تبدیل ضایعات غذایی به بایوپلاستیک‌ها
پریا براری جیرندهی

امروزه، وجود ضایعات غذایی (FW) یکی از مشکلاتی است که با آن مواجه هستیم. طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، میزان هدر رفت غذا در سطح جهانی، سالیانه حدود ۱.۳ بیلیون تن است. این عدد، یک سوم تمام منابع غذایی مورد نیاز انسان است. هدر رفت منابع غذایی از طرق پسماندهای خانگی، تبلیغاتی، کشاورزی و صنعتی اتفاق می‌افتد. هدر رفتن غذا، به معنای هدر رفتن انرژی و زمین و نیروی کار هم هست. بیشتر ضایعات غذایی دفن، کود و یا تخمیر می‌شوند. دفن آن‌ها می‌تواند موجب آزادشدن گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب‌های زیرزمینی شود.

ضایعات موادغذایی می‌توانند به عنوان غذای حیوانات هم استفاده شوند ولی به دلیل مسائل بهداشتی، این اتفاق نمی‌افتد.

همچنین ضایعات غذایی می‌توانند بازیافت شوند. ولی برای کاهش هزینه‌ها بهتر است جداسازی آن‌ها از منبع صورت بگیرد. ضایعات به دست آمده از صنایع و کشاورزی بیشتر است. ولی ضایعات ناشی از خانه‌ها یک‌دست‌تر هستند. دستگاه‌های اتوماتیکی برای جداسازی و پروسه‌کردن ضایعات به کار می‌روند. ولی درصد مواد بازیافتی بسیار کم است. بنابراین بهترین راه، تبدیل این ضایعات به موادی با ارزش افزوده است.

در فرانسه، دولت سیاستی برای تعیین ارزش تبدیل این مواد به منابع انرژی (biogas) و مواد با ارزش افزوده (bioplastic) در پیش گرفت. تخمین زده شد که با اجرای این سیاست، سالانه ۸۸ میلیون تن ضایعات غذایی معادل ۱۶۷ بیلیون دلار ذخیره می‌شود. بنابراین این کار هم از نظر اقتصادی و هم زیست‌محیطی به‌صرفه است.

درصد آب ضایعات غذایی بین ۷۵ تا ۸۵٪ و درصد مواد آلی آن‌ها بین ۶۰ تا ۷۰٪ است. در جدول زیر برخی ویژگی‌های موادی که قابلیت تبدیل‌شدن به بایوپلاستیک و بایوانرژی را دارند آورده شده‌است:

ردیف	نوع FW	مواد دارای پتانسیل	ویژگی‌ها
۱	روغن آشپزی مصرف‌شده	روغن پالم، روغن تخم منداب، دانه‌ی سویا، دانه‌ی آفتابگردان	درصد بالای لیپید (چربی) می‌تواند به سوخت بایو تبدیل شود.
۲	محصولات جانبی حیوانی	خون، چربی‌ها، باقی‌مانده‌های روده	دارای درصد نیتروژن بالا و یا BOD و COD
۳	باقی‌مانده‌های محصولات طبیعی	نی، علوفه، گوشت میوه‌ها	منابع مهمی برای شکرها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای معدنی هستند.
٤	ضایعات ترکیبی خانگی	آب پنیر، نان مصرف نشده، آجیل، پوست آجیل	دارای درصد بالای پروتئین، نشاسته، چربی و اسیدهای چرب

در جدول زیر هم انواع ضایعات غذایی و منشا آن‌ها در صنایع غذایی آورده شده‌است:

