



سال سوم، شماره ۱۳
زمستان ۱۳۹۱، صفحات ۵۵-۴۱

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

استخراج روغن کنجد به وسیله سیال فوق بحرانی دی اکسید کربن

سید امیر موسوی

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی
Seyedamir1984@gmail.com

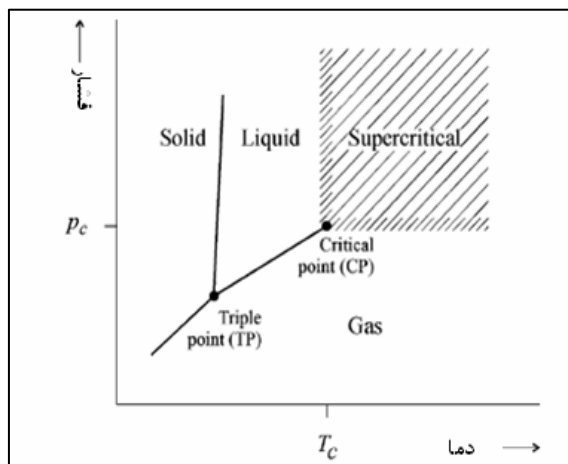
ناصر شبانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

چکیده

تکنیک جداسازی توسط گازهای فوق بحرانی کاربرد مؤثر و وسیعی در صنایع غذایی پیدا کرده است به طوری که در حال حاضر چندین شرکت بزرگ روش‌های جداسازی فوق بحرانی را در مورد تصفیه و تولید مواد غذایی به کار می‌بندند. این رشته از صنایع غذایی در کشور آلمان پیشرفت قابل ملاحظه‌ای نموده است. به عنوان مثال، استