



بررسی کاربرد فرآیند تراوش تبخیری در استخراج ترکیبات معطر در صنایع غذایی

اسما بساطی^۱، بهاره میرپوریان^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

کلمات کلیدی:

تراوش تبخیری،

فرآیند غشایی،

ترکیبات معطر

روند رو به افزایش مصرف ترکیبات طعم‌دهنده غذا باعث ایجاد انگیزه در تولید طعم‌های غذایی شده است. تکنیک‌های مرسوم تولید ترکیبات طعم‌دهنده با توجه به تقاضای صعودی بازار از نظر کمیت و تنوع کافی نیست، تراوش تبخیری به عنوان یک فرآیند غشایی معتبر، نسبت به سایر تکنیک‌های مرسوم، برای بازیابی ترکیبات معطر از سیستم‌های غذایی کشاورزی، رشد سریعی داشته است. تراوش تبخیری فرآیند جداسازی غشایی بر اساس استفاده از غشاهای غیر متخلخل است که به طور انتخابی انتقال مولکول‌های هدف حل شده در مخلوط خوراک مایع را تنظیم می‌کند و به‌ویژه به دلیل مصرف انرژی کم، عدم افزودن مواد شیمیایی برای دستیابی به جداسازی و حفظ یکپارچگی ترکیبات معطر، مورد استقبال قرار گرفته است. بیش از ۷۰ نوع مختلف از ترکیبات معطر از جمله استرها، کتون‌ها، آلدهیدها، الکل‌ها، هیدروکربن‌ها، اتیل استات، اتیل بوتیرات، هگزانال، لیمونن، لینالول، α -ترپینول، بنزالدهید و ۱-۳-ال-اوکتان هگزانال از منابع مختلف از جمله قهوه، توت فرنگی، بادام هندی، آب کیوی، آب پرتقال، میوه‌های آلو، سیب، انگور سیاه و گیلان، صدف دریایی به طور انتخابی با استفاده از غشاهای تراوش تبخیری (PEBA، PDMS، POMS و (غشاهای آب‌گریز/ارگانوفیل)) بازیابی شدند. پارامترهای فرآیند مانند بازده استخراج، ترکیب خوراک، فشار، نوع مازول، سرعت جریان خوراک، دمای خوراک، اثرات متفاوتی بر مقدار ترکیبات معطر استخراج شده از مواد گوناگون مورد بررسی داشتند. اکثر این مطالعات نشان دهنده نتایج موفقیت آمیز این فرآیند بوده است، با این حال، هنوز برخی از مواد غشایی جدید دیگر (مانند کپلیمر PU، P(VDF-co-HFP)، SBS) وجود دارد که باید در این زمینه بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرند.

DOI: 10.48311/fsct.2026.83711.0

* مسئول مکاتبات:

Baharemirpourian@gmail.com

asmabasati1726@gmail.com

۱-مقدمه

امروزه، تقاضای فزاینده‌ای برای نوآوری‌های تکنولوژیکی برای مواد تشکیل‌دهنده طعم‌ها و عطرهای تولیدی با هدف استفاده در صنایع غذایی، آرایشی و بهداشتی و دارویی وجود دارد. عطر و طعم‌ها گروه گسترده‌ای از مواد شیمیایی (شامل بیش از ۲۲۰۰۰ مولکول منفرد)، از جمله آلکان‌ها و آلکن‌ها با زنجیره کوتاه (با یا بدون اکسیژن، نیتروژن یا گوگرد)، الکل‌ها، استرها، کتون‌ها و اسیدهای آلی هستند. این احتمال وجود دارد که ترپن‌ها فراوان‌ترین دسته از مواد شیمیایی در طبیعت هستند که مسئول بوهای مشخص در گیاهان، میوه‌ها، قارچ‌ها و حیوانات هستند. به‌طور معمول، این ترکیبات آلی بخشی از فرآورده‌های تولید بسیاری از مواد غذایی، عطر سازی، آرایشی بهداشتی هستند [۱]. برای برآوردن تقاضای کنونی چنین ترکیباتی، تولید آن‌ها در واقع از طریق فرآورده‌های شیمیایی انجام می‌شود، که مستلزم چندین مرحله واکنش است که نیاز به مواد و کاتالیزورهای گران‌قیمت دارند. باین‌حال، در حال حاضر یک ضرورت بزرگ برای جایگزینی چنین عطر و طعم‌های شیمیایی با طعم‌های استخراج‌شده از منابع وجود دارد [۲]. در این مرحله، دو راه ممکن برای تولید طبیعی آن‌ها وجود دارد، به‌عنوان مثال. بیوسنتز (از طریق رویکردهای بیوتکنولوژیک) یا استخراج آن‌ها از منابع طبیعی. این احتمال وجود دارد که بهترین گزینه استخراج/بازیابی از محصولات طبیعی کشاورزی (مانند میوه‌ها، سبزیجات، غذاهای فرآوری شده، عصاره‌ها و غیره) با استفاده از تکنیک‌های جداسازی باشد. تا به امروز، چندین تکنیک بازیابی برای چنین کاری پیشنهاد شده است. در درجه اول، تمام این تکنیک‌ها برای انجام جداسازی نیاز به در دسترس بودن ترکیبات در سیستم‌های آبی یا حلال دارند. باین‌حال، با توجه به واکنش‌پذیری و پایداری ترکیبات طعم و عطر انتخاب‌شده، بازیابی کار آسانی نیست، در واقع، اکثر این

ترکیبات آلی ممکن است هیدرولیز، اکسیداسیون و واکنش رادیکال و تخریب حرارتی داشته باشند [۳].

در این زمینه، تراوش تبخیری^۱، بر اساس استفاده از یک مانع انتخابی فیزیکی که توسط یک غشاء نشان داده شده است، یک جایگزین اقتصادی برای چندین فرآیند جداسازی کلاسیک است. این پتانسیل بسیار خوبی برای خالص‌سازی ترکیبات حساس به حرارت در غیاب دما یا هر فاز اضافی برای انجام استخراج فراهم می‌کند. امروزه، PV به‌عنوان یک فناوری نوظهور برای رویکردهای مختلف، از جمله کمک به واکنش‌های زیستی و شیمیایی، جداسازی حلال‌های نزدیک به نقطه جوش، تصفیه مواد شیمیایی (به‌عنوان مثال، اتانول، ایزوپروپانول، MTBE)، تشدید عملیات واحد و جداسازی مولکول‌های آلی هدفمند در نظر گرفته می‌شود [۲]. تا به امروز، استفاده از PV به دلیل مزایای آن (به‌عنوان مثال، سادگی عملیات، امکان‌سنجی بالا در مقیاس، کاهش تعداد مراحل و صرفه‌جویی در انرژی) نسبت به فرآورده‌های سنتی استخراج مانند تقطیر و استخراج مبتنی بر حلال به‌طور قابل‌توجهی ارتقا یافته است. مهم‌تر از همه، فقدان عوامل شیمیایی در فرآیند استخراج به حفظ خواص عملکردی ترکیبات معطر کمک می‌کند و خطر آلودگی احتمالی را به حداقل می‌رساند. امکان استفاده از PV برای بازیابی ترکیبات معطر طبیعی در صنایع غذایی به‌طور گسترده‌ای شناخته شده است. PV به‌عنوان یک فرآیند غشایی انتخابی شناخته می‌شود که برای برآوردن الزامات برای جداسازی ترکیبات معطر صورت گرفته است. جداسازی انتخابی کارآمد چنین ترکیبات آلی از منابع طبیعی به دلیل پایداری حرارتی آن‌ها یک چالش فعلی است. جامعه تحقیقاتی امروزه در حال بررسی تکنیک‌های انتخابی و کارآمد متنوعی برای تولید عملی مواد معطر هستند که در آن PV یک کاندید بالقوه است. همچنین مطالعات مختلفی بازیابی موفق ترکیبات معطر از محصولات کشاورزی و ضایعات غذایی را مستند

1-pervaporation (PV)

و یا با اعمال خلأ، به صورت بخار در پایین دست غشا (جریان تراوه) گرفته می شود [۴].

عبور اجزای خوراک از میان غشا ناشی از اختلاف فشار بین محلول خوراک و بخار تراوه است. این اختلاف فشار از طرق مختلفی به سیستم القا می شود. در تحقیقات آزمایشگاهی عموماً، از پمپ خلأ برای ایجاد افت فشار در سمت تراوه استفاده می شود، درحالی که در مقیاس صنعتی، سرمایش بخار تراوه و ایجاد خلأ به واسطه میعان آن، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر است در شکل ۱ شماتیک فرآیند PV نشان داده شده است [۵].

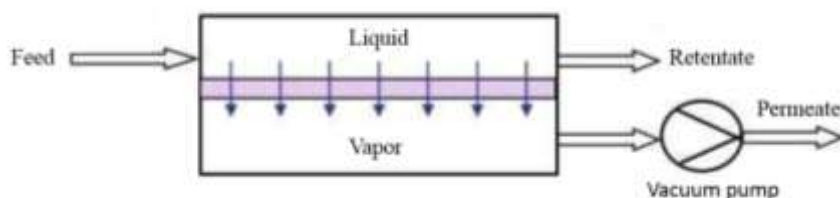


Figure 1 - Schematic of the PV process [6]

در واقع همین عدم وابستگی فرآیند به روابط تعادلی مایع - بخار حاکم بر فرآیندهای مرسوم از جمله تقطیر، موجب شده تا فرآیند PV جایگزین بهتری برای فناوریهای جداسازی پیشین باشد. در این فرآیند نفوذ اجزا در غشا با تغییر فاز از مایع (سمت خوراک) به بخار (سمت تراوه) همراه می باشد و فرآیند PV از این لحاظ با سایر فرآیندهای جداسازی مایع - مایع تفاوت دارد. هنگامی که با بازیابی املاح ارزشمند سروکار داریم، PV مزایای متعددی را نسبت به تکنیکهای جداسازی/تصفیه معمولی (مانند تقطیر، تبخیر، جذب، جذب، استخراج با حلال)، از جمله عملیات نسبتاً آسان، افزایش مقیاس پذیری، کاهش تعداد مراحل فرآیند و مصرف انرژی پایین ارائه می کند [۷].

کرده اند [۳]. بنابراین، هدف این مقاله، ارائه یک نمای کلی از کاربرد روش تراوش تبخیری با هدف استخراج ترکیبات عطروطعم، و همچنین مشتقات آنها، از منابع اصلی خود با استفاده از تراوش تبخیری (PV) است.

۲- اصول تراوش تبخیری

تراوش تبخیری یا تراوش تبخیری (PV) یک فرآیند جداسازی غشایی است که طی آن مخلوط مایع (جریان خوراک) در تماس مستقیم با یک غشای متراکم قرار می گیرد. اجزای مخلوط با توجه به خاصیت انتخاب پذیری غشا، بعد از یک جذب گزینشی در راستای ضخامت غشا عبور کرده و جزء نفوذکننده (تراوه^۲) به وسیله یک گاز خنثی

جداسازی گزینشی مایعات در فرآیند تراوش تبخیری، نتیجه جذب گزینشی اجزا و نیز نفوذ جزء گزینش شده در ضخامت غشا می باشد. به عبارتی جداسازی در این فرآیند برخلاف فرآیندهای مرسوم غیر غشایی، بر پایه اختلاف در سرعت جذب و نفوذ اجزای خوراک در غشا است. گرچه از لحاظ تئوری PV قادر به جداسازی انواع مخلوطهای مایع است، ولی عملاً این فرآیند امروزه در صنعت با هدف جداسازی مخلوطهای آزنوتروپی، مخلوطهای با نقاط جوش نزدیک به هم و ترکیبات آلی حساس به دما، همچنین حذف مقدار ناخالصیهای اندک مخلوط و نهایتاً پیشرفت واکنشهای تعادلی در جهت کامل شدن واکنش، بسیار مورد استفاده قرار می گیرد [۶].

به‌طورکلی، محلول خوراک، که در تماس مستقیم با غشاء است، به علت مانع فیزیکی و نیروی محرکه (فشار خلأ) جدا می‌شود [۸].

به‌طورکلی کاربردهای فرآیند PV شامل آب‌زدایی از حلال‌های آلی، حذف یا بازیابی مقادیر کم مواد فرار آلی از مخلوط‌ها و جداسازی مخلوط‌های آلی-آلی می‌باشد. شکل ۲ یک تصویر گرافیکی از راه‌اندازی PV معمول را نشان می‌دهد که در آن بازیابی ترکیبات معطر می‌تواند انجام شود.

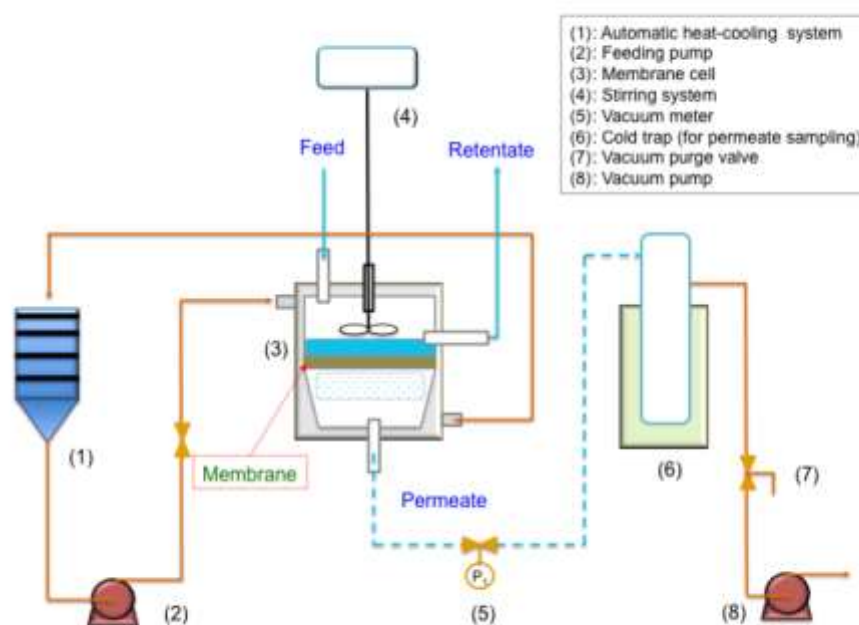


Figure 2 - Graphical illustration of a typical PV setup [4]

غلظت خوراک: منظور از غلظت خوراک، درصد غلظت آن جزئی از خوراک است که تمایل به تراوش آن از غشا بیشتر می‌باشد. تغییر در غلظت خوراک مستقیماً بر نفوذ در سطح مشترک غشای خوراک تأثیر می‌گذارد. از آنجاکه عمل انحلال و نفوذ هردو به غلظت اجزای مخلوط وابسته هستند، لذا میزان ترکیب درصد مخلوط تأثیر بسیاری بر این دو مرحله انتقال جرم خواهد داشت.