	نوع FW	منبع
۱	ضایعات ناشی از آماده‌سازی، پروسه‌کردن و ارائه‌ی گوشت، ماهی و سایر مواد غذایی ناشی از حیوانات	کشتارگاه‌ها، قصابی‌ها، کارخانه‌های آماده‌سازی ماهی و تخم‌مرغ و پیه آب سازی
۲	ضایعات ناشی از آماده‌سازی و پروسه‌کردن میوه‌ها، سبزیجات، حبوبات، روغن خوراکی، کاکائو، قهوه و تولید غذاهای کنسروی	کارخانه‌های آماده‌سازی میوه‌ها و سبزیجات، سازنده‌های نشاسته و جو، آسیاب گندم و روغن، تولیدکننده‌های قهوه و چای و کاکائو و موادغذایی کنسروی، تولیدکننده‌های دخانیات
۳	ضایعات ناشی از کارخانه‌های شکر	تولیدکننده‌های شکر
٤	ضایعات ناشی از کارخانه‌های لبنیاتی	لبنیات
۵	ضایعات ناشی از تولید غذاهای پخته‌شده و شیرینی‌ها	نانوایی‌ها، قنادی‌ها، تولیدکننده‌های آبنبات
٦	ضایعات ناشی از تولید نوشیدنی‌های الکلی و غیرالکلی	آبجو و شراب سازی‌ها، تولیدکننده‌های نوشابه‌های الکلی، تقطیرکننده‌ها، تولیدکننده‌های آبمیوه‌ها و نوشیدنی‌های غیرالکلی

یکی دیگر از معضلات محیط‌زیستی، تجمع پلاستیک‌ها به دلیل کندبودن سرعت تخریب آن‌ها است. از طرفی منابع نفتی محدود هستند و فرآیندهای نفتی اثرات مخربی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی، هوا و خاک دارد.

یکی از راه حل‌ها برای این مشکلات استفاده از پلیمرهای زیستی است. بایوپلاستیک‌ها پلاستیک‌هایی هستند که منشا طبیعی دارند. این مواد ویژگی‌های خاصی مثل پایداری، مطابقت‌پذیری، انعطاف‌پذیری، شفافیت و مقاومت مکانیکی و قابلیت سدشدن در برابر گازها دارند. البته تولید بایوپلاستیک‌ها به اندازه‌ی سایر پلاستیک‌ها مورد توجه نیست زیرا سنتز آن‌ها هزینه‌ی زیادی دارد. همچنین از نظر مکانیکی بعد از شکل‌دهی حرارتی، شکننده هستند. هرچند که با انجام فرآیند مناسب، می‌توان به خواص مکانیکی و کشش خوبی دست پیدا کرد. (در برخی موارد مثل پروتئین‌های سویا، از عملیات حرارتی برای بهبود خواص مکانیکی استفاده می‌شود.)

تحقیقات زیادی درباره‌ی استفاده از ضایعات غذایی به عنوان منبعی برای تولید بایوپلاستیک‌ها انجام شده‌است. منابع غذایی ممکن است منشا گیاهی (مهندسی سبز) و یا منشا حیوانی داشته باشند.

با این که ضایعات غذایی منابع خوبی برای تولید بایوپلاستیک‌ها هستند، باید از قبل روی آن‌ها عملیات آماده‌سازی انجام شود. این آماده‌سازی ممکن است فیزیکی، شیمیایی و یا زیستی باشد. در طی این روش‌ها، آزادسازی مونومر اتفاق می‌افتد. این‌گونه دسترسی به پروتئین‌ها، لیپیدها و پلی‌ساکاریدها بیشتر می‌شود و می‌توان روی آن‌ها عملیات هیدرولیز آنزیمی و تخمیر را انجام داد.

آماده‌سازی فیزیکی: این روش، معمولا به شیوه‌ی مکانیکی یا حرارتی انجام می‌شود. فراصوت، میکروویو، آسیاب‌کردن و گرم‌کردن هم روش‌هایی هستند که برای ریزکردن دانه‌بندی و افزایش مساحت سطح و افزایش سرعت جداسازی به کار می‌روند. این روش، معمولا در ابتدای کار انجام می‌شود و در ادامه، روش‌های دیگر پیاده‌سازی می‌شوند.

آماده‌سازی شیمیایی: در این روش از اسید استفاده می‌شود. اسید، برهم‌کنش این مواد با آنزیم‌های هیدرولیتیکی را زیاد می‌کند و آغازگرهای سلولی به وجود می‌آورد. آغازگرها شامل مشتقات فوران، فنولیک‌های لیگنینی و کربوکسیلیک اسیدها هستند.

