه‌ها در زمان‌های ۰، ۵ و ۱۳ ساعت اندازه‌گیری شد و مشخص گردید (جدول ۲) با افزایش زمان تیمار، نقطه ذوب نمونه‌های تیمار شده نیز به طور معنی داری افزایش یافت ($p < 0.05$).

اندیس پراکسید در زمان‌های ۰ و ۱۳ ساعت اندازه‌گیری شد و در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد بین میزان اندیس پراکسید نمونه شاهد و

جدول ۲- خواص فیزیکیوشیمیایی نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده با پلاسما سرد دی بی دی سطحی طی ۱۳ ساعت
Table 3- Physicochemical properties of crude soybean oil samples treated with DBD cold plasma over 13 hours

Physicochemical properties	Time(hour)					
	0	1.5	3	5	9	13
Iodine index	129.64±0.6 ^a	127.49±0.6 ^b	123.66±0.8 ^c	116.11±0.9 ^d	107.99±1.1 ^e	100.45±1.2 ^f
Refractive index	1.4672±0.0 ^a	1.4668±0.0 ^a	1.4663±0.0 ^b	1.4655±0.0 ^c	1.4644±0.0 ^d	1.464±0.0 ^e
Carotenoid(ppm)	26.38±0.4 ^a	15.7±0.2 ^b	14.05±0.4 ^c	10.5±0.1 ^d	8.75±0.1 ^e	6.32±0.1 ^f
sliding melting point (°C)	-	0±0.0 ^a	-	1.3±0.6 ^b	-	7±0.8 ^c
Peroxide index (meq O ₂ /kg oil)	2.4±0.4 ^a	-	-	-	-	5.8±0.6 ^b

Different letters in a row indicate a significant difference ($p < 0.05$).
حروف متفاوت در یک ردیف بیانگر تفاوت معنی دار می‌باشد ($p < 0.05$)

اشباعی از ۵۸/۶۲٪ در نمونه شاهد به ۴۰/۲۴٪ در نمونه تیمار شده ۱۳ ساعته کاهش یافت. از طرفی محتوای اسیدهای چرب اشباع و تک غیراشباعی به ترتیب از ۱۵/۹۶٪ به ۲۶/۰۴٪ و از ۲۵/۳۶٪ به ۳۳/۱٪ در طی تیمار ۱۳ ساعت افزایش یافتند. همچنین مطابق نتایج حاصله دو اسید چرب ترانس الاینیدیک اسید و لینوالاتیدیک اسید به طور جزئی از زمان ۱/۵ ساعت مشاهده گردید که در طی مدت زمان ۱۳ ساعت به طور معناداری تا حدود ۰/۸۵٪ افزایش یافتند؛ ولی این مقدار کمتر از روش سنتی (۲۴٪) بود. علت ایجاد جزئی اسیدهای چرب ترانس در تکنولوژی بدون حرارت و بدون کاتالیزور را نیز می‌توان به انرژی فعالسازی پایین نسبت داد، همچنین شکستن پیوند کوالانسی قوی بین اتم‌های نیتروژن به انرژی زیادی نیاز دارد. نتایج مشابهی در خصوص تغییرات اسیدهای چرب اشباع، تک اشباعی و چند اشباعی توسط Yopez & Keener (۲۰۱۶)، گزارش شده است که بیان کردند با استفاده از پلاسما سرد اتمسفر با ولتاژ بالا هیچ اسید چرب ترانس قابل اندازه گیری شناسایی نشد. Wongjaikham و همکاران (۲۰۲۲)، نیز نتایج مشابهی در خصوص اسیدهای چرب ترانس در تحقیق تولید مارگارین کم چرب با هیدروژنه کردن جزئی روغن پالم با استفاده از روش پلاسما سرد مایکروویو ارائه کردند.

- اندیس یدی

فساد اکسیداتیو روغن‌ها با اندیس یدی ارتباط مستقیمی دارد به طوری که روغن‌های با اندیس یدی بالاتر مستعد فسادپذیری بیشتری می‌باشند. اندیس یدی غیراشباعیت روغن‌ها را هنگامی که باندهای دوگانه آن‌ها از نوع غیرمزدوج باشند، نشان می‌دهد. اندیس یدی یکی از شاخص‌های اصلی بررسی روند واکنش هیدروژناسیون می‌باشد زیرا که کاهش اندیس یدی نشان دهنده کاهش باندهای دوگانه اسیدهای چرب غیراشباع در روغن می‌باشد. اندیس یدی نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصله، مدت زمان فرایند هیدروژناسیون نمونه روغن سویا خام، تغییرات اندیس یدی معنادار بود ($P < 0.05$)؛ بطوریکه با گذشت مدت زمان ۱۳ ساعت هیدروژناسیون، اندیس یدی نمونه‌ها از ۱۲۹/۶۴ به

