تکنولوژی اکستروژن و کاربردهای آن در صنایع غذایی: یک مقاله مروری

Extrusion Technology and its Application in the Food Industry: A Review Paper

فریبا عابدی اردکانی[1]، محمد رضا اسحاقی[2]

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۲ **پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۱۵**

چکیده:

ضایعات تولید شده در فراوری محصولات غذایی منجر به نگرانی هایی برای محیط زیست شده است و این در حالی است که بسیاری از این ضایعات دارای ارزش تغذیه‌ای قابل توجهی می باشند. از سوی دیگر با توجه به تغییرات سبک زندگی، تمایل به مصرف غذاهای آماده، آماده برای پخت با ارزش غذایی افزایش یافته است. اکستروژن یکی از فناوری های پیشرفته ی است که در کاهش ضایعات کشاورزی و بهبود ارزش افزوده آن ها نقش پر رنگی را ایفا کرده است. در فرایند اکستروژن از مخلوط کردن، شکل دهی، بافت دهی و پختن برای تولید یک محصول غذایی جدید استفاده می‌شود. این تکنولوژی کاربرد وسیعی در تولید محصولات مصرفی انسان، فراوری ضایعات مواد غذایی و غذاهای حیوانات را دارد. مزایای محصولات اکسترد شده شامل تنوع بالا، کیفیت بالا، زمان پردازش پایین، مقرون‌به‌صرفه بودن، رطوبت پایین، ماندگاری طولانی و آلودگی کمتر می‌باشد. پارامترهای مهم پردازش اکستروژن مانند سرعت برش، دما و محتوای آب همه عواملی هستند که در ارزش تغذیه‌ای محصولات اکسترد شده نقش دارند.

کلمات کلیدی: اکستروژن، ویژگی ها، پارامترهای پردازش، ارزش تغذیه‌ای.

مقدمه

در فراوری محصولات کشاورزی، مقدار زیادی ضایعات تولید می‌شود که بر محیط زیست و منابع طبیعی اثرات منفی به دنبال دارد و این امر موجب نگرانب در مدیریت و دفع آنان ایجاد کرده است (Kummu *et al*., 2012). این در حالی است که بیشتر محصولات کشاورزی جانبی مشتق شده از محصولات کشاورزی دارای ارزش تغذیه‌ای بوده و می توان از آن ها در تولید غذا های با ارزش افزوده استفاده کرد (Leonard *et al*., 2020). از سوی دیگر تغییر نسل، تغییر سبک زندگی و محدودیت زمان آزاد، تغییرات رفتاری زیادی را در مصرف غذاها به همراه داشته است. در حال حاضر مصرف کنندگان روزانه غذای آماده و آکاده برای طبخ را با فواید

[1] دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا

[2] استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا

نویسنده مسئول مکاتبات: faribaardakani@gmail.com

غذایی غنی و درمانی انتخاب می کنند (Choton *et al*., 2020). فناوری اکستروژن یکی از روش‌های مقرون به صرفه در صنایع تبدیلی مواد و راهکاری برای برآوردن تقاضای مصرف کنندگان است (Leonard *et al*., 2020 & Choton *et al*., 2020).

توسعه فناوری اکستروژن مواد غذایی را می توان به چهار مرحله تقسیم کرد. مرحله اول قبل از دهه ۱۹۴۰ بود و عمدتا شامل شکل دادن به محصولاتی مانند پاستا توسط اکسترود های تک مارپیچ بود. بین دهه های ۱۹۴۰ تا ۱۹۸۰، فناوری اکستروژن مواد غذایی به مرحله دوم تبدیل شد و اکستروژن به یک فرآیند واکنش بیلوژیکی با رمای بالا و کوتاه مدت (HTST) برای تولید غذای فوری،تنقلات و غذای مغذی برای کودکان تبدیل شد. در دهه ۱۹۸۰ با پیشرفت هایی در زمینه ساختار اکسترودر، فناوری نظارت و روش‌های تجزیه م تحلیل کیفیت اکسترودها، آغاز مرحله سوم رقم خورد. در این دوره، اکسترود های دو مارپیچ به دلیل ظرفیت پردازش بالاتر، مصرف انرژی کمتر (بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوژل بر کیلوگرم) و طیف وسیعی از قابلیت های رطوبت، جایگزین اکسترودر تک مارپیچ (نرخ خشک خوراک ۵٪ تا ۹۵٪) شدند (Zhang *et al*., 2019).

در این مطالعه به تشریح فرآیند اکستروژن، مزایا و معایب، کاربرد آن در صنایع غذایی، پارامترهای پردازش اکستروژن و اثرات اکستروژن بر ارزش تغذیه‌ای محصولات پرداخته شده است. از آنجا که هنوز درک و کاربرد فناوری اکستروژن تا سطح رضایت بخشی فاصله دارد بنابراین این مطالعه می‌تواند یک مرجع مناسبی برای محققین و اپراتورهای فناوری اکستروژن مواد غذایی باشد.