هیدرولیز آنزیمی: هیدرولیز، مکانیسم اصلی برای شکستن زنجیر به مونومرهای سازنده‌اش است. هیدرولیز آنزیمی، توانایی هیدرولیتیکی را زیاد می‌کنند. برای مثال در این روش، تبدیل لیگنوسلولز به کربوهیدرات و چربی‌های حیوانی به اسیدهای چرب اهمیت زیادی دارد. برخی از انواع ضایعات غذایی، مواد مغذی لازم برای داشتن فعالیت زیستی را ندارند. برای حل کردن این مشکل می‌توان مواد مختلف را با هم ترکیب کرد.

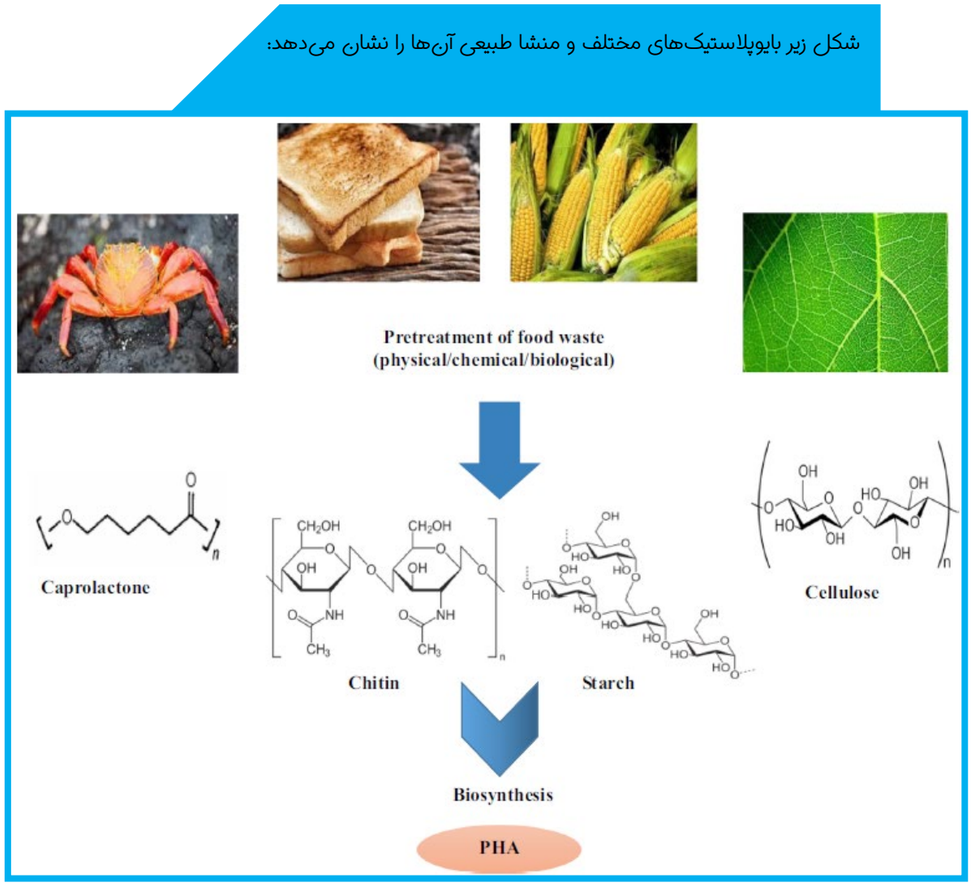
روش‌های متداول سنتز بایوپلاستیک‌ها شامل استفاده از زیست‌توده یا عوامل سازنده‌ی آن (مثل فیبر، نشاسته، سلولز، شکر و لیپید) در روش‌های ترکیب فیزیکی یا کراس‌لینک کردن شیمیایی است. در تحقیقات اخیر، تاکید زیادی بر تبدیل کردن زیست‌توده به مونومرها یا الیگومرهای سازنده‌اش، و استفاده از آن‌ها برای به وجود آوردن پلیمرهای جدید به کمک بیوتکنولوژی شیمیایی صنعتی شده‌است.