۱۰۰/۴۵ کاهش یافت. اندیس یدی پایین به معنای محتوای چربی غیر اشباع پایین می‌باشد. در واقع اندیس یدی روغن خام سویا ضریب همبستگی مثبتی با مقدار اسید چرب لینولئیک و لینونیک (اسیدهای چرب چند غیراشباعی) دارد که با اشباع شدن این اسیدهای چرب و کاهش آن‌ها طی هیدروژناسیون، اندیس یدی نیز کاهش می‌یابد (Puprasit et al., 2020). Niveditha و همکاران (۲۰۲۳)، نتایج مشابهی در خصوص کاهش اندیس یدی در مطالعه تأثیر پلاسما سرد بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و خواص حرارتی روغن پالم ارائه کردند. همچنین نتایج در تطابق با نتایج پژوهش Kongprawes و همکاران (۲۰۲۱)، بهبود پایداری اکسیداسیون متیل استرهای اسید چرب مشتق شده از روغن سویا از طریق هیدروژناسیون جزئی با استفاده از پلاسما تخلیه سد دی الکتریک بود.

- ضریب شکست

ضریب شکست یکی از پارامترهای اصلی و فیزیکی مهم در ارزیابی کیفیت روغن است و بستگی به دما، درجه اشباع و مزدوج شدن، طول زنجیره اسید چرب و همچنین وزن مولکولی دارد. ضریب شکست نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت در جدول ۲ آورده شده است. مطابق نتایج حاصله، مدت زمان فرایند هیدروژناسیون، بر ضریب شکست نمونه‌های روغن سویا خام معنادار بود ($P < 0.05$)؛ بطوریکه با گذشت مدت زمان ۱۳ ساعت هیدروژناسیون، ضریب شکست نمونه‌ها از ۱/۴۶۷۲ به ۱/۴۴۰۰ کاهش یافت. علت کاهش ضریب شکست نمونه‌ها در طی تیمار ۱۳ ساعت را می‌توان به دلیل اشباع شدن باندهای دوگانه اسیدهای چرب و در نتیجه کاهش آن‌ها نسبت داد (Niveditha et al., 2023). نتایج در تطابق با نتایج Yopez و همکاران (۲۰۲۰)، در هیدروژناسیون روغن سویا با گاز هیدروژن توسط پلاسما سرد بود.

- محتوای کاروتنوئید

محتوای کاروتنوئید نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت در جدول ۲ آورده شده است. مطابق نتایج حاصله، مدت زمان فرایند هیدروژناسیون، بر این پارامتر معنادار بود ($P < 0.05$)؛

تطابق با نتایج Puprasit و همکاران (۲۰۲۲)، در فرآیند هیدروژناسیون بهبود یافته برای تولید مارگارین بدون تشکیل اسید چرب ترانس توسط پلاسمای سرد می‌باشد.

- اندیس پراکسید

مطابق نتایج حاصله در جدول ۲، اندیس پراکسید نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسمای سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت، در دو زمان شامل ۰ و ۱۳ ساعت مورد بررسی قرار گرفت که افزایش معناداری در اندیس پراکسید مشاهده گردید ($P < 0.05$)؛ بطوریکه اندیس پراکسید از ۲/۴ به ۵/۸ $\text{meq O}_2/\text{kg oil}$ طی تیمار ۱۳ ساعت افزایش یافت ولی با این حال این میزان کمتر از میزان توصیه شده استاندارد برای محتوای پراکسید (۱۰ میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم) در روغن‌های گیاهی بود. نتایج مشابهی در این خصوص توسط Gebremical و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیق اثرات پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک سطحی مولتی هالو^۱ در روغن بادام زمینی ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله و مطالعات، پراکسیدها مخلوطی از ترکیبات فرار مانند آلدئیدها، هیدروکربن‌ها، کتون‌ها، استرها و الکل‌ها هستند و در واقع محصولات میانی اکسیداسیون روغن محسوب می‌شوند؛ بطوریکه تحت تأثیر عوامل زیادی نظیر اکسیژن، نوع روغن، ترکیب اسیدهای چرب، درجه غیر اشباعیت اسیدهای چرب و دما می‌باشند (Rodrigues *et al.*, 2016).

اگرچه روغن مورد استفاده در این بخش از تحقیق روغن خام سویا بود که به دلیل داشتن اسید لینولئیک بسیار بالا بسیار مستعد اکسید شدن توسط اکسیژن و دما است، اما نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در این تیمار پلاسمای سرد دی بی دی سطحی مقدار پراکسید به میزان کمی افزایش یافته است که این نتیجه را می‌توان با دلایل زیر توضیح داد:

قبل از تیمار با پلاسمای سرد دی بی دی سطحی، داخل محفظه تیمار با گاز هیدروژن خالص با نرخ جریان ۴ لیتر در دقیقه به مدت ۱ دقیقه برای حذف گاز اکسیژن پرچ شد. در واقع، یکی از اهداف حذف گاز اکسیژن، جلوگیری از تشکیل گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن بود که واکنش‌های اکسیداسیون را آغاز می‌کنند (پیز و همکاران، ۲۰۲۰).