فرآیند اکستروژن، مزایا و معایب

اکستروژن فرآیند پیوسته ای است که در آن مواد غذایی مرطوب، نشاسته ای، پروتیینی از طریق قالب و ترکیبی از رطوبت، فشار، گرما و برش مکانیکی پردازش و تولید می‌شوند (Fellows, 2009). عملیات فرآیند اکستروژن شامل اختلاط، برش، گرم کردن، پمپاژ، شکل دهی و اندازه سازی است که موجب تولید محصول منحصر به فردی می گردد (Fellows, 2009). دستگاهی که مخلوط مواد را به سمت قالب انتهایی هدایت می‌کند اکسترود نام دارد. این دستگاه از یک مارپیچ بزرگ و چرخان که در یک بدنه استوانه ای شکل قرار دارد و در انتهای آن قالبی که منجر به انبساط محصول می‌شود، تشکیل شده است. مخلوط مواد به عنوان اکسترودت شناخته می‌شود (Fellows, 2009). اگر غذا بیش از ۱۰۰ درجه سانتی گراد گرم شود، این فرآیند به‌عنوان پخت اکستروژن (یا اکستروژن داغ) شناخته می‌شود. در این روش گرمای اصطکاکی و هرگونه گرمایش اضافی که استفاده می‌شود، باعث افزایش سریع دما می گردد. اکستروژن سرد که در آن دمای غذا در محیط باقی می ماند، برای مخلوط کردن و شکل دادن به مواد غذایی مانند ماکارونی و فرآورده‌های گوشتی استفاده می‌شود (Bordoloi & Ganguly, 2014). محصولات اکسترد شده دارای رطوبت کم تر، ماندگاری طولانی تر، از نظر تغذیه‌ای غنی و از نظر میکروبی ایمن هستند (Pathak & Kochhar, 2018).

فرآیند دمای بالا ـ زمان کوتاه (HTST) که در طول اکستروژن به کار می رود، ایمنی محصول را بدون تغییر قابل توجهی در ارزش غذایی با غیر فعال کردن آنزیم ها و آلودگی میکروبی تضمین می‌کند (Bordoloi & Ganguly, 2014). با این وجود، بیشتر محصولات اکسترد شده به دلیل تسلط کربوهیدرات های نشاسته ای بر ترکیب آن، از نظر تغذیه‌ای ناکافی هستند و این فرصتی را برای ادغام محصولات جانبی در تلاش برای تنوع بخشیدن به محتوای مواد مغذی اکستروپ ها فراهم میکند (Leonard *et al.*, 2020).

مزایای فناوری اکستروژن به شرح زیر می‌باشد (Choton *et al.*, 2020):

- تطبیق پذیری: طیف وسیعی از محصولات با تغییر مواد تشکیل دهنده، شرایط عملکرد اکسترود و قالب ها قابل تولید می باشند.
- هزینه: اکستروژن نسبت به سایر فرآیند های پخت و شکل دهی هزینه های پردازش کمتر و بهره وری بالاتری دارد.
- بهره وری: اکستروژن یک فرآیند پیوسته با خروجی بالا است.
- کیفیت محصول: فرآیند پخت اکستروژن شامل زمان کوتاه دمای بالا است که بسیاری از اجزای حساس به حرارت را حفظ می‌کند و از دست دادن مواد مغذی و طعم را به حداقل می رساند.
- سازگار با محیط زیست: به‌عنوان یک فرآیند با رطوبا کم، پخت اکستروژن پساب فرآیند قابل توجهی تولید نمی‌کند.
- بازدهی انرژی: پخت مواد غذایی در فرآیند اکستروژن با رطوبت نسبتا کم انجام می‌شود. در رطوبت کم، حرارت مورد نیاز برای پخت و خشک کردن مجدد محصول پس از پخت کاهش می‌یابد.
- تولید محصولات غذایی جدید: اکسترودرها می توانند نشاسته، پروتیین و سایر مواد غذایی را برای تولید طیف گسترده ای از محصولات غذایی جدید اصلاح کنند.

معایب فناوری اکستروژن به شرح زیر می‌باشد (Choton *et al.*, 2020):

- کاهش رنگ محصول به دلیل فرایند انبساط در حرارت زیاد.
- دماهای بالا و شرایط رطوبت کم در فرایند اکستروژن، می‌تواند منجر به واکنش های شیمیایی مختلفی مانند قهوه ای شدن غیر آنزیمی و کاراملی شدن گردد.
- عملیات حرارتی مواد غذایی حاوی پروتئین و قندهای کاهنده معمولا منجر به بدتر شدن ویژگی تغذیه ایپروتئین ها (لیزین) میشود.

کاربرد فناوری اکستروژن

اکستروژن یک فناوری اقتصادی برای ترکیب محصولات فرعی فرآوری مواد غذایی و باقیمانده ها به جریان غذا ارائه می‌کند. فناوری اکستروژن در صنایع فرآوری مواد غذایی برای تولید غذاهای اکسترود شده مصرفی انسانی، غذاهای حیوانات خانگی و ارزش افزودن ضایعات مواد غذایی و محصولات جانبی استفاده می‌شود:

الف) محصولات مصرفی انسانی از اکستروژن در تولید طیف گسترده ای از محصولات مانند تنقلات، غلات صبحانه، فرآورده‌های شبه گوشت و شبه پنیر، غذاهای مکمل، غذاهای مخصوص نوزادان و سایر غذاهای بافت دار استفاده میشود (Choton *et al.*, 2020). در فرایند HTST اکستروژن، محصولات جویدنی و ژلاتینه شده مانند صمغ های میوه ای تشکیل شده از شکر، گلوکز و نشاسته تولید می‌شود که قابلیت افزودن رنگ ها و طعم دهنده های مختلف را دارد. همچنین بافت محصول را با تغییر فرمولاسیون و شرایط فراوری تغییر داد و با تغییر قالب اشکال متنوعی تولید نمود (Tegge & Fellows, 1988).

ب) ضایعات فرآوری مواد غذایی: ضایعات فراوری مواد غذایی از میوه ها و سبزی های فرآوری شده، لبنیات و فرآورده‌های گوشتی، آسیاب غلات و محصولات نانوایی، شکر و محصولات قنادی، فرآوری چربی و روغن، نوشیدنی ها و سایر بقایای مواد غذایی مختلف تولید می‌شوند. این محصولات جانبی منابع ارزشمندی از آنتی اکسیدان ها، اسیدهای چرب ضروری، فیبر غذایی، مواد معدنی، ویتامین ها و مواد شیمیایی گیاهی از جمله پلی فنول ها، کاروتنوئیدها، فیتواسترول ها و هسپریدین هستند. طیف متنوعی از غذاهای اکسترود شده با استفاده از محصولات جانبی صنایع غذایی در فرایند پخت اکستروژن با هزینه کم ایجاد شده اند. ضایعات فراوری مواد غذایی بر ویژگی های بافتی، عملکردی، حسی، فیزیکی و تغذیه‌ای محصولات جانبی تولید شده تأثیر می گذارند (Altan & Maskan, 2011).