در ادامه به بررسی برخی از ضایعات غذایی که در تولید بایوپلاستیک به‌کار می‌روند می‌پردازیم.

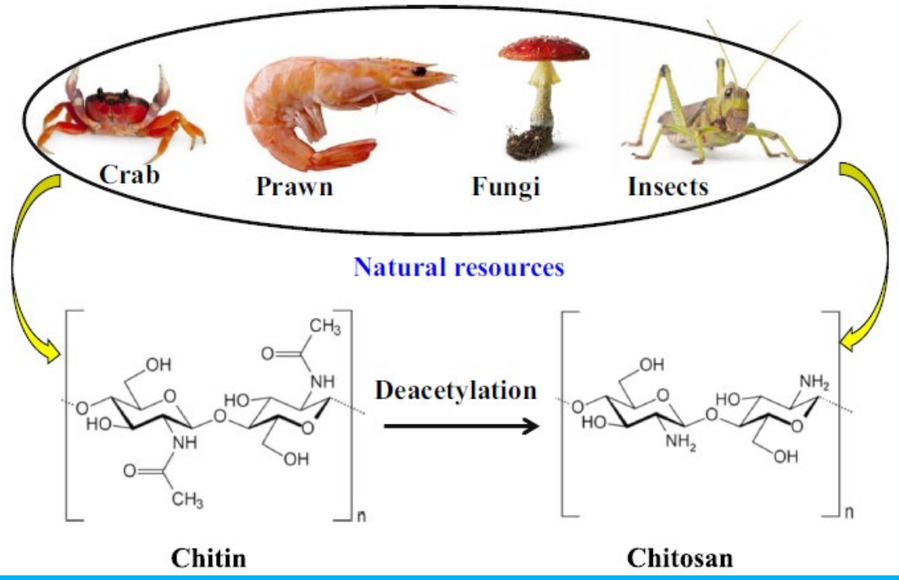
موجودات دریایی:

پلاستیک‌های مورداستفاده در صنایع بسته‌بندی، مخصوصا بسته‌بندی موادغذایی، معمولا گرفته‌شده از باقی‌مانده‌های موجودات دریایی، مثل پوست میگو که دارای کیتوسان است، هستند. کیتوسان از دی‌استیله کردن کیتین به‌وجود می‌آید. کیتین از پوشش محافظ خارجی بندپایان به‌دست می‌آید. کیتین می‌تواند به‌صورت مواد جامد نامحلول در آب، حلال‌های آلی، مخلوط رقفشده با اسید در بیاید. ساختار کیتین با حذف گروه استیل در محلول آلکالین در دمای بالا، اصلاح می‌شود. اگر دی‌استیله شدن بالای ۶۰ تا ۶۵٪ باشد، پلیمر به‌دست‌آمده کیتوسان است. کیتوسان گروه‌های آمین و هیدروکسیل دارد بنابراین فعالیت شیمیایی بالایی دارد و می‌تواند پیوندهای هیدروژنی تشکیل دهد و میکسر خوبی باشد.

شکل زیر بایوپلاستیک‌های مختلف و منشا طبیعی آن‌ها را نشان می‌دهد:



شکل زیر نحوه‌ی تبدیل شدن کیتین به کیتوسان را نشان می‌دهد:



کیتوسان یکی از بهترین بایوپلیمرها از نظر زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، سمی‌نبودن، آنتی‌اکسیدان بودن، ضدمیکروب‌بودن و خواص ضد سرطان است. این ماده، ارزان است و از منابع دریایی تامین می‌شود. کیتوسان مصارف مختلفی مانند مصارف دارویی، کشاورزی و پاکسازی آب دارد. دی‌استیله‌شدن بسیاری از خواص زیستی و فیزیکوشیمیایی کیتوسان را تعیین می‌کند. کیتوسان می‌تواند با موادی مثل فیلرهای طبیعی، از نظر خواص مکانیکی و فیزیکی تقویت شود. کیتوسان تقویت‌شده با فیلرهای طبیعی جایگزین خوبی برای بسته‌بندی مواد غذایی است.