بطوریکه با گذشت مدت زمان ۱۳ ساعت هیدروژناسیون، محتوای کاروتنوئید نمونه‌ها از ۲۶/۳۸ ppm به ۶/۳۲ ppm کاهش یافت. علت کاهش محتوای کاروتنوئید را می‌توان هیدروژنه شدن باندهای دوگانه کاروتنوئید در طی فرآیند هیدروژناسیون عنوان کرد (Amorim *et al.*, 2023; Fernandes *et al.*, 2019).

همچنین یک تغییر رنگ واضح در رنگ نمونه‌ها پس از تیمار پلاسمای سرد قابل مشاهده بود از آنجاییکه رنگ کاروتنوئیدها ناشی از سیستم‌های پیوند دوگانه مزدوج ساختار آن می‌باشد، اشباع شدن این پیوندها در طی فرآیند هیدروژناسیون نیز منجر به بی رنگ شدن آن‌ها می‌گردد. اما رنگدانه کلروفیل انحصاراً در مرحله رنگبری روغن بوسیله خاک رنگبر حذف می‌گردد و در مرحله هیدروژناسیون تغییری نمی‌کند. بنابراین بعد از هیدروژناسیون پلاسمای سرد دی بی سطحی، رنگدانه کاروتنوئید بی رنگ شده و رنگدانه‌های کلروفیل موجود در روغن مورد مطالعه منجر به تشدید رنگ سبز کلروفیلی در نمونه‌های روغن تیمار شده می‌گردد. این یافته‌ها پیشنهاد می‌کنند که پلاسمای سرد دی بی دی سطحی می‌تواند به طور موثری برای هیدروژناسیون روغن همراه با رنگبری کاروتنوئیدها به کار رود (Marshall and Olcott, 2010).

نقطه ذوب

به‌طور کلی یکی از اهداف اصلی هیدروژناسیون روغن سویا بالا بردن نقطه ذوب و افزایش دامنه کاربردی آن می‌باشد. نقطه ذوب یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی چربی‌ها جهت کنترل کیفی و ساخت محصولات چرب است. مطابق نتایج حاصله در جدول ۲، نقطه ذوب نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسمای سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت، در سه زمان شامل ۱/۵، ۵ و ۱۳ ساعت مورد بررسی قرار گرفت؛ که افزایش معناداری در میزان نقطه ذوب مشاهده گردید ($P < 0.05$)؛ بطوریکه بیشترین میزان نقطه ذوب (حدود 7°C) در نمونه تیمار شده ۱۳ ساعته مشاهده شد؛ علت این افزایش به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب اشباع در اثر هیدروژناسیون با تکنیک پلاسمای می‌باشد؛ که منجر به افزایش نقطه ذوب می‌گردد (Yepez *et al.*, 2020). نتیجه ارائه شده در

¹ Multihollow Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma

هنگامی که فشار جزئی اکسیژن در فضای بالای ظرف (head space) پایین باشد، مقدار کمی اکسیژن می‌تواند در روغن حل شود و در نتیجه سرعت اکسیداسیون روغن کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2021).

علاوه بر این دمای تیمار به عنوان یک عامل تسریع کننده اکسیداسیون در طی این تیمار پلاسما با طراحی بیج‌های ۲۰ دقیقه کنترل شدند. به گونه‌ای که پس از هر بیج ۲۰ دقیقه، نمونه‌های تیمار شده روغن به مدت ۱۵ دقیقه خنک شدند و سپس تیمار تا پایان بیج بعدی ادامه یافت. با اینحال افزایش اندک دما به دلیل اینکه فرایند هیدروژناسیون یک فرایند گرمازا می‌باشد، غیر قابل اجتناب می‌باشد.

همچنین این امر مشخص است که زمانی که باندهای دوگانه در اسیدهای چرب غیراشباع نمونه‌های روغن در طی تیمار دی بی دی سطحی هیدروژنه شوند، متعاقباً نمونه‌های روغن میزان کمتری از باندهای دوگانه در دسترس برای واکنش با اکسیژن خواهند داشت. بنابراین می‌توان گفت که احتمال رخداد اکسیداسیون با افزایش زمان تیمار کاهش می‌یابد با این حال، استراتژی‌های بیشتری، مانند افزودن آنتی‌اکسیدان و طراحی یک محفظه کاملاً مهر و موم شده برای جلوگیری از ورود اکسیژن، می‌تواند برای افزایش پایداری اکسیداتیو روغن مورد استفاده قرار گیرد (Yepez et al., 2020).