دمای خوراک: اثر تغییرات دما بر روی شار را با رابطه آرنیوس می‌توان نشان داد.

$$J_i = A_i \exp\left(-\frac{E_{p,i}}{RT}\right)$$

در این معادله J_i شار جزء i ، R ثابت گازها و $E_{p,i}$ انرژی فعال‌سازی برای تراوه است که اگر انرژی فعال‌سازی مثبت

۳- پارامترهای مؤثر بر عملکرد جداسازی فرآیند

PV

میزان جداسازی در محصول فرآیند تراوش تبخیری علاوه بر ویژگی‌های محلول خوراک، به غشای مورد استفاده و متغیرهای عملیاتی فرآیند بستگی دارد.

شرایط عملیاتی: از آنجایی که نیرومحرکه در فرآیند PV اختلاف پتانسیل شیمیایی می‌باشد، متغیرهای عملیاتی همچون غلظت خوراک، فشار تراوه و دمای خوراک مستقیماً روی پتانسیل شیمیایی اثر دارد. از این رو تأثیر این متغیرهای عملیاتی، میزان کارایی فرآیند PV را تغییر خواهد داد [۹].

- (۱) لایه گزینش پذیر تا حد امکان نازک بوده و نقصی در ساختار نداشته باشد.
 - (۲) در تماس با مخلوط خوراک، گزینش پذیری بالایی در جذب و نفوذ جزء هدف داشته باشد.
 - (۳) جهت حفظ گزینش پذیری و ساختاری پایدار نباید متورم شود.
 - (۴) مقاومت مکانیکی و پایداری شیمیایی و حرارتی مقبولی داشته باشد.
 - (۵) همزمان با شار بال گزینش پذیری بهینه داشته باشد.
- ملاک انتخاب پلیمر جهت ساخت غشا، داده های انحلال و نفوذ اجزای مختلف مخلوط به درون پلیمر غشایی می باشد [۱۱، ۱۲].

مخلوط خوراک هدف

با توجه به این که قرار است چه نوع خوراک هدفی مورد جداسازی قرار بگیرد، غشا متناسب با آن باید انتخاب شود تا نهایتاً عملکرد برتری از فرایند PV مشاهده شود. در فرآیندهای PV اگر هدف جداسازی آب از ترکیبات آلی باشد، نیاز است از غشاهای آب دوست استفاده شود تا عمده ترکیب درصد تراوه آب باشد. همچنین اگر در انجام فرآیند مقصود، جداسازی مواد آلی از آب باشد، غشاهای آب گریز جنس مناسب برای انتخاب غشا محسوب می شوند. از طرفی برای جداسازی ترکیبات آلی از هم، فرایند نیازمند غشاهای آلی دوست است تا بتواند با جذب و انحلال گزینشی ترکیبات را از هم تمیز و جدا کند. در جدول ۱ پرکاربردترین پلیمرها بر اساس جنس غشا و کاربرد آن در فرآیند PV به ۳ دسته اصلی تقسیم بندی شده اند [۱۳، ۱۴].

باشد، شار با افزایش دما، افزایش می یابد. از طرفی با افزایش دمای خوراک، فشار بخار اجزا در سمت خوراک نیز افزایش یافته، درحالی که فشار بخار سمت تراوه تغییری نمی کند. در نتیجه اختلاف فشار بخار که نیرو محرکه انتقال جرم در فرآیند PV محسوب می شود افزایش می یابد [۸].

فشار تراوه: فشار پایین دستی غشا یا همان فشار تراوه به طور مستقیم با فشار بخار جزئی اجزا رابطه دارد و به همین دلیل عملکرد PV به طور چشم گیری به فشار تراوه بستگی دارد. فشار جریان پایین دستی اگر در حداقل مقدار خود نگه داشته شود، بیشترین نیرو محرکه ممکن را خواهد داد. با افزایش فشار جریان پایین دستی غشا، شار تراوه به علت کاهش نیروی محرکه شدیداً کاهش می یابد و این در حالی است که بسته به فراریت نسبی تراوه گزینش پذیری می تواند کاهش یا افزایش یابد [۳].

۴- غشای مناسب فرآیند تراوش تبخیری

غشا قلب هر فرآیند جداسازی غشایی می باشد برای تحقیقات آزمایشگاهی از غشاهای همگن و متقارن استفاده می شود؛ چراکه فرآیند ساخت آن آسان بوده و از طرفی نشان دهنده خصوصیات ذاتی پلیمرها می باشد. این در حالی است که در مقیاس صنعتی از غشاهای آزمایشگاهی که توانسته اند عملکرد قابل قبولی از خود نشان دهند، در ساختار مرکب و یا نامتقارن استفاده می شود. این ساختارها غشایی با لایه گزینش پذیر نازک، قادر هستند شار بالایی از خود عبور داده و همزمان مقاومت مکانیکی خود را نیز حفظ کنند. مشخصه های غشای ایده ال برای PV به شرح زیر است [۱۰]:

Table 1- Division of PV process based on the type of membrane and its application

Membrane type	Hydrophilic	Hydrophobic	Organophilic
Polyvinyl alcohol (PVA)	Polydimethylsiloxane (PDMS)	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
Polyacrylonitrile (PAN)	Polyoctylsiloxane (POMS)	Polyether-block-amide (PEBA)	
Cellulose acetate		Ethylene-propylene diene	
Polysulfone			

membrane type	Carboxylmethyl-cellulose	terpolymers (EPDM)	Polypropylene (PP)
	Polyetherimide (PEI) Chitosan	Poly-1-trimethylsilyl-1-propylene (PTMSP)	Polyethylene (PE) Polyvinyl alcohol (PVA) Polyetherimide (PEI)
Applications	Breaking the azeotropes of binary mixtures	Polypropylene (PP)	
		Polybutadiene (PB)	
		Hydrophobic zeolites	
		Removal of organic matter from water Removal of alcohol from alcoholic beverages Recovery of aromatic compounds from food products	Separation of methanol from MTBE Separation of benzene and cyclohexane