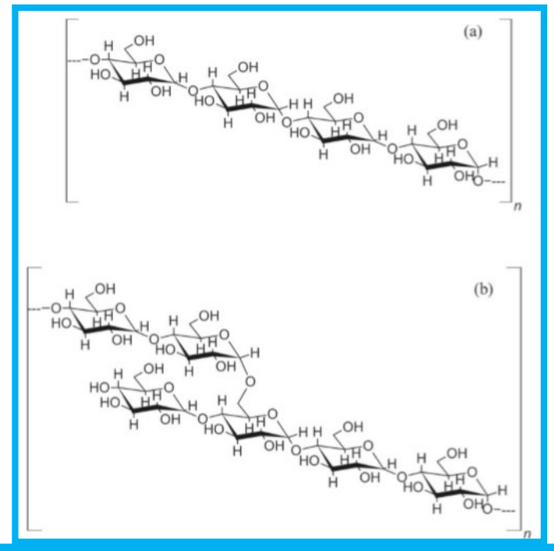
سبوس برنج و کاساوا:

نشاسته که مهم‌ترین پلی‌ساکارید است، در سبوس برنج و کاساوا هم یافت می‌شود. آمیلاز و آمیلوپکتین نقش اساسی در خواص مکانیکی بایوپلاستیک ایفا می‌کنند. آمیلاز به دلیل ساختار خطی، خواص مطلوب‌تری نسبت به آمیلوپکتین به ما می‌دهد.آمیلاز کربوهیدراتی با شاخه‌های کم است. آمیلوپکتین پلیمری به شدت شاخه‌ای با وزن مولکولی بالا است. نشاسته‌ی مومی، دارای آمیلاز کم است یا اصلا آمیلاز ندارد.

نشاسته‌ای که از این منابع به دست می‌آید به راحتی توسط میکروارگانیسم‌ها، مثل باکتری‌ها تخریب می‌شود. پلیمرها به شکل گرانول‌هایی با قطر ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر به‌دست می‌آیند. با توجه به میزان آمیلاز، آمیلوپکتین، پروتئین و لیپید که در گیاهان دارای نشاسته وجود دارند، به خواص و ساختارها و مورفولوژی‌های مختلفی می‌رسیم.

بایوپلاستیک‌هایی که از این منبع ساخته می‌شوند ساختار نازک و خواص کششی خوبی دارند. فیلم‌های خوردنی برپایه‌ی نشاسته، مقاومت کمی در برابر آب دارند. علت این موضوع، قابلیت انحلال کم آمیلوپکتین که به شدت شاخه‌ای می‌باشد است که باعث تجمع می‌شود و باعث می‌شود در دمای بالا انحلال کم شود. بنابراین به دلیل آبدوست بودن آمیلوپکتین، فیلم‌های بایوی برپایه‌ی نشاسته، ساختاری ترد و شکننده دارند. این یکی از مشکلات این مواد است. البته می‌توان این مواد را به مواد آب‌گریز اضافه کرد تا در مواد دیگر به کار روند.

از بین روش‌هایی که برای پروسه‌ی آماده‌سازی نشاسته به‌کار می‌روند، کار با اوزون خیلی کاربردی است. اوزون با نشاسته واکنش می‌دهد و وزن مولکولی را کاهش و مقدار کربوکسیل را افزایش می‌دهد. اندازه و سایز گرانول‌هایی هم که به دست می‌آید تحت تاثیر این فرآیند است.



شکل a نشان‌دهنده‌ی ساختار آمیلاز و شکل b نشان‌دهنده‌ی ساختار آمیلوپکتین است.