ج) غذاهای حیوانات خانگی و خوراک حیوانات: از اکستروژن برای تهیه غذاهای منبسط شده نیمه مرطوب و خشک حیوانات خانگی، غذای آبزیان و غذاهای حیوانات آزمایشگاهی استفاده میشود. فرایند استروژن امکان استفاده بهتر از غلات موجود، پروتئین های گیاهی و حیوانی را برای غذاهای حیوانات فراهم کرده است (Ramachandra & Thejaswini, 2015).

پارامترهای پردازش اکستروژن

کیفیت در فرآیند تولید به این معناست که ویژگی های عملکرد محصول و خود فرآیند برای برآوردن اهداف خاص طراحی شده اند؛ بنابراین، پیش بینی دقیق کیفیت نقش اساسی در ارائه محصولات با کیفیت بالا برای افزایش بیشتر رقابت دارد. (García *et al.*, 2019) در فرایند اکستروژن، متغیرهای پردازشی مختلفی وجود دارد که میتوان آنها را تنظیم کرد. این متغیرها هر یک عملکرد

خاص خود را دارد و درعین‌حال با پارامترهای دیگر در کنترل کل فرآیند ارتباط دارند. پارامترهای پردازش متغیرهایی هستند که می توانند برای بهینه سازی فرمول محصول تولید شده تغییر کنند. بنابراین، یافتن بهترین و مناسب ترین پارامتر پردازش گامی مهم در تولید اکستروژن به حساب می آید. (Alshetaili *et al*., 2020) همبستگی بین پارامترهای پردازش می‌تواند برای خودکارسازی و کنترل فرآیند اکستروژن استفاده شود (Andersson & Hedlund, 1990) و کیفیت محصول نهایی به شدت تحت تأثیر شرایط پردازش قرار دارد (Bouasla & Wójtowicz, 2019).

مطالعات اولیه در مورد پردازش اکستروژن مواد غذایی عمدتا بر تأثیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی دما و رطوبت اکستروژن بر ویژگی های محصول متمرکز بود. در همین راستا، مزلان و همکاران (Mazlan *et al*., 2019) و هاشمی و همکاران (2017 ,Hashemi *et al*.) مشاهده کردند که نسبت انبساط و چگالی ظاهری محصول به طور قابل توجهی تحت تأثیر رطوبت و دمای اکستروژن قرار دارد. در مطالعه لیو و همکاران (Luo *et al*., 2020) افزایش سختی اکسترود و کاهش تردی ناشی از افزایش رطوبت خوراک گزارش شد (Luo *et al*., 2020). بواسلاو همکاران (Bouasla *et al*., 2019) نشان دادند که افزایش رطوبت مواد خام و کاهش دمای اکستروژن باعث افزایش افت پخت و چسبندگی می‌شود (Bouasla & Wójtowicz, 2019). اثرات دمای اکستروژن، بر کیفیت غذایی مبهم است. اثرات مفید دمای اکستروژن شامل تخریب عوامل ضد تغذیه، ژلاتینه شدن نشاسته، افزایش فیبر محلول غذایی و کاهش اکسیداسیون لیپید می‌باشد. از طرف دیگر، واکنش های میلارد بین پروتئین و قندها، ارزش غذایی پروتئین را بسته به نوع مواد اولیه آنها، ترکیب آنها و شرایط فرآیند کاهش میدهد. ویتامین های حساس به گرما ممکن است به میزان های مختلف از بین بروند. تغییرات در پروتئین ها و مشخصات اسیدهای آمینه، کربوهیدراتها، فیبر غذایی، ویتامین ها، محتوای مواد معدنی و برخی از اجزای سالم غیر مغذی غذا ممکن است مفید یا مضر باشد (Singh *et al*., 2007). در مطالعات بعدی اهمیت متغیرهای فرآیندی مانند طراحی مارپیچ، سرعت مارپیچ و تغذیه، بر محصول نهایی بررسی شد. در فرایند اکستروژن، ورز دادن برای اختلاط و برش ایده آل مواد، الزامی است. ورز دادن، همگن سازی و تعامل بهینه بین مواد را تضمین می‌کند. سرعت مارپیچ باید برای هر برنامه تطبیق داده شود. سرعت بالای مارپیچ موجب کاهش زمان ماند و درعین‌حال داشتن ظرفیت برشی و اختلاط بالا، گردد اما در مورد کریستالیزاسیون، برای افزایش زمان ماند باید از سرعت مارپیچ کمتر استفاده کرد که به تشکیل کریستال اجازه میدهد (Thiry *et al*., 2015). گزارش شده است دما، سرعت مارپیچ، رطوبت خوراک و نرخ خوراک بر روی دومتغیر بازده فرآیند (در صد گشتاور و انرژی ویژه ورودی) و کیفیت محصول (نسبت چگالی، نسبت سختی و رنگ) تأثیر دارد. افزایش دمای محصول یا رطوبت خوراک هم انرژی ورودی ویژه و هم درصد گشتاور را کاهش میدهد. سرعت مارپیچ بالاتر باعث کاهش درصد گشتاور اما افزایش انرژی ورودی ویژه و افزایش نرخ تغذیه می گردد (Hsieh *et al*., 1990).