گروه بنزن آب‌گریز و الکل یا آلدئید آب‌دوست مرتبط باشد [۱۶]. از سوی دیگر، ترکیبات گوگرد آب‌گریزتر از همتای اکسیژن دار خود هستند. مطمئناً اتم گوگرد قطبی‌تر از اکسیژن است، زیرا اتم گوگرد دارای یک لایه الکترونی (در اطراف هسته اتم) بیشتر از اکسیژن است. درواقع، غشاهای آب‌گریز برخی از ترکیبات مبتنی بر گوگرد ازجمله مرکاپتان، ایزوبوتیل تیازول، تیوبوتیرات را به‌طور موثر بازایی کرده‌اند. هنگام برخورد با کتون‌ها، غشاهای آب‌گریز گزینش‌پذیری کمی برای کتون‌های با زنجیره‌های کربنی کوچک نشان داده‌اند. این را می‌توان به ماهیت آب‌دوست بارز ترکیبات نسبت داد، به‌عنوان مثال. دی استیل و استوئین برعکس، غشاهای آب‌گریز PV (به‌عنوان ارگانوفیل نیز شناخته می‌شوند) برای بازایی کتون‌های آب‌گریز بزرگ‌تر بسیار موثر هستند، به‌عنوان مثال. آنهایی که بیش از ۶ اتم کربن دارند در نهایت، برخی مولکول‌های معطر دیگر نیز وجود دارند که ماهیت آبدوستی را نیز نشان می‌دهند، اما می‌توان آن‌ها را با استفاده از PV بازایی کرد، به‌عنوان مثال. پیرازین‌ها، که نت‌های بالایی از رایحه‌های برشته یا مغزدار دارند [۱۷، ۵].

۵- شیمی ترکیبات معطر و نقش آن در جداسازی از طریق PV

همانطور که قبلاً گفته شد، شیمی و ماهیت (آب دوست یا آب‌گریز) مولکول‌های هدف نقش مهمی در بازایی عطر از طریق PV ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، لاکتون‌ها با نت‌های میوه‌ای، به دلیل محتوای کربن بالا و وجود یک هتروسیکل اکسیژن‌دار، جزو آب‌گریزترین مولکول‌ها هستند. این مولکول‌ها درواقع ترجیح داده می‌شوند که توسط غشاهای ارگانوفیل بازایی شوند. به‌طور مشابه، استرها که نت‌های اولیه میوه‌ای را ارائه می‌کنند، به خوبی شناخته شده‌اند که ماهیت بسیار آب‌گریز را نشان می‌دهند [۱۵]. این مولکول‌ها کمتر از هشت اتم کربن، حاوی اتم‌های اکسیژن دارند که در محلول‌های آبی بسیار فرار هستند. علاوه بر این، استرها نماینده مولکول‌های آب‌گریز هستند که پیوندهای تقریباً غیر هیدروژنی را نشان می‌دهند. در مورد الکل‌ها و به ویژه آلدئیدها معمولاً بر اساس گروه‌های حاوی قطبی به‌عنوان مولکول‌های آلی آب‌دوست طبقه‌بندی می‌شوند. مطمئناً غشاهای آب‌گریز هنوز کاندیدهای خوبی برای بازایی خود هستند زیرا برخی از مولکول‌ها دارای هسته بنزن هستند، مانند بنزیل الکل، او-کرزول، لینالول، تیمول، ۲،۵-زایلنول، بنزآلدئید. آب‌گریزی نسبتاً کم آن‌ها می‌تواند به تعادل قطبی بین

۶- ترکیبات معطر بازیابی شده توسط روش PV

در زمینه کاربرد روش PV در بازیابی ترکیبات معطر صنایع غذایی تاکنون مطالعات مختلفی اما محدودی انجام شده است. جدول ۲ ترکیبات معطر اصلی بازیابی شده توسط

غشاهای PV مختلف از محصولات کشاورزی غذایی، مانند آب میوه، عصاره، محصولات فرعی و برخی محصولات فرآوری شده (مانند آبجو، شراب، محصولات لبنی) را خلاصه می‌کند.

Table 2. Some aromatic compounds recovered from different agricultural and food products using PV process

Aroma Compounds	Source	Membrane nature	Membrane material	Operating conditions	Productivity permeate Kg/m ² h	Ref
Isobutyl acetate	Bioconversion culture broth	Hydrophobic/organophilic	POMS	30 °C 0.5 mbar	0.003	[18]
S-methyl thio-butyrates	Cauliflower Blanching water	Hydrophobic	PDMS PEBA	30 °C 2.7 mbar	0.0006 0.0002	[19]
Linalool d-Limonene 1-Heptanol 1-Hexanol Trans-2-hexenal Ethyl acetate	Blueberry model solution	Hydrophobic	PDMS	30 °C, 3.9 mbar	—	[20]
cis-3-hexenol	Tea extract	Hydrophobic/organophilic	POMS	30 °C 6 mbar	0.003	[21]
Ethyl acetate	Model solution	Hydrophobic	PDMS	25 °C, 3.9 mbar	0.008	[22]
2,3-butanedione ⁴⁵ 2,3-pentanedione	Model solution	Hydrophobic/organophilic	Commercial PDMS	20°C, 2.5 mbar	0.432	[20]
Vanillin	model solution	Hydrophobic	PEBA	50°C 3 mbar	0.39	[13]
β-Pinene Limonene	Lemon Juice	Hydrophobic/organophilic	POMS	30°C 0 mbar	0.0003 0.0009	[23]
Isopentyl acetate n-Hexanol α-Ionone 1-methyl-1-pyrrole, methylpyrazine,	Pomegranate juice	Hydrophobic	PDMS	30°C 0 mbar	0.0005	[24]
Bergapten, linalool, linalyl acetate, limonene	Bergamot essential oil	Hydrophobic	Commercial GFT 1070	25-40 °C 10 mbar	0.0009	[25]
Ethyl alcohol Ethyl acetate	Sugarcane molasses	Hydrophobic	Commercial Pervap	30°C	0.100	[26]

Isoamyl alcohol Isoamyl acetate	fermentation broth		4060	10 mbar		
Pentan-1-ol Hexanal Butyl acetate Heptan-1-ol	Plum, apple, blackcurrant and cherry hydrolysates	Hydrophobic	Commercial Pervap ECO 001 BP	60°C 3000 mbar	0.008	[27]
Benzaldehyde acetic acid	Coffee	Hydrophobic	PDMS	20, 30, and 40°C 270, 530, 800 Pa	0.006	[28]
Nerol α -terpineol linalool	Lemon essential oil waste	Hydrophobic	PDMS/PVDF	30°C, 10 mbar	0.0003 0.0009 0.0006	[29]
1-octen-3-ol hexanal benzaldehyde	Oyster	Hydrophobic	PDMS	30°C 0 mbar	0.0005	[30]
β -Ionone	Black tea	Hydrophobic	MWCNT PDMS	30°C 0 mbar	0.0005	[31]
Linalool benzaldehyde ethyl acetate	Blackberry juice	Hydrophobic	ZIF-8/PDMS	20°C 2.5 mbar	0.0009	[32]
Inalool terpinen-4-ol α -terpineol camphor	lavender	Hydrophobic	PDMS	40°C 10 mbar	0.25484	[33]

در نمونه‌های تراوا نسبت به نمونه خوراک افزایش معنی‌داری داشت [۳۵].

غشاهای کوپلیمر پلی اورتان اوره پلی یورتان مبتنی بر هیدروکسی پایان یافته (HTPB) در استخراج اتیل استات از محلول آبی توسط PV با فاکتور جداسازی و شار کل به ترتیب ۶۵۵ و ۲۵۶ گرم در متر مربع در ساعت ۱ بسیار کارآمد بود [۳۵].

Cassano و همکاران (۲۰۰۶) عملکرد یک غشای تجاری بر پایه PDMS در استخراج ترکیبات معطر از آب کیوی اولترافیلترشده را ارزیابی کردند. در تمام آزمایش‌های PV، فاکتورهای غنی‌سازی الکل‌ها (بین ۱۰ تا ۴۰) کمتر از استرها، مانند اتیل بوتانوات و متیل بوتانوات (حدود ۱۰۰) بود. علاوه بر این، برای اکثر املاح معطر، ضریب غنی‌سازی در نفوذ آب دپکتینه شده به ترتیب بالاتر از آب میوه شفاف و غلیظ بود، به استثنای ۳-هگزن-۱-اول و -هگزن بر اساس این یافته‌ها،

Isci و همکاران (۲۰۰۶) اثر پارامترهای عملیاتی مختلف، از جمله دمای خوراک، غلظت، ترکیب و فشار تراوا، بر عملکرد PV غشای (PERVAP 1070 PDMS) در جداسازی ترکیبات معطر توت فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که شار جرمی و گزینش پذیری محلول آبی متیل بوتیرات با افزایش دمای خوراک یا کاهش فشار پایین دست افزایش یافت. انتخاب پذیری با افزایش غلظت خوراک محلول‌های آبی دوتایی حاوی متیل بوتیرات و اتیل بوتیرات کاهش یافت [۳۴].

De Assis و همکاران (۲۰۰۷) عملکرد غشاهای POMS در بازیابی ترکیبات معطر از پالپ بادام هندی را ارزیابی کردند. شار تراوش در حدود ۰/۱۱ و ۰/۱۷ کیلوگرم در متر مربع در ساعت ۱ در ۲۵ درجه سلسیوس و ۳۵ درجه سلسیوس بود. با توجه به نتایج آنالیزهای GC-MS، غلظت ترکیبات معطر

به آب غلیظ شده توسط تقطیر اسمزی (OD) اضافه کرد [۳۶].

یک فرآیند غشایی یکپارچه برای تولید آبمیوه غلیظ با کیفیت بالا پیشنهاد شد (شکل ۳). طرح پیشنهادی استفاده از PV را پس از مرحله پکتین زدایی پیشنهاد می‌کند که از دست دادن مولکول‌های معطر را در طول مراحل شفاف‌سازی و غلظت به حداقل می‌رساند. ترکیبات معطر بازیافت شده را می‌توان

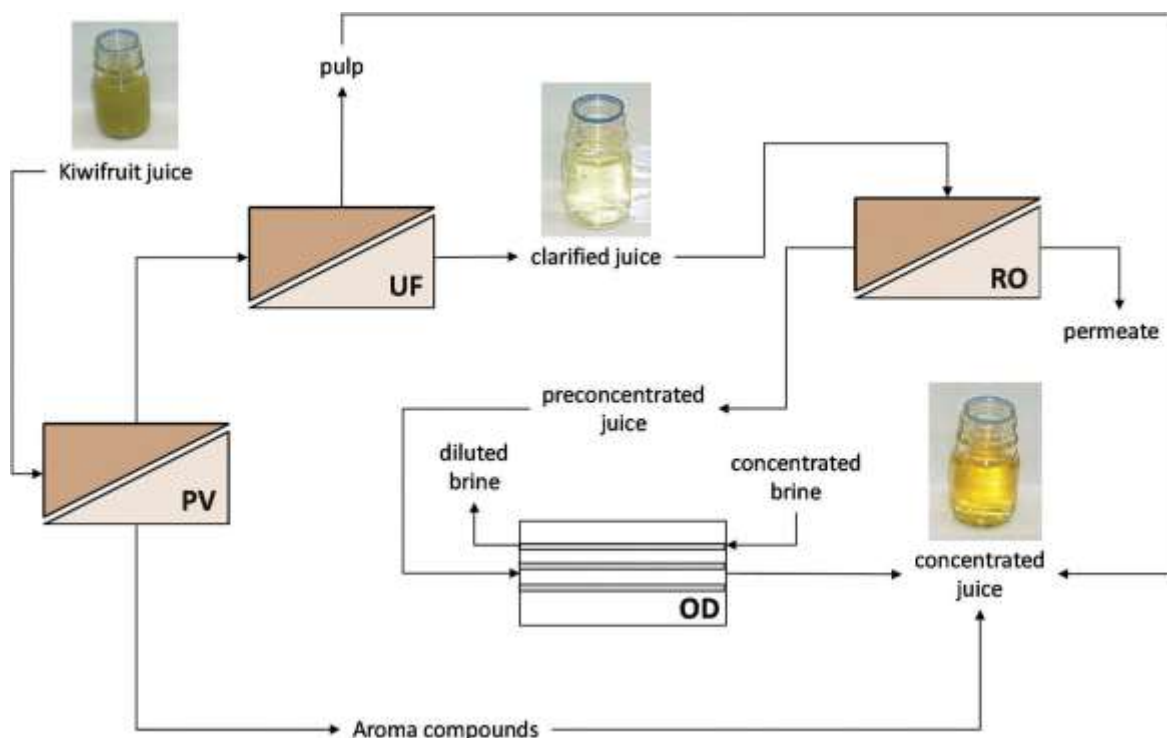


Figure 3- Integrated membrane production process for kiwifruit juice concentration UF, ultrafiltration; RO, reverse osmosis; PV, pervaporation; OD, osmotic distillation

به‌عنوان دمای بازیافت بهینه یافت شد. برخی از ترکیبات عطرو طعمی فرار (مانند اتیل استات، اتیل بوتیرات، هگزانال، لیمونن، لینالول، α -ترپینول) نیز با استفاده از PV از آب پرتقال استخراج شدند. به‌طور خاص، غشای PDMS فاکتور غنی‌سازی بهتری را برای اتیل بوتیرات و هگزانال در هنگام افزایش فشار خلأ نشان داد. در یک رویکرد متفاوت، ۳-متیل بوتانال و ایزوپنتیل استات از آب دیگری (آب انار) با استفاده از دو غشاء مختلف بازیابی شدند. به خصوص POMS به‌عنوان غشای ارگانوفیل، مقادیر β بهتری را برای چنین ترکیباتی نسبت به PDMS نشان می‌دهد. علاوه بر این، نویسندگان اثر دما بر فرآیند بازیابی PV را با رابطه آرنیوس