- توکوفرول

مطابق نتایج حاصله در جدول ۳، محتوای توکوفرول، نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت، در دو زمان شامل ۰ و ۱۳ ساعت مورد بررسی قرار گرفت که کاهش معناداری در این پارامتر مشاهده گردید ($P < 0.05$)؛ بطوریکه بیشترین و کمترین مقدار در انواع مختلف توکوفرول به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه ۱۳ ساعت بود؛ همچنین براساس نتایج و جدول ۳، بیشترین درصد کاهش مربوط به آلفا توکوفرول بود و سپس گاما توکوفرول حدود ۹۶٪ و در نهایت دلتا توکوفرول کمترین درصد کاهش یعنی حدود ۸۶٪ را داشتند.

در واقع توکوفرول‌ها مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی موجود در روغن‌های گیاهی هستند. نحوه عمل

آن‌ها عمدتاً به دلیل توانایی مهار انتشار رادیکال‌های آزاد از طریق اهدای هیدروژن از گروه فنلی خود به رادیکال‌های پراکسی به منظور تثبیت آن‌ها است. در سیستم‌های بیولوژیکی فعالیت آنتی‌اکسیدانی توکوفرول‌ها در مقابل پراکسیداسیون لیپیدها به صورت $\alpha < \beta < \gamma < \delta$ می‌باشد. همچنین توکوفرول‌ها خاصیت ضد پلیمریزاسیونی نیز دارند، مخصوصاً گاما توکوفرول بیشتر از آلفا توکوفرول این خاصیت را در روغن‌های سرخ کردنی نشان می‌دهد (Belitz et al., 2008).

آلفا توکوفرول نسبت به سایر توکوفرول‌ها سریع‌تر با رادیکال‌های پروکسی واکنش نشان می‌دهد و مصرف می‌شود در مقابل گاما توکوفرول اثربخشی بیشتری نسبت به آلفا توکوفرول در خاصیت‌های آنتی‌اکسیدانی و ضد پلیمریزاسیونی دارند. راندمان بالاتر گاماتوکوفرول در مقایسه با آلفا توکوفرول مبتنی بر پایداری بالاتر گاما توکوفرول و محصولات مختلف واکنشی تشکیل شده در طول واکنش آنتی‌اکسیدانی است. دلتا توکوفرول نیز از گاما توکوفرول پایداری بیشتر دارد پس قاعدتاً مقدار بیشتری از آن بایستی در طی فرایندهای اتواکسیداسیون و پلیمریزاسیون باقی بماند که با توجه به بررسی داده‌های جدول ۳ می‌توان دریافت که در این تحقیق نیز روند تغییرات توکوفرول‌ها به همین صورت می‌باشد (Steel, 2005).

بنابراین این کاهش را می‌توان بدین صورت توجیه نمود که روغن سویا دارای اسیدهای چرب غیر اشباع بالایی است. بنابراین توکوفرول‌ها به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های اهداکننده هیدروژن در برابر رادیکال‌های لیپیدی عمل کنند. به طور کلی پایداری و اثربخشی توکوفرول‌ها در واکنش‌های اکسیداسیونی و پلیمریزاسیونی به ترتیب از آلفا توکوفرول تا گاماتوکوفرول افزایش می‌یابند. در این بخش از مطالعه نیز آلفا توکوفرول و گاماتوکوفرول سریعتر از دلتا توکوفرول مصرف یا تجزیه شدند. (Kasprzak et al., 2020) نتایج مشابهی در خصوص اثرات تیمار پلاسما بر پایداری اکسیداتیو روغن گیاهی ذرت توسط Na و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است.

با توجه به مطالعات پیشین انجام شده می‌توان گفت پایداری حرارتی توکوفرول‌ها متفاوت است به گونه‌ای که پایداری حرارتی دلتا و بتا توکوفرول‌ها بیشتر از آلفا و گاما

هیدروژناسیون اشباع گردیده و میزان استرول‌ها کاهش می‌یابد ولی در خصوص استرول‌های فاقد باند دوگانه در زنجیره جانبی خود مانند کمپسترول دلیل کاهش آن‌ها طی تیمار هیدروژناسیون پلاسما می‌تواند مربوط به باز شدن حلقه سیکلوپروپان باشد (Kmiecik *et al.*, 2021).

بدین صورت که دلتا ۵ اونا استرول حاوی باند دوگانه در زنجیره جانبی خود می‌باشد که ممکن است طی فرایند هیدروژناسیون علاوه بر هیدروژنه شدن این باند دوگانه، به ایزومر موقعیتی خود یعنی دلتا ۷ اونا استرول نیز تبدیل شود. استیگما استرول نیز ممکن است در طی هیدروژناسیون دو ایزومر تولید کند و در صورت هیدروژنه شدن باند دوگانه موجود در زنجیره جانبی خود، بتاسیتوسترول تولید نماید، همچنین با هیدروژنه شدن حلقه سیکلوپروپان موجود در ساختار آن ممکن است، دلتا ۲۲ استیگماستنول ایجاد شود (Kmiecik *et al.*, 2020; Phillip *et al.*, 2002).

اما در خصوص کمپسترول فاقد باند دوگانه در زنجیره جانبی با باز شدن حلقه سیکلوپروپان در طی هیدروژناسیون تبدیل به کمپستانول می‌گردد.