برخی از مدل های ریاضی برای بهبود فرایند، بررسی اثرات پارامترهای پردازش اکستروژن و پیش بینی خواص محصول اکسترود شده گسترش پیدا کرده اند (Hyvärinen *et al*., 2020). علاوه بر این، از انواع مختلف روشهای آماری از جمله تکنیک های طراحی آزمایش (DOE) مانند طراحی تاگوچی (Shen *et al*., 2007)، طراحی باکس _بنکن (Maddineni *et al*., 2014)، و همچنین از روش پاسخ سطح (Maddineni *et al*., 2014) برای بهینه سازی پارامترهای پردازش استفاده گردیده است.

طبقه‌بندی اکستروژن ها

اکستروژن ها به دلیل دمای بالا بر کیفیت محصولات غذایی که همراه با تغییر در خواص فیزیکوشیمیایی است، تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که ماهیت پروتئین، نشاسته و سایر ترکیبات به دلیل تغییر در ساختار شیمیایی تغییر خواهد کرد، انواع مختلفی از اکسترودر برای تولید اقلام اکسترود شده استفاده می‌شود. اکستروژن بر اساس دو مبنا یعنی عملیات و ساخت طبقه‌بندی می‌شود. اکسترودر بر اساس عملکرد به دو دسته اکسترودر گرم و اکسترودر سرد و بر اساس عملکرد به دو پیچ و تک پیچ طبقه‌بندی می‌شود.

اکسترودر سرد

افزایش دمای پخت در فرایند اکستروژن معمولی منجر به تغییر رنگ پروتئین‌های آب پنیر از واکنش میلارد، راسمی شدن پروتئین، تخریب اسیدهای آمینه و سایر مشکلات می‌شود (Pordesimo & Onwulata, 2008). در اکستروژن سرد گرمایش مواد غذایی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. در اکستروژن سرد دمای مواد غذایی ثابت بوده و برای شکل دادن و مخلوط کردن مواد غذایی از جمله فرآورده‌های گوشتی و ماکارونی استفاده می‌شود. از دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز برای اکستروژن فشار کم استفاده می‌شود که بیشتر در تهیه غذای حیوانات خانگی کاربرد دارد. برای نگهداری محصولات سرد اکسترود شده از روش‌های سرد کردن، پخت یا خشک کردن استفاده می‌شود. پخت اکستروژن میکروارگانیسم‌های آلوده را از بین می‌برد و خشک کردن، موجب نگهداری محصولات غذایی برای مدت طولانی‌تری می‌شود. بسته‌بندی محصولات خشک از اکسید شدن و جذب رطوبت در حین نگهداری جلوگیری می‌کند. اکسترودرهای سرد برای صنایع در مقیاس کوچک و همچنین برای مصارف خانگی مناسب هستند و نسبت به اکسترودرهای گرم ارزان‌تر هستند (Shelar & Gaikwad, 2019).

اکسترودر گرم

اکستروژن گرم به‌عنوان پخت اکستروژن نیز شناخته می‌شود که در آن دمای غذا به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در این روش از گرمایش اصطکاکی و سایر روش‌های گرمایشی برای افزایش سریع دما استفاده می‌شود. مواد غذای تحت دما، برش

و فشار بالا قرار می‌گیرند و در نهایت پس از عبور از قالب شکل دهنده به‌سرعت خنک می‌شوند تا رطوبت به شکل بخار خارج گردد. در این روش محصولات با اشکال مختلف مانند صدفی، دونات، نواری، میله‌ای و غیره تولید می‌شوند. انواع مختلفی از محصولات غذایی با پخت اکستروژن از جمله غلات پف کرده، غذاهای میان وعده منبسط شده و غیره تشکیل می‌شوند. نوع مواد غذایی و کنترل شرایط فرایند اکستروژن عوامل اصلی کیفیت محصول تولید شده هستند (Shelar & Gaikwad, 2019). همان‌طور که بیان گردید، اکسترودرها تجهیزات تک پیچ یا دو پیچ هستند. اکسترودرهای دو مارپیچ برای صنایع کوچک مقرون به صرفه نیستند، زیرا در مقایسه با اکسترودر تک پیچ هزینه نگهداری و سرمایه بالایی دارند.

اکسترودر تک پیچ

اکسترودر تک پیچ شامل یک پیچ است که به‌طور مداوم در محفظه اکسترودر می‌چرخد. اکسترودرهای تک پیچی که به‌طور منظم مورد استفاده قرار می‌گیرند، گام ثابتی دارند (Shelar & Gaikwad, 2019). سرعت پیچ عامل اصلی مؤثر بر عملکرد می‌باشد و بر روی زمان ماند محصول، الگوی جریان، نرخ جریان محصول و مصرف برق تأثیر دارد (Bruin *et al*., 1978). در یک اکسترودر تک پیچ، مواد در امتداد محور پیچ تنها از طریق اصطکاک با دیواره محفظه منتقل می‌شوند، درحالی‌که محدودیت جریان در خروجی اکسترودر باعث ایجاد گرادیان فشاری می‌شود که جریان فشار مخالف جریان مواد را القا می‌کند؛ بنابراین، در مورد اکستروژن تک پیچ، توان اکسترودر به‌سرعت پیچ بستگی دارد (Bouvier & Campanella, 2014).

اکسترودر دو پیچ

در اکسترودرهای دو پیچ، دو پیچ موازی دوار با طول یکسان در محفظه اکسترودر وجود دارد که هم‌جهت یا خلاف جهت هم چرخش دارند. ساختار اکسترودر دو پیچ نسبت به اکسترودرهای تک پیچ پیچیده‌تر بوده و این در حالی است که امکان کنترل بهتری بر روی فرایند اکستروژن را فراهم می کند و در نتیجه پمپاژ توسط پیچ‌ها و جریان محصول در محفظه یکنواخت‌تر صورت خواهد گرفت (Shelar & Gaikwad, 2019). همچنین در این اکسترودرها اختلاط یکنواخت و انتقال حرارت بهتر است (Uitterhaegen & Evon, 2017).

اثرات اکستروژن بر ارزش تغذیه‌ای محصولات

پروتئین و اسیدهای آمینه

فرایند اکستروژن با شکستن پیوندهای موجود و اتصال متقابل آن‌ها با سایر مواد مغذی و تشکیل ترکیبات جدید بر خواص ذاتی پروتئین گیاهی تأثیر دارد. شرایط اکستروژن می‌تواند موجب بهبود یا اختلال در هضم پروتئین گردد. در دمای بالای فرایند

اکستروژن، پروتئین دناتوره شده به همراه باقیمانده های آبگریز پنهان در ساختار فشرده پروتئین با تشکیل پیوندهای دی سولفیدی و آبگریز جدید موجب کاهش قابل توجه قابلیت فرآیند هضم پروتئینی می‌شود (Bjorck & Asp, 1983). لازم به ذکر است که در شرایط مناسب، فرایند اکستروژن می‌تواند با دناتوره شدن پروتئین و با قرار گرفتن در معرض باقیمانده های آبگریز، سطح بالاتری از پروتئین را برای هضم آنزیمی فراهم سازد (Arêas *et al*., 2016). حفظ کیفیت پروفایل اسید آمینه های پروتئین به ویژه لیزین، سیستئین و آرژنین که ناپایدارترین اسیدهای آمینه های پروتئین هستند تحت تأثیر شرایط پردازش اکستروژن به ویژه دما و رطوبت می باشند (Singh *et al*., 2007).

لیپید

لیپید ها در ساختار مواد غذایی بر فرایند اکستروژن تأثیر متفاوتی دارند. در مقادیر کم لیپیدها، اصطکاک لازم برای انتقال انرژی مکانیکی و گرمای کاهش می‌یابد و از سوی دیگر می‌تواند به‌عنوان یک نرم کننده موجب افزایش چسبندگی بافت گردد (Leonard *et al*.,2020). غذاهای اکسترود شده، به ویژه محصولات منبسط شده، مستعد اکسیداسیون لیپید هستند. اکسیداسیون لیپید یکی از دلایل اصلی خراب شدن مواد غذایی است و اگر قرار است استفاده از اکسترودر برای تولید مواد غذایی افزایش یابد، پیشگیری کاهش اکسیداسیون لیپید باید برای حفظ مقبولیت مصرف کننده بهبود یابد. محتوای چربی به ویژه میزان چربی های غیراشباع و اسید لینولنیک، عوامل مهمی برای تعیین احتمال اکسیداسیون در همه غذاها هستند. عواملی که باعث اکسیداسیون در غذاهای اکسترود شده می‌شوند عبارت اند از: رطوبت کم، افزایشسطح به دلیل انبساط و سطوح بالاتر آهن و کاتالیزور اکسیداسیون به دلیل سایش مارپیچ و بشکه در طول اکستروژن. لیپاز و سایر آنزیم هایی که ممکن است به اکسیداسیون کمک کنند معمولا در طول اکستروژن دناتوره می‌شوند. عامل دیگری که ممکن است اکسیداسیون را به تأخیر بیندازد، تشکیل کمپلکس های لیپید آمیلوز در حین اکستروژن است (Viscidi *et al*., 2004). تأثیر دما نیز بر کاهش محتوای لیپید در طول اکستروژن گزارش شده است. دمای بالاتر، در ترکیب با تنش برشی، چربیهای جامد را به روغن مایع ذوب می‌کند، در نتیجه این عمل باعث انتقال روغن به خارج از سیستم غذایی می‌شود (Leonard *et al*., 2020). علاوه بر این، تشکیل کمپلکس لیپید- نشاسته و لیپید - پروتئین ممکن است منجر به بازده استخراج روغن کمتر از محصولات اکسترود شده شود (Ye *et al*., 2018).

نشاسته

نشاسته از دو مولکول پلیمر آلفا گلوکان آمیلوز و آمیلوپکتین تشکیل شده است. به‌طورکلی نشاسته مصرف شده توسط انسان به استثنای چند غذا مانند هویج ژلاتینه شده است. ژلاتینه شدن نشاسته معمولا با حرارت دادن نشاسته با آب حاصل می‌شود. در یک

اکسترودر، در حضور آب دانه های نشاسته هیدراته، متورم و تجزیه می‌شوند (Wang *et al*., 2017). انبساط نشاسته در بافت محصول موجب ترد شدن آن می گردد. مهمترین تغییرات نشاسته در فرایند اکستروژن، ژلاتینه شدن، پلیمریزاسیون و دکسترین شدن آنها است. دمای بالای استفاده شده در اکستروژن ساختار کریستالی نشاسته را مختل می‌کند و پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی را میشکند؛ بنابراین، در دسترس بودن بیشتر مکان های اتصال هیدروژن، همراه با دفع مولکولهای آمیلوز، به دانه های نشاسته اجازه میدهد تا رطوبت را جذب کرده و متورم شوند. با کاهش ناگهانی فشار در خروجی قالب و تبخیر آب، خاصیت انبساط و نگهداری گاز فراهم می‌شود که در محصولات غذایی اکسترود شده مطلوب است. تغییرات نشاسته در فرایند استروژن تحت تأثیر دمای فرایند و رطوبت محصول است. دمای بالا موجب آسیب دیدن یکپارچگی گرانول نشاسته و تبدیل آن از حالت کریستالی مرتب به حالت نامرتب- آمورف می‌شود (Lai & Kokini, 1991). همچنین در شرایط کم رطوبتی کم و تنش برشی بالا از هیدرولیز و پلیمریزاسیون مجدد نشاسته فرآیند دکسترینه شدن رخ می دهد (Rafiq *et al*., 2017). اکستروژن با از بین بردن پیوند های هیدروژنی کوالانسی و ساختار دانه های نشاسته، با افزایش قابلیت هضم نشاسته مقاومت کم تری در برابر هضم آنزیمی ایجاد می‌کند. قابلیت هضم نشاسته با رطوبت بالاتر مواد و دمای بالاتر فرآیند بهبود می‌یابد (Guha *et al*., 1997). تنش برشی بالا همچنین سطح موجود برای هیدرولیز را افزایش می دهد. با این وجود، کاهش قابلیت هضم نشاسته نیز می‌تواند پس از اکستروژن به دلیل رطوبت کم مواد خام و تشکیل کمپلکس های آمیلوز-لیپید و پروتیین- نشاسته را دهد (Menis-Henrique *et al*., 2020).