بر خلاف مطالعه Cassano، که در آن از غشاهای تجاری مبتنی بر PDMS استفاده شد، Figoli و همکاران (۲۰۱۰) از غشاهای کامپوزیتی استفاده کرد که یک لایه فعال ساخته شده از استایرن-بوتادین-کو-استایرن (SBS) را برای بازیابی عطرها از آب کیوی ارائه کردند [۲۵]. چنین غشاهای شاره‌ای نفوذ عطر کم داشتند که کاملاً به دما وابسته بودند. از سوی دیگر، گزینش پذیری نسبت به (E)-2-hexenal، (E)-2-hexenal، 1-octen-2-ol، hexen-1-ol و 1-hexanol بیشتر از غشاهای مبتنی بر PDMS بود. علاوه بر این، بازیابی ترکیبات فرار تحت تأثیر دما در طول فرآیند قرار گرفت. درواقع، نویسندگان به این نتیجه رسیدند که ۳۰ درجه سلسیوس

ایزوبوتانول، ایزوآمیل الکل)، استرها (مانند ایزومیل استات، اتیل استات) و آلدئیدها (مانند استالددید) پیشنهاد کردند. در ابتدا، بازیابی این املاح معطر به منظور برآورده شدن معیارهای ارگانولپتیک آبجو بدون الکل، که معمولاً با حذف اتانول از بین می رود، مورد نیاز است [۳۸].

در مورد آرومای قهوه تاکنون مطالعات زیادی صورت گرفته است. در این مطالعات، عملکرد فرآیند PV برای بازیابی ترکیبات معطر با استفاده از نوشیدنی قهوه و قهوه محلول صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. Hernandez و همکاران (۲۰۲۰) با هدف ارزیابی فرآیند PV در محلولهای آبی رقیق شده دو ترکیب عطر قهوه انجام شد. اثرات دما، غلظت، ترکیب خوراک و فشار نفوذ بر شار نفوذ و گزینش پذیری مورد بررسی قرار گرفت. ترکیبات انتخاب شده بنزآلدئید و اسید استیک بودند که تأثیرات مثبت و منفی بر کیفیت حسی قهوه دارند. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه، همه شارهای نفوذ با دما افزایش یافتند، به دنبال یک رابطه نوع آرنیوس، که در آن دما تأثیر بیشتری بر انتشار نسبت به جذب دارد. فاکتور غنی سازی بنزآلدئید با دما در 270°C افزایش یافت، اما در محدوده 30°C تا 40°C درجه سلسیوس، در 530°C و 800°C تقریباً ثابت باقی ماند. بنابراین، فرآیند PV بنزآلدئید باید در فشارهای پایین تر و دماهای بالاتر انجام شود. با افزایش غلظت خوراک، افزایش شارهای فردی خطی از ترکیبات آلی رخ داد، با این حال هر دو عامل غنی سازی ترکیبات تقریباً ثابت ماندند. از سیستم سه تایی بنزآلدئید - اسید استیک - آب، کاهش در شار و فاکتور غنی سازی برای هر دو بنزآلدئید و اسید استیک رخ داد و چنین کاهشی در غلظت های بالاتر قابل توجه تر بود. این منجر به این فرض می شود که حضور یک مولکول آلی دیگر بر عملکرد تبخیر هر دو ترکیب تأثیر منفی می گذارد. بنزآلدئید به تغییر در ترکیب محلول خوراک در تمام غلظت های مورد مطالعه حساس تر بود [۲۸].

صدف با تولید سالانه بیش از ۶۰۰۰۰۰ تن در سال بخش مهمی از مصرف صدف در سراسر جهان را تشکیل می دهد.

تجزیه و تحلیل کردند. از طریق تجزیه و تحلیل، مقادیر انرژی فعال سازی اجزا مثبت بود، این بدان معنی است که افزایش دمای خوراک ممکن است منجر به مقدار شار بالاتر شود. نکته مهم این است که انرژی فعال سازی ترکیبات معطر بیشتر از آب بوده که نشان می دهد نفوذ ترکیبات معطر از طریق غشاء وابسته به دمای بالاتر از آب است. به طور معمول، هنگامی که انرژی فعال سازی بالا باشد، شار نسبت به تغییرات دما حساس تر خواهد بود. بنابراین، ترکیبات معطر تمایل به حساسیت بیشتری دارند [۳۷].

در بخش میوه، محلول عطری بازیابی شده به نام هیدرولات آب میوه یا آب معطر نیز وجود دارد. این هیدرولاتها محلول های آبی بسیار رقیق شده هستند که در آنها غلظت ترکیبات عطر فرار از ۱ درصد وزنی تجاوز نمی کند. چنین آثاری از ترکیبات برای جداسازی توسط PV مناسب هستند. Dawiec- Liśniewska و همکاران. (۲۰۱۸) غلظت ترکیبات معطر طبیعی از هیدرولات های آب میوه توسط PV را در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه کردند که در آن بهینه سازی و امکان سنجی اقتصادی فرآیند بازیابی نیز به تفصیل مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفت. هیدرولاتها از میوه های آلو، سیب، انگور فرنگی سیاه و گیلان می آیند که دارای طیف وسیعی از اجزای معطر هستند، حاصل می شوند. نویسندگان درواقع حدود ۳۸ ترکیب را در هیدرولات انگور سیاه شناسایی و اندازه گیری کردند، در حالی که ۲۰ و ۱۴ ترکیب مختلف به ترتیب در هیدرولات های سیب و گیلان یافت شد. غشای تجاری آب گریز Pervap 4060 مقادیر β بسیار بالایی را برای چندین ترکیب نشان داد، مانند پنتان-۱-اول ($\beta=5800$)، هگزانال ($\beta=3678$)، بوتیل استات ($\beta=8602$)، هپتان-۱-اول (β) [۲۷].

بر خلاف محصولات طبیعی و فرآورده های جانبی آنها، برخی از محصولات فرآوری شده از صنعت نوشیدنی نیز برای بازیابی املاح معطر در نظر گرفته شده اند، به عنوان مثال. آبجو و شراب. Catarino و همکاران (۲۰۰۹) آبجو را به عنوان منبع بالقوه الکل های خاص (مانند پروپانول،

فرآوری شده استفاده شوند. دمای خوراک تأثیر کمی بر شار نفوذی تری کلرومتان و هگزانال نشان داد، در حالی که فاکتورهای غنی سازی بالاتر برای بنزآلدئید و ۱-octen-3-ol به ترتیب در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و ۴۰ درجه سلسیوس به دست آمد. شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان در ماژول نفوذ نشان داد که رژیم جریان برای همه نرخ های جریان و دماهای مورد استفاده در این کار، آرام است. اگرچه شارهای بالاتر در فشارهای نفوذ کمتر یافت شد، اما بالاترین فاکتورهای غنی سازی (۳۵ برای ۱-octen-3-ol) در فشارهای نفوذی متوسط (۱۷۵۰ Pa) به دست آمد که ممکن است بر اقتصاد فرآیند تأثیر مثبت بگذارد. در نهایت، نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داد که فرآیند تبخیر برای افزودن ارزش به یک ضایعات در صنعت غذاهای دریایی بسیار امیدوارکننده است [۳۰].