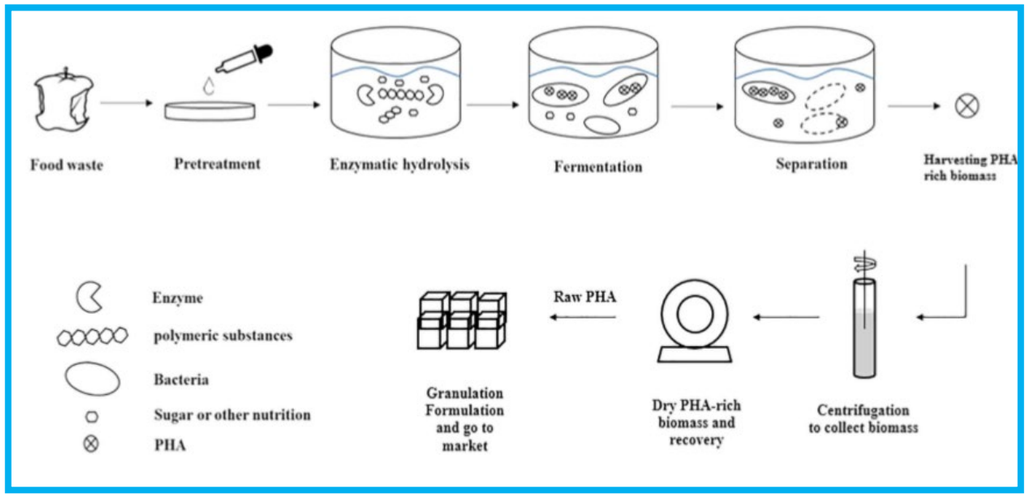
موز:

از موزهای دورریخته شده می‌توان برای تولید سوخت‌های زیستی، شکر و PHB استفاده کرد. از نظر تئوری، مقدار گلوکز، اتانول و PHB در هر تن موز، به ترتیب ۳۱۶، ۲۳۸ و ۳۱/۵ کیلوگرم است. در کل، پوست موز حاوی ۴۰٪ نشاسته است که می‌تواند به شکر تبدیل شود.

تولید PHA:

علاوه بر مواردی که ذکر شد، امروزه یکی از مهم‌ترین بایوپلیمرها پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHA) هستند. از ویژگی‌های خوبی که این مواد دارند می‌توان به سد خوب بودن در برابر اکسیژن (حتی بهتر از PP و PET)، سد خوب بودن در برابر بخار آب (بهتر از PP)، سد در برابر بو و چربی بودن اشاره کرد. این مواد در حوزه‌های زیادی مانند صنایع بسته‌بندی، بهداشتی، انرژی و شیمیایی استفاده می‌شوند.

بیشتر مواد اولیه‌ای که در تولید PHA استفاده می‌شوند، محصولات غذایی، نی‌شکر و روغن سبزیجات است. تولید PHA در حال حاضر نسبت به تولید پلیمرهای نفتی، گران‌تر است. به همین دلیل محققین به دنبال راه‌هایی برای ارزان‌تر کردن این پروسه هستند. استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر و طبیعی، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. صنایع تولید شکر و روغن‌های طبیعی، ضایعات زیادی تولید می‌کنند که می‌توانند از طریق تخمیر با باکتری به تولید PHA منجر شوند.



در این ۲۵۰ تولیدکننده‌ی PHA تنها چندتا از آن‌ها برای این کار از باکتری‌ها استفاده می‌کنند. باکتری‌های مورداستفاده شامل آلکالیجنس لاتوس، باسیلوس مگاتریوم، کوپریاویدوس نکاتور، سودوموناس اولئووارنز هستند که می‌توانند منابع کربنی مختلف را به PHA تبدیل کنند.

طی دو دهه‌ی اخیر، مصرف بایوپلاستیک‌ها در حوزه‌های مختلف روند افزایشی داشته‌است. همچنین موضوع پلیمرهای زیستی به یکی از حوزه‌های مهم تحقیقاتی تبدیل شده‌است. ولی مهم‌تر از همه‌چیز، دولت‌ها، شرکت‌ها، اشخاص و افراد مسئول و مردم باید با هم کار کنند تا بار ناشی از مشکلاتی که به آن‌ها اشاره شد، برداشته شود.

منابع:

- Tsang, Yiu Fai, et al. “Production of bioplastic through food waste valorization.” Environment internation-al 127 (2019): 625-644.
- Santana, Audirene Amorim, et al. “Bioconversion of Food Waste into Bioplastics.” Sustainable Biocon-version of Waste to Value Added Products. Springer, Cham, 2021. 281-297.