فیبر

وجود فیبر در محصولات اکسترود شده اغلب منجر به کاهش حجم انبساط و بافت شده که کمتر توسط مصرف کنندگان ترجیح داده می‌شود. با این وجود، فیبر محلول حجم های انبساط بیشتری را فراهم می‌کند درحالی که بر چگالی ظاهری محصولات اکسترود شده کمتر از فیبر نامحلول تأثیر می گذارند. تفاوت در رفتار انبساط و خواص بافتی مرتبط بین الیاف محلول و نامحلول را می توان با برهمکنش آنها با نشاسته، تفاوت در جذب آب و رفتار پلاستیسیشن و همچنین با دگرگونی های فیزیکوشیمیایی آنها در طول اکستروژن توضیح داد. اصلاح فیبر نامحلول، قبل از اکستروژن، می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص بافت و انبساط آنها را بهبود بخشد (Wang & Klopfestein, 1993).

اکستروژن به‌طور کلی محتوای کل فیبر را افزایش میدهد. دما، فشار، سرعت مارپیچ و رطوبت بالاتر باعث افزایش محتوای کل فیبر می‌شود اما پس از یک نقطه برش مشخص، محتوای کل فیبر ثابت یا حتی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در یک مطالعه (Gualberto *et al*., 1997) افزایش دو برابری در حلالیت فیبر سبوس گندم پس از اکستروژن گزارش گردید در حالی‌که در مطالعه

ای دیگر (Riaz *et al*., 2009) تأثیر اکستروژن بر حلالیت الیاف محسوس نبود. تفاوت در شرایط فرایند و خواص مواد خام (رقم و اندازه ذرات) می‌تواند نتایج متفاوتی را ایجاد کند (Wang & Klopfestein, 1993).

ویتامین ها

ویتامین ها (محلول در چربی و آب) مواد غذایی حیاتی برای زندگی سالم هستند که بدن ما برای متابولیسم طبیعی مورد نیاز است. ویتامین ها در اکثر مواد غذایی طبیعی به مقدار کم وجود دارند و زمانی که غذا از طریق پردازش حرارتی اکستروژن فرآوری می‌شود، مقدار قابل توجهی از ویتامین های موجود آن از بین می رود. در حین اکستروژن، عواملی مانند دمای محفظه، دور مارپیچ، رطوبت مواد، قطر قالب و توان عملیاتی بر حفظ ویتامین ها در ماده غذایی تأثیر می‌گذارد (Brennan *et al*., 2011). حساس ترین ویتامین ها به فرآیند اکستروژن ویتامین A و E از ویتامین های محلول در چربی و ویتامین B1 , C و اسیدفولیک از ویتامین های محلول در آب هستند. ویتامین E یا به شکل کمپلکس آن در طول پردازش و حتی در نگهداری مواد غذایی اکسترود شده کاملا ناپایدار است. اسید اسکوربیک که به‌طور مستقیم اضافه شده یا با چربی پوشانده شده و سپس در طی اکستروژن به خوراک اضافه می‌شود نیز بسیار ناپایدار است (Brennan *et al*., 2011). شرایط رطوبت کم و دمای بالا باعث تسریع تخریب اسید اسکوربیک در طول اکستروژن می‌شود (Boyaci *et al*., 2012). ویتامین های A, C, D و E نیز به اکسیداسیون حساس هستند و همچنین این ویتامین ها حداقل ماندگاری را در زمینه ی طول نگهداری مواد غذایی اکسترود شده دارند (Brennan *et al*., 2011) سایر ویتامینهای گروه B مانند B6, B12, B2, نیاسن، کلسیم پانتوتنات و بیوتین در حین اکستروژن پایدار هستند (Brennan *et al*., 2011). رطوبت خوراک بالاتر و دمای پایین تر به‌طور کلی با حفظ بیشتر این ویتامین ها مرتبط است (Zieliński *et al*., 2006).

- پلی فنول و آنتی اکسیدان ها

پلی فنول ها ترکیباتی هستند که به‌طور طبیعی در میوه ها و سبزیجات یافت می‌شوند. این ترکیبات در به تأخیر انداختن فرایند اکسیداسیون مواد غذایی نقش مؤثری را ایفا می کنند. فرایند اکستروژن می‌تواند از طریق انتشار ترکیبات زیست فعال از ماتریکس دیواره سلولی منجر به افزایش قابل توجهی در محتوای فنل کل و آنتی اکسیدان گردد (Repo-Carrasco-Valencia *et al*., 2009). اما با این حال مطالعات متعددی نشان داده اند که پردازش اکستروژن در دما و رطوبت بالا به طور قابل توجهی ترکیبات زیست فعال قابل اندازه گیری در محصولات غذایی را کاهش می دهد (Altan *et al*., 2009). بیشتر ترکیبات زیست فعال حساس به دما هستند و دمای محفظه اکسترودر نقش بسزایی در پایداری این زیست فعال ها دارد. در حین اکستروژن ممکن است ترکیبات فنلی

به دلیل دمای بالای محفظه دچار دکربوکسیلاسیون شومد. همچنین رطوبت بالا ممکن است باعث پلیمریزاسیون فنل ها و تانل ها شود که منجر به کاهش قابلیت استخراج و فعالیت آنتی اکسیدانی می گردد (Boyaci *et al*., 2012).