. این نرم تنان دوکفه ای ارزش تجاری بالایی دارند، اما به دلیل بار میکروبی زیاد، مانند پاتوژن هایی که در صورت مصرف خام می توانند باعث بیماری و مرگ شوند، بسیار فاسد شدنی هستند. بنابراین از عملیات حرارتی برای افزایش ایمنی این غذای دریایی برای مصرف انسان استفاده شده است. با این حال، برخی از مراحل این فرآیند می تواند پساب هایی مانند آب مورد استفاده در پخت و پز تولید کند که سرشار از ترکیبات آلی فرار موجود در صدف است. این ترکیبات را می توان پس از بهبود و تغلیظ به عنوان عطر طبیعی غذاهای دریایی استفاده کرد. در مطالعه ای، Soares و همکاران (۲۰۲۰) کاربرد فرآیند غشای pervaporation را برای بازیابی ترکیبات آروماتیک از صدف ارزیابی کردند (شکل ۴). ترکیبات معطر مشخصه مهم ۱-octen-3-ol و هگزانال بنزآلدئید به طور انتخابی از صدف تغلیظ شدند که کاربرد عملی این فناوری را برای صنایع غذایی نشان می دهد، زیرا می توانند به عنوان عطر طبیعی در محصولات دریایی

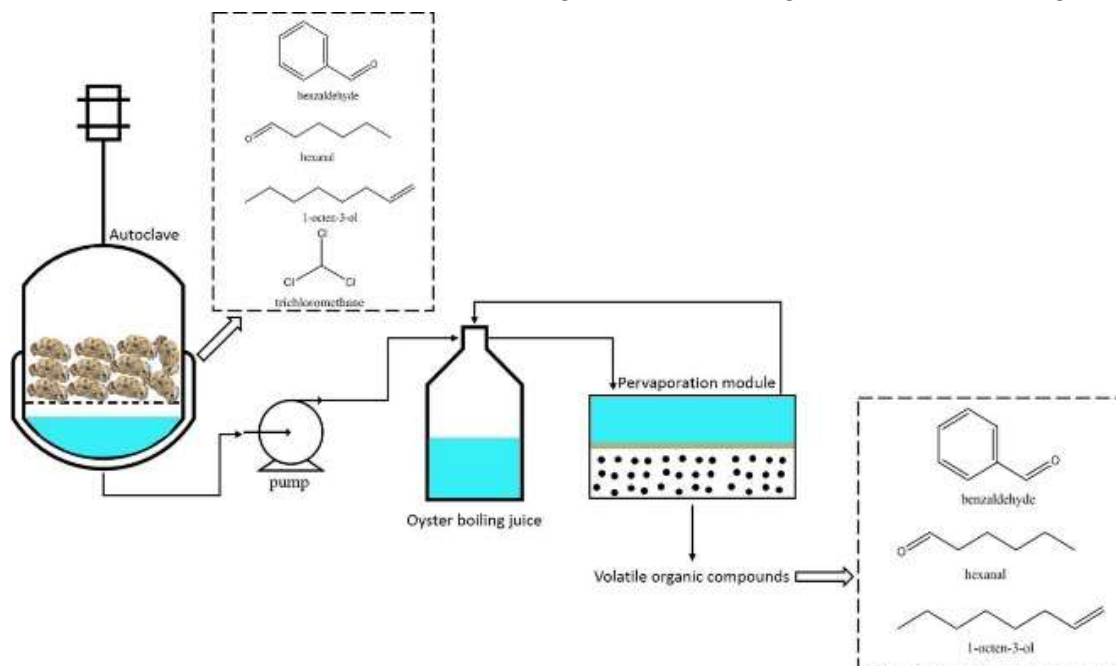


Figure 4- Schematic of the recovery process of aromatic compounds from oysters by PV method [30].

دهنده نتایج موفقیت آمیز این فرآیند بوده اند. در واقع، بیش از ۷۰ نوع مختلف از ترکیبات (از جمله استرها، کتون ها، آلدئیدها، الکل ها، هیدروکربن ها) قبلاً جدا شده اند و بنابراین به طور انتخابی از منابع مختلف با استفاده از غشاهای PV

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، پتانسیل فرآیند تراوش تبخیری در بازیابی ترکیبات معطر بررسی گردید و بیشتر این مطالعات نشان

تضاد منافع

هیچ موردی برای اعلام وجود ندارد.

بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طراحی، تحلیل، نگارش و تایید نسخه نهایی به این ترتیب مشارکت داشته اند.

۸-منابع

- [1] Alharbi, W.N., et al., Extraction of organic volatile pollutants in over-saturated water by pervaporation technique using a poly (dimethylsiloxane)-based sealer as a membrane. *Water*, 2021. 13(8): p. 1049.
- [2] Manshad, S., et al., Membranes with favorable chemical materials for pervaporation process: A review. *Journal of Membrane Science & Technology*, 2016. 6(4).
- [3] Silvestre, W., et al., Pervaporation in the separation of essential oil components: A review. *Trends in food science & technology*, 2019. 93 :p. 42-52.
- [4] Castro-Muñoz, R., M.Z. Ahmad, and A. Cassano, Pervaporation-aided processes for the selective separation of aromas, fragrances and essential (AFE) solutes from agro-food products and wastes. *Food Reviews International*, 2023. 39(3): p. 1499-1525.
- [5] Pereira, M., C. Brazinha, and J. Crespo, Pervaporation recovery of valuable aromas from by-products of the seafood industry: Modelling of fractionated condensation for off-flavour removal. *Separation and Purification Technology*, 2022. 286: p. 1204-1241.
- [6] Sun, X., et al., Production of alcohol-free wine and grape spirit by pervaporation membrane technology. *Food and Bioproducts Processing*, 2020. 123: p. 262-273.
- [7] Schäfer, T. and J.G. Crespo, reactors by pervaporation. *Integration of Membrane Processes into Bioconversions*, 2012: p. 177.
- [8] Castro-Muñoz, R. and J. González-Valdez, New trends in biopolymer-based membranes for pervaporation. *Molecules*, 2019. 24(19): p. 3584.
- [9] Du, C., et al., Green extraction of perilla volatile organic compounds by pervaporation. *Separation and Purification Technology*, 2021. 261: p. 118281.
- [10] Crespo, J. and C. Brazinha, Fundamentals of pervaporation, in *Pervaporation, vapour permeation and membrane distillation*. 2015, Elsevier. p. 3-17.
- [11] Chandane, V.S., A.P. Rathod, and K.L. Wasewar, Enhancement of esterification conversion using pervaporation membrane reactor. *Resource-Efficient Technologies*, 2016. 2: p. S47-S52.
- [12] Molnár, M., E. Márki, and G. Vatai, Preparation of apple spirit by ceramic pervaporation membrane. *Acta Alimentaria*, 2016. 45(4): p. 551-557.
- [13] Camera-Roda, G., et al., A pervaporation photocatalytic reactor for the green synthesis of vanillin. *Chemical engineering journal*, 2013. 224: p. 136-143.
- [14] Olmo, A.d., et al., Setting up of a method of pervaporation for improving alcohol-free beer. *Procedia Engineering*, 2012. 44: p. 1005-1006.
- [15] Unlu, D., Concentration of aroma compounds by pervaporation process using polyvinyl chloride membrane. *Flavour and Fragrance Journal*, 2019. 34(6): p. 493-505.
- [16] Overington, A., et al., Concentration of dairy flavour compounds using pervaporation. *International dairy journal*, 2008. 18(8): p. 835-848.
- [17] Gernat, D., E. Brouwer, and M. Ottens, Aldehydes as wort off-flavours in alcohol-free beers—origin and control. *Food and Bioprocess Technology*, 2020. 13: p. 195-216.
- [18] Bluemke, W. and J. Schrader, Integrated bioprocess for enhanced production of natural