بین میزان دلتا ۷ استیگماستول، دلتا ۷ اونا استرول و بتاسیتوسترول در نمونه تیمار نشده و تیمار شده تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. اما همانطور که در بالا ذکر گردید دلیل افزایش اندک غیر معنی دار دلتا ۷ اونا استرول و بتاسیتوسترول می‌تواند به ترتیب تبدیل دلتا ۵ اونا استرول به دلتا ۷ اونا استرول و استیگما استرول به بتاسیتوسترول در طی فرایند هیدروژناسیون باشد (Duttal & Appelqvist, 1996).

توکوفرول‌ها است و الفا توکوفرول زودتر از سایر توکوفرول‌ها در اثر حرارت از بین می‌رود. بنابراین ممکن است بخشی از توکوفرول‌ها نیز در اثر تجزیه حرارتی از بین رفته باشند. گاما توکوفرول‌ها نسبت به آلفا توکوفرول پایداری گرمایی بیشتری دارند که این موضوع مطابق با مطالعات قبلی می‌باشد که در آن‌ها ثابت شده بود که میزان تجزیه حرارتی توکوفرول‌ها به ترتیب $\alpha > \beta > \gamma > \delta$ است و در مطالعه ای دیگر گفته شده است که آلفا توکوفرول سریع‌تر از گاما توکوفرول مصرف می‌شود. بنابراین گاما توکوفرول ممانعت‌کننده بهتری برای پلی‌میریزاسیون نسبت به الفا توکوفرول در طی ترمواکسیداسیون می‌باشد (Steel, 2005; Lampi, 1998).

در نهایت می‌توان گفت دلیل کاهش توکوفرول‌ها در طی فرایند هیدروژناسیون پلاسما، عمل کردن به نقش آنتی‌اکسیدانی خود جهت جلوگیری از پیشروی اکسیداسیون می‌باشد.

- استرول

مطابق نتایج حاصله در جدول ۴، میزان استرول، نمونه‌های روغن سویا تیمار شده با پلاسما سرد در طی مدت زمان ۱۳ ساعت، در دو زمان شامل ۰ و ۱۳ ساعت مورد بررسی قرار گرفت که کاهش معناداری در این پارامتر مشاهده گردید ($P < 0.05$)؛ بطوریکه بیشترین کاهش مقدار در انواع مختلف استرول به ترتیب مربوط به دلتا-۵ اونا استرول (۳۵/۴۶٪)، استیگما استرول (۲۳/۴۷٪)، کمپسترول (۲۳/۴۶٪) و براسیکااسترول (۲۲/۴۰٪) بود. علت این کاهش می‌تواند به دلیل وجود باند دوگانه در زنجیره جانبی ساختار استرول‌ها به جز کمپسترول باشد که در اثر

جدول ۳- تغییرات میزان توکوفرول نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده با پلاسما سرد دی بی دی سطحی طی ۱۳ ساعت
Table 4- Changes in the amount of tocopherol in crude soybean oil samples treated with DBD cold plasma over 13 hours

Type of tocopherol	Time (hour)	
	0	13
(ppm) Alpha tocopherol	190.2±2 ^a	ND
(ppm) Gamma tocopherol	1026.21±63 ^a	34.7±1.7 ^b
(ppm) Delta tocopherol	381.99±21 ^a	3 ^b ±50.67

Different letters in a row indicate a significant difference ($p < 0.05$).
حروف متفاوت در یک ردیف بیانگر تفاوت معنی‌دار می‌باشد ($p < 0.05$)

این پژوهش به بررسی اثر استفاده از پلاسما سرد DBD سطحی بر کیفیت و هیدروژناسیون روغن سویای خام پرداخته شد. نتایج حاصله نشان داد که در اثر استفاده از پلاسما سرد DBD سطحی، اسیدهای چرب غیر اشباع، محتوای کاروتنوئید، ضریب شکست، اندیس یدی، محتوای توکوفرول، میزان استرول به طور معناداری کاهش و اسیدهای چرب اشباع، اندیس پراکسید و نقطه ذوب افزایش یافتند ($p < 0.05$). همچنین اسیدهای چرب ترانس به صورت خیلی جزئی مشاهده گردید. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان از تیمار ۱۳ ساعته پلاسما دی‌بی‌دی سطحی با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و ترکیب گازی هیدروژن ۵۰٪ و نیتروژن ۵۰٪ به عنوان تکنیک و فناوری نوین در هیدروژناسیون و احتمالاً رنگبری روغن‌های گیاهی استفاده کرد و محصولی با میزان اسید چرب ترانس محدود در سبذ غذایی ارائه نمود.

منابع

- Adu-Mensah, D., Mei, D., Zuo, L., Zhang, Q. & Wang, J. (2019). A review on partial hydrogenation of biodiesel and its influence on fuel properties. *Fuel*, 251, 660-668. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.036>.
- Amorim, D. S., Amorim, I. S., Chisté, R. C., Teixeira Filho, J., Fernandes, F. A. N. & Godoy, H. T. (2023). Effects of cold plasma on chlorophylls, carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Research International*, 112593. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112593>.