جمع بندی

اکستروژن فرایندی با پتانسیل ها و مزایای بسیار زیادی است که بسیار مورد توجه تحقیقات و کاربردهای فراوان قرار گرفته است. بررسی مطالعات نشان میدهد پردازش اکستروژن تطبیق پذیری زیادی برای توسعه محصولات غذایی کم هزینه، مغذی با تولید راحت را فراهم کرده است. محصولات اکسترود شده علاوه بر کاهش قابل توجه ضایعات کشاورزی، پتانسیل جایگزینی با میان وعده های معمولی با ارزش تغذیه‌ای پایین را دارند. از سوی دیگر با توجه به تأثیر قابل توجهی که شرایط فرایند اکستروژن بر کیفیت محصول تولیدی دارد، نیاز به مطالعات تکمیلی به منظور درک بهتر و بهینه سازی پارامترهای پردازش اکستروژن با خواص فیزیکوشیمیایی مطلوب و حداقل تلفات غذایی می‌باشد.

منابع **Refrences**

1. **Alshetaili A, Alshahrani SM, Almutairy BK, Repka MA. 2020** Hot melt extrusion proccessing parameters optimization. Processe. Nov;8(11):1616.

2. **Altan A, Maskan M. 2011** Development of extruded foods by utilizing food industry by products. Advances in Food Extrusion Technology. CRC Press, Boca Raton, FL. Oct 20:121-60.

3. **Altan A, McCarthy KL, Maskan M. 2009** Effect of extrusion process on antioxidant activity, total phenolics and B-glucan content of extrudates developed from barley-fruit and vegetable by-products. International journal of food science & technology. Jun;44(6):1263-71.

4. **Andersson Y, Hedlund B. 1990** Extruded wheat flour: correlation between processing and product quality parameters. Food wuality and preferences. Jan 1;2(4):201-16.

5. **Arêas JA, Rocha-Olivieri CM, Marques MR. 2016** Extrusion cooking: Chemical and nutritional changes. Encyclopedia of food and health. 569-575.

6. **Bjorck I, ASP N. 1983** the effects of extrusion cooking on nutrition value-a literature review" journal of Food Engineering. 2:281-308.

7. **Bordoloi R, Ganguly S. 2014** Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. Indian Journal of Scientific Reasearch and Technology. 2(1):1-3.

8. **Bouasla A, Wójtowicz A. 2019** Rice-buckwheat gluten-free pasta: Effect of processing parameters on quality characteristics and optimization of extrusion-cooking process. Foods Oct;8(10):496.

9. **Bouvier JM, Campanella OH. 2014** Extrusion processing technology: Food and non-food biomaterials.

10. **Boyaci BB, Han JY, Masatcioglu MT, Yalcin E, Celik S, Ryu GH, Koksel H. 2012**Effects of cold extrusion process on thiamine and riboflavin contents of fortified corn extrudates. Food Chemistry. Jun 15;132(4):2165-70.

11. **Brennan C, Brennan M, Derbyshire E, Tiwari BK. 2011** Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins

and antioxidant activity of foods. Trends in Food Science & Technology. Oct 1;22(10):570-5.

12. **Bruin S, Van Zuilichem DJ, Stolp W. 1978** A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single-screw extruder. Journal of Food Process Engineering. Jan;2(1):1-37.

13. **Choton S, Gupta N, Bandral JD, Anjum N, Choudary A. 2020** Extrusion technology and its application in in food processing: A review. The Pharma Innovation Journal. 9(2):162-8.

14. **Fellows PJ. 2009** Food processing technology: principles and practice. Elsevier; Jun 22.

15. **García V, Sánchez JS, Rodríguez-Picón LA, Méndez-González LC, Ochoa-Domínguez HD. 2019** Using regression models for predicting the product quality in a tubing extrusion process. Journal of Intelligent Manufacturing. Aug;30(6):2535-44.

16. **Gualberto DG, Bergman CJ, Kazemzadeh M, Weber CW. 1997** Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans. Plant Foods for Human Nutrition. Oct;51(3):187-98.

17. **Guha M, Ali SZ, Bhattacharya S. 1997** Twin-screw extrusion of rice flour without a die: effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. Journal of Food Engineering. May 1;32(3):251-67.

18. **Hashemi N, Mortazavi SA, Milani E, Tabatabai Yazdi F. 2017** Microstructural and textual properties of puffed snack prepared from partially deffated almond powder and corn flour. Journal of Food Processing and Preservation. Oct;41(5):e13210.

19. **Hsieh F, Peng IC, Huff HE. 1990** Effects of salt, sugar and screw speed on processing and product variables of corn meal extruded with a twin-screw extruder. Journal of Food Science. Jan;55(1):224-7.

20. **Hyvärinen M, Jabeen R, Kärki T. 2020** The modelling of extrusion processes for polymers- A review. Polymers. Jun;12(6):1306.

21. **Kummu M, De Moel H, Porkka M, Siebert S, Varis O, Ward PJ. 2012** Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. Science of the total environment. Nov 1;438:477-89.

22. **Lai LS, Kokini JL. 1991** Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion (a review). Biotechnology progress. May;7(3):251-66.

23. **Leonard W, Zhang P, Ying D, Fang Z. 2020** Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. Jan;19(1):218-46.

24. **Luo S, Chan E, Masatcioglu MT, Erkinbaev C, Paliwal J, Koksel F. 2020** Effects of extrusion conditions and nitrogen injection on physical, mechanical, and microstructural properties of red lentil puffed snacks. Food and Bioproducts Processing. May 1;121:143-53.