- flavors and fragrances by *Ceratocystis moniliformis*. *Biomolecular Engineering*, 2001. 17(4-5): p. 137-142.
- [19] Souchon, I., et al., Pervaporation as a deodorization process applied to food industry effluents: recovery and valorisation of aroma compounds from cauliflower blanching water. *Desalination*, 2002. 148(1-3): p. 79-85.
- [20] Weschenfelder, T.A., et al., Concentration of aroma compounds from an industrial solution of soluble coffee by pervaporation process. *Journal of Food Engineering*, 2015. 159: p. 57-65.
- [21] Kanani, D.M., et al., Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation. *Industrial & engineering chemistry research*, 2003. 42(26): p. 6924-6932.
- [22] Ribeiro Jr, C. and C. Borges, Using pervaporation data in the calculation of vapour permeation hollow-fibre modules for aroma recovery. *Brazilian journal of chemical engineering*, 2004. 21: p. 629-640.
- [23] Raisi, A. and A. Aroujalian, Aroma compound recovery by hydrophobic pervaporation: the effect of membrane thickness and coupling phenomena. *Separation and Purification Technology*, 2011. 82: p. 53-62.
- [24] Raisi, A., A. Aroujalian, and T. Kaghazchi, Multicomponent pervaporation process for volatile aroma compounds recovery from pomegranate juice. *Journal of Membrane Science*, 2008. 322(2): p. 339-348.
- [25] Figoli, A., et al., Bergamot essential oil extraction by pervaporation. *Desalination*, 2006. 193(1-3): p. 160-165.
- [26] Rossi, S.C., et al., Use of pervaporation process for the recovery of aroma compounds produced by *P. fermentans* in sugarcane molasses. *Bioprocess and biosystems engineering*, 2017. 40: p. 959-967.
- [27] Dawiec, A., et al., Mathematical modeling of sorption step in pervaporative aroma compounds recovery from the multicomponent solution. *Chemical Engineering Science*, 2015. 129: p. 78-90.
- [28] Hernandez, E., T. Weschenfelder, and A. Scheer, Pervaporation process of coffee volatile compounds with PDMS membrane. *International Food Research Journal*, 2020. 27(3): p. 487-496.
- [29] Rui, L., et al., Improving the Pervaporation Separation of Aromatic Components from Lemon Oil Processing Waste Liquid by the Synergistic Effect of Ethanol. *Modern Food Science & Technology*, 2022. 38(11): p. 115968.
- [30] Soares, L.S., et al., Pervaporation as an alternative for adding value to residues of oyster (*Crassostrea gigas*) processing. *Separation and Purification Technology*, 2020. 232: p. 115968.
- [31] Li, J., et al., Fabrication of MWCNTs/PDMS mixed matrix membranes for recovery of volatile aromatic compounds from brewed black tea. *Separation and Purification Technology*, 2021. 259: p. 118101.
- [32] Rao, Y., et al., Efficient recovery of the volatile aroma components from blackberry juice using a ZIF-8/PDMS hybrid membrane. *Separation and Purification Technology*, 2020. 230: p. 115844.
- [33] Xu, S., et al., Enriching volatile aromatic compounds of lavender hydrolats by PDMS/ceramic composite membranes. *Separation and Purification Technology*, 2022. 294: p. 121198.
- [34] Isci, A., S. Sahin, and G. Sumnu, Recovery of strawberry aroma compounds by pervaporation. *Journal of food engineering*, 2006. 75(1): p. 36-42.
- [35] Assis, A.v.R.d., et al., Recuperação e concentração de componentes do aroma de caju (*Anacardium occidentale* L.) por pervaporação. *Food Science and Technology*, 2007. 27: p. 349-354.
- [36] Cassano, A., et al., Nanofiltration and tight ultrafiltration membranes for the recovery of polyphenols from agro-food by-products. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018. 19(2): p. 351.
- [37] Raisi, A., A. Aroujalian, and T. Kaghazchi, A predictive mass transfer model for aroma compounds recovery by pervaporation. *Journal of food engineering*, 2009. 95(2): p. 305-312.
- [38] Catarino, M. and A. Mendes, Non-alcoholic beer—A new industrial process. *Separation and Purification Technology*, 2011. 79(3): p. 342-351.



Scientific Research

Application of pervaporation process in the Extraction of aromatic compounds in the food industry

Asma Basati¹, Bahare Mirpourian²

1-Ph.D. student, Department of Food Science & Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University. Tehran, Iran.

2-Ph.D. student, Department of Food Science & Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University. Tehran, Iran.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2024/02/08 Review: 2024/11/04 Accepted: 2026/04/11 Keywords: Pervaporation, Membrane technology, Aromatic compounds DOI: 10.48311/fsct.2026.83711.0 *Corresponding Author E- asmabasati1726@gmail.com Baharemirpourian@gmail.com	The increasing trend in the consumption of food flavoring compounds has motivated the production of food flavors. Conventional techniques for the production of flavoring compounds are not sufficient in terms of quantity and variety due to the rising market demand, pervaporation as a reliable membrane process has grown rapidly compared to other conventional techniques for the recovery of aromatic compounds from agro-food systems. Pervaporation is a membrane separation process based on the use of non-porous membranes that selectively regulates the transfer of target molecules dissolved in the liquid feed mixture, and especially due to low energy consumption, no addition of chemicals to achieve separation and maintain the integrity of aromatic compounds. It has been welcomed. More than 70 different types of aromatic compounds including esters, ketones, aldehydes, alcohols, and hydrocarbons, such as ethyl acetate, ethyl butyrate, hexanal, limonene, linalool, α-terpineol, benzaldehyde, 1-3-l-octane hexanal and benzaldehyde from various sources including coffee, strawberry, cashew, kiwi juice, orange juice, plum, apple, black grape and cherry fruits, seashells were selectively recovered using PV membranes and PDMS, PEBA and POMS (hydrophobic/organophilic membranes) membranes were used for recovery. Process parameters such as extraction efficiency, feed composition, pressure, module type, feed flow rate, and feed temperature, had different effects on the number of aromatic compounds extracted from various investigated materials and most of these studies have shown the successful results of this process. However, there are still some other new membrane materials (such as PU copolymer, P(VDF-co-HFP), SBS) that should be further evaluated in this field.