در مطالعات Kmiecik و همکاران (۲۰۲۰) و Phillip و همکاران (۲۰۰۲) نشان داده شده است که هیدروژناسیون صنعتی روغن‌های گیاهی می‌تواند باعث کاهش و اصلاح محتوی و ترکیب استرول‌ها به ویژه تبدیل استرول‌ها به همتایان اشباع شده خود، یعنی استانول‌ها گردد و در این مطالعات نیز کاهش در میزان استرول‌های حاوی باند دوگانه در زنجیره جانبی بیشتر از سایر استرول‌ها بود. همچنین تجزیه حرارتی و اکسیداسیون استرول‌ها عوامل دیگری هستند که منجر به تجزیه استرول‌ها به محصولات دیگر و در نتیجه کاهش آن‌ها می‌گردد. اکسیداسیون استرول‌ها به فاکتورهایی مانند دما، زمان فرایند، ترکیب اسیدهای چرب، نوع استرول‌های موجود (استری شده یا آزاد) بستگی دارد. به عنوان مثال Oehrl و همکاران، در طول ۲۰ ساعت حرارت دادن روغن با ترکیبات اسیدهای چرب مختلف، در دماهای 150°C و 180°C درجه‌سانتی‌گراد، تلفات بسیار شدید بتا سیتوسترول و کمپسترول را مشاهده نمودند (Oehrl et al., 2001).

نتیجه‌گیری

امروزه، به علت افزایش نگرانی در مورد اکسیداسیون روغن‌های حاوی اسیدهای چرب چند غیر اشباعی و همچنین محدودیت کاربرد آن‌ها، هیدروژناسیون جزئی آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ اما از سوی دیگر به دلیل ایجاد میزان بالایی از اسید چرب ترانس در روش سنتی، استفاده از این روش محدود شده است. از این رو در

۱۶

جدول ۴- تغییرات میزان استرول نمونه‌های روغن سویا خام تیمار شده با پلاسما سرد دی بی دی سطحی طی ۱۳ ساعت

Table 5- Changes in sterol content of raw soybean oil samples treated with DBD cold plasma over 13 hours

Type of sterol	Time (hour)	
	0	13
Total sterol (ppm)	2636.51±73 ^a	2315.86±62 ^b
Campesterol (ppm)	532.57±25 ^a	407.58±20 ^b
Stigma sterol (ppm)	511.21±32 ^a	391.22±20 ^b
Betasitosterol (ppm)	1334.86±68 ^a	1315.87±65 ^a
Delta 5 on a sterol (ppm)	76.45±7 ^a	49.34±5 ^b
Delta 7 on a sterol (ppm)	31.11±2 ^a	26.11±1 ^b
Brassica sterol (ppm)	24.50±1 ^a	19.01±0.9 ^b
Delta 7 stigmaterol (ppm)	67.23±8 ^a	55.20±2 ^a
Delta 5 and 24 Stigma Ostadi Atoll (ppm)	47.45±1 ^a	42.46±0.8 ^b
other (ppm)	11.07±0.7 ^a	9.07±0.6 ^b

Different letters in a row indicate a significant difference ($p < 0.05$).

حروف متفاوت در یک ردیف بیانگر تفاوت معنی دار می‌باشد ($p < 0.05$)