25. **Maddineni S, Battu SK, Morott J, Soumyajit M, Repka MA. 2014** Formulation optimization of hot-melt extruded abuse deterrent pellet dosage form utilizing design of experiments. Journal od Pharmacy and Pharmocology. Feb;66(2):309-22.

26. **Mazlan M, Talib RA, Mail NF, Taip FS, Chin NL, Sulaiman R, Shukri R, Mohd Nor Mz. 2019**

Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss. International Journal of Food Properties. Jan 1;22(1):54-70.

27. **Menis-Henrique ME, Scarton M, Piran MV, Clerici MT. 2020** Cereal fiber: extrusion modifications for food food industry. Current opinion in food science. Jun 1;33:141-8.

28. **Pathak N, Kochhar A. 2018** Extrusion technology: Solution to develop quality snacks for malnourished generation. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 7(1):1293-307.

29.**Pordesimo LO, Onwulata CI. 2008** Whey texturization for snacks. InWhey processing, functionality and health benefits. Wiley-Blackwell Publishing and IFT Press, Ames, IA. Jun;27 (pp. 213-226).

30. **Rafiq A, Sharma S, Singh B. 2017** Regression analysis of gluten-free pasta from brown rice for charaterization and in vitro digestibility. Journal of Food Processing and Preservation. Apr;41(2):e12830.

31. **Ramachandra HG, Thejaswini ML. 2015** Extrusion technology: A novel method of food processing. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2(4):358-69.

32. **Repo-Carrasco-Valencia R, Acevedo de La Cruz A, Icochea Alvarez JC, Kallio H. 2009** Chemical and functional characterization of kaniwa (Chenopodium pallidicaule) grain, extrudate and bran. Plant Plant foods for human nutrition. Jun;64(2):94-101.

33. **Riaz MN, Asif M, Ali R. Stability of vitamins during extrusion. 2009** Critical Reviews in Food Science and and Nutrition. Feb 24;49(4):361-8.

34. **Shelar GA, Gaikwad ST. 2019** Extrusion in food processing: An overview. The Pharma Innovation Journal. 8(2):562-8.

35. **Shen C, Wang L, Cao W, Qian L. 2007** Investigation of the effect of molding variables on sink marks of of plastic injection molded parts using Taguchi DOE technique. Polymer-Plastics Technology and Engineering. Mar 8;46(3):219-25.

36. **Singh S, Gamlath S, Wakeling L. 2007** Nutritional aspects of food extrusion: a review. International Journal of Food Science & Technology. Aug;42(8):916-29.

37. **Tegge G. Fellows, P. 1988** Food processing technology-principles and practice. VCH Verlagsgesellsellschaft mbH, Weinheim; Basel; Cambridge; New York. 1988. 505 pages, with 169 figures and 85 tables. Hardcover DM 180,00. ISBN 3-527–26626–7.

38. **Thiry J, Krier F, Evrard B. 2015** A review of pharmaceutical extrusion: Critical process parameters and scaling-up. International journal of pharmaceutics. Feb 1;479(1):227-40.

39. **Uitterhaegen E, Evon P. 2017** Twin-screw extrusion technology for vegetable oil extraction: A review. Journal of Food Engineering.Nov 1;212:190-200.

40. **Viscidi KA, Dougherty MP, Briggs J, Camire ME. 2004** Complex phenolic compounds reduce lipid oxidation oxidation in extruded oat cereals. LWT-Food Science and Technology. Nov 1;37(7):789-96.

41. **Wang WM, Klopfenstein CF. 1993** Effect of twin-screw extrusion on the nutritional quality of wheat, barley, and oats. Cereal chemistry (USA). 70(6), 712-715.

42. **Wang S, Kowalski RJ, Kang Y, Kiszonas AM, Zhu MJ, Ganjyal GM. 2017** Impacts of the particle sizes and

levels of inclusions of cherry pomace on the physical and structural properties of direct expanded corn starch. Food and Bioprocess Technology. Feb;10(2):394.

43. **Ye J, Hu X, Luo S, Liu W, Chen J, Zeng Z, Liu C. 2018** Properties of starch after extrusion: a review. Starch-Stärke. Nov;70(11-12):1700110.

44. **Zhang J, Liu L, Liu H, Yoon A, Rizvi SS, Wang Q. 2019** Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion. Critical reviews in food science and nutrition. Nov 13;59(20):3267-80.

45. **Zieliński H, Michalska A, Piskuła MK, Kozłowska H. 2006** Antioxidants in thermally treated buckwheat groats. Molecular Nutrition & Food Research. Sep;50(9):824-32.

Extrusion Technology and its Application in the Food Industry: A Review Paper

Fariba Abedi Ardakani[3], Mohammad Reza Eshaghi[4]

Received**: 2020/08/03** Accepted**: 2021/10/07**

ABSTRACT

Waste generated in food processing has led to environmental concerns, while many of these wastes have significant nutritional value. On the other hand, lifestyle changes, the tendency to consume ready-to-eat, ready-to-cook foods with nutritional value have increased. Extrusion is one of the advanced technologies that has played a significant role in reducing agricultural waste and improving its added value. The extrusion process uses mixing, shaping, forming, and cooking to produce a new food product. This technology is widely used in the production of human products, food waste processing, and animal feed. The advantages of extruded products contains high variety, high quality, low processing time, cost-effectiveness, low humidity, long shelf life, and less pollution. Important parameters of extrusion processing such as cutting speed, temperature, and water content are all factors that play a role in the nutritional value of extruded products.

Keywords: Extrusion, Features, Processing parameters, Nutritional value

[3] PhD student in Food Science and Technology, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch
[4] Assistant Prof., Dept. of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Varamin -Pishva Branch
Corresponding Author: faribaardakani@gmail.com