- Bajaniya, V. K., Kandoliya, U. K., Bodar, N. H., Bhadja, N. V. & Golakiya, B. A. (2015). Fatty acid profile and phytochemical characterization of bael seed (*Aegle marmelos* L.) oil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(2), 97-102.
- Breden, D., Idicheria, C. A., Keum, S., Najt, P. M. & Raja, L. L. (2018). Modeling of a dielectric-barrier discharge-based cold plasma combustion ignition system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(1), 410-418. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2882830>.
- Covaciu, F. D., Berghian-Grosan, C., Feher, I. & Magdas, D. A. (2020). Edible oils differentiation based on the determination of fatty acids profile and Raman spectroscopy—a case study. *Applied Sciences*, 10(23), 8347. <https://doi.org/10.3390/app10238347>.
- Feizollahi, E., Misra, N. N. & Roopesh, M. S. (2021). Factors influencing the antimicrobial efficacy of dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma (ACP) in food processing applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(4), 666-689. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1743967>.
- Fernandes, F. A., Santos, V. O. & Rodrigues, S. (2019). Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of acerola juice. *Food Research International*, 115, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.042>.
- Figueroa-Pinochet, M. F., Castro-Alija, M. J., Tiwari, B. K., Jiménez, J. M., López-Vallecillo, M., Cao, M. J. & Albertos, I. (2022). Dielectric Barrier Discharge for Solid Food Applications. *Nutrients*, 14(21), 4653. <https://doi.org/10.3390/nu14214653>.
- Gebremical, G. G., Emire, S. A. & Berhanu, T. (2019). Effects of multihollow surface dielectric barrier discharge plasma on chemical and antioxidant properties of peanut. *Journal of Food Quality*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3702649>
- Indiarto, R. & Qonit, M. A. H. (2020). A review of soybean oil lipid oxidation and its prevention techniques. *Int. J. Adv. Sci. Technol*, 29(6), 5030-5037.
- Kasprzak, M. (2020). The degradation of bioactive compounds and formation of their oxidation derivatives in refined rapeseed oil during heating in model system. *Lwt*, 123, 109078. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109078>.
- Kehili, M., Choura, S., Zammel, A., Allouche, N. & Sayadi, S. (2018). Oxidative stability of refined olive and sunflower oils supplemented with lycopene-rich oleoresin from tomato peels industrial by-product, during accelerated shelf-life storage. *Food Chemistry*, 246, 295-304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.034>.
- Kmiecik, D., Fedko, M., Rudzińska, M., Siger, A., Gramza-Michałowska, A. & Kobus-Cisowska, J. (2021). Thermooxidation of phytosterol molecules in rapeseed oil during heating: The impact of unsaturation level of the oil. *Foods*, 50, 1–14. <https://doi.org/3390/foods10010050>
- Kongprawes, G., Wongsawaeng, D., Hosemann, P., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W. & Assabumrungrat, S. (2021). Improvement of oxidation stability of fatty acid methyl esters derived from soybean oil via partial hydrogenation using dielectric barrier discharge plasma. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 4519-4533. <https://doi.org/10.1002/er.6121>
- Laguerre, M., Bayrasy, C., Panya, A., Weiss, J., McClements, D. J., Lecomte, J. & Villeneuve, P. (2015). What makes good antioxidants in lipid-based systems? The next theories beyond the polar paradox. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(2), 183-201. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.650335>.
- Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B. & Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*, 312, 110748. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A. & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>
- Motamedzadegan, A., Dehghan, B., Nemati, A., Tirgarian, B. & Safarpour, B. (2020). Functionality improvement of virgin coconut oil through physical blending and chemical interesterification. *SN Applied Sciences*, 2, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03309-6>
- Mukhametov, A., Mamayeva, L., Kazhymurat, A., Akhlan, T. & Yerbulekova, M. (2023). Study of vegetable oils and their blends using infrared reflectance spectroscopy and refractometry. *Food Chemistry: X*, 17, 100386. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100386>
- Na, H., Mok, C. & Lee, J. (2020). Effects of plasma treatment on the oxidative stability of vegetable oil containing antioxidants. *Food chemistry*, 302, 125306. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125306>.
- Nayebzadeh, H., Haghighi, M., Saghatoleslami, N., Alaei, S. & Yousefi, S. (2019). Texture/phase evolution during plasma treatment of microwave-combustion synthesized KOH/Ca12Al14O33-C nanocatalyst for reusability enhancement in conversion of canola oil to biodiesel. *Renewable Energy*, 139, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.122>
- Niveditha, N. V., Jadhav, H. B., Ahlawat, A., Kalaiwendan, R. G. T. & Annature, U. S. (2023). Effect of cold plasma processing on physicochemical characteristics and thermal properties of palm oil. *Future Foods*, 7, 100231. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100231>

- Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). Cold plasma: Background, applications and current trends. *Current Opinion in Food Science*, 16, 49-52. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.008>
- Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/foods7010004>
- Peng, P., Chen, P., Schiappacasse, C., Zhou, N., Anderson, E., Chen, D., ... & Ruan, R. (2018). A review on the non-thermal plasma-assisted ammonia synthesis technologies. *Journal of cleaner production*, 177, 597-609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.229>
- Puprasit, K., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W. & Assabumrungrat, S. (2022). Improved hydrogenation process for margarine production with no trans fatty acid formation by non-thermal plasma with needle-in-tube configuration. *Journal of Food Engineering*, 334, 111167. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111167>
- Puprasit, K., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W. & Assabumrungrat, S. (2020). Non-thermal dielectric barrier discharge plasma hydrogenation for production of margarine with low trans-fatty acid formation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102511. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102511>
- Rezaei, F., Bakhshi, D., Ghazvini, R. F., Majd, D. J. & Pourghayoumi, M. (2014). Evaluation of fatty acid content and nutritional properties of selected native and imported hazelnut (*Corylus avellana* L.) varieties grown in Iran. *Journal of applied botany and food quality*, 87. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2014.087.016>
- Rodrigues, N., Dias, L. G., Veloso, A. C., Pereira, J. A. & Peres, A. M. (2016). Monitoring olive oils quality and oxidative resistance during storage using an electronic tongue. *LWT*, 73, 683-692. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.002>
- Sirati, Z., Gharachorloo, M., Ghomi, H. & Azizinezhad, R. (2023). Production of partially hydrogenated soybean oil with low trans-fatty acids using surface dielectric barrier discharge cold plasma. *Food Science and Technology International*, 1-11. <https://doi.org/10.1177/10820132231186172>
- Subroto, E. & Qonit, M. A. H. (2020). Modification of soy protein for the production of bioactive peptides and their utilization. *Int. J. Sci. Technol. Res*, 9(2), 3121-3127.
- Subroto, E., Pangawikan, A. D., Yarlina, V. P. & Isnaeni, N. F. (2020). Characteristics, purification, and the recent applications of soybean oil in fat-based food products: a review. *International Journal*, 8(7). <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/20872020>
- Suwal, S., Coronel-Aguilera, C. P., Auer, J., Applegate, B., Garner, A. L. & Huang, J. Y. (2019). Mechanism characterization of bacterial inactivation of atmospheric air plasma gas and activated water using bioluminescence technology. *Innovative food science & emerging technologies*, 53, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.007>
- Szabó, É., Csölle, I., Felső, R., Kuellenberg de Gaudry, D., Nyakundi, P. N., Ibrahim, K. & Lohner, S. (2023). Benefits and Harms of Edible Vegetable Oils and Fats Fortified with Vitamins A and D as a Public Health Intervention in the General Population: A Systematic Review of Interventions. *Nutrients*, 15(24), 5135. <https://doi.org/10.3390/nu15245135>
- Teasdale, S. B., Marshall, S., Abbott, K., Cassettari, T., Duve, E. & Fayet-Moore, F. (2022). How should we judge edible oils and fats? An umbrella review of the health effects of nutrient and bioactive components found in edible oils and fats. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(19), 5167-5182. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1882382>
- Thirumdas, R., Kadam, D. & Annapure, U. S. (2017). Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *Food Biophysics*, 12, 129-139. <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9468-5>
- Wongjaikham, W., Kongprawes, G., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W., Hosemann, P. & Assabumrungrat, S. (2022). Production of low trans-fat margarine by partial hydrogenation of palm oil using nature-friendly and catalyst-free microwave plasma technique. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80, 103107. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103107>
- Wongjaikham, W., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W. & Assabumrungrat, S. (2023). Review of Non-Thermal Plasma Technology for Hydrogenation of Vegetable Oils and Biodiesel. *Engineering Journal*, 27(5), 1-27. <https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.5.1>
- Yepez, X. V. & Keener, K. M. (2016). High-voltage atmospheric cold plasma (HVACP) hydrogenation of soybean oil without trans-fatty acids. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.001>
- Yepez, X. V., Baykara, H., Xu, L. & Keener, K. M. (2021). Cold plasma treatment of soybean oil with hydrogen gas. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 98(1), 103-113. <https://doi.org/10.1002/aocs.12416>
- Yepez, X., Baykara, H., Xu, L. & Keener, K. (2020). Atmospheric Cold Plasma Treatment of Soybean Oil with Hydrogen Gas. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/10.22541/au.159164063.35976485>

Cold Plasma Hydrogenation of Soybean Oil using Hydrogen-Nitrogen Gas Composition

Z. Chahardehi Sirati^a, M. Gharachorloo^{b*}, H.R. Ghomi Marzdashti^c, R. Azizinezhad^d

^a PhD Student of the Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^b Professor of the Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^c Associate Professor of the Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

^d Assistant Professor of the Biotechnology and Plant Breeding Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 16 February 2024

Accepted: 31 May 2024

Abstract

Introduction: Due to the high content of unsaturated fatty acids in soybean oil, the possibility of oxidation occurrence in this product is high and its application in the food industry is limited. Therefore, in order to increase the oxidative stability and extend the applications of soybean oil, various modification processes have been investigated. Among modification processes, the hydrogenation process using the cold plasma technology has been considered to produce the partially hydrogenated oil with very low trans fatty acids.

Materials and Methods: this research evaluated the effect of surface dielectric barrier discharge cold plasma on physicochemical properties of soybean oil at 15 kV voltage and 50% hydrogen- 50% nitrogen gas composition for 13-hour treatment. The samples were taken at certain intervals to measure the fatty acid composition, iodine value, refractive index, carotenoid content, melting point, peroxide value, tocopherol, and sterol contents during treatment.

Results: After 13-h treatment, the results showed a decrease in unsaturated fatty acids from 58.62% to 40.24%, carotenoid contents from 26.38 to 6.32 ppm, refractive index from 1.4672 to 1.4400, iodine value from 129.64 to 100.45 and total sterol content from 2636.51 to 2315.86 ppm and an increase in peroxide value from 2.4 to 5.8 meq O₂/kg oil and melting point of 7°C (p<0.05). In addition, the content of trans fatty acids was detected in very small content (0.85%).

Conclusion: According to the obtained results, surface dielectric barrier discharge cold plasma treatment can be used as a new technology for the hydrogenation and probably bleaching of oils.

Keywords: Cold Plasma, Hydrogenation, Physicochemical Properties, Soybean Oil, Trans Fatty Acid.

* Corresponding Author: m_gharachorloo@srbiau.ac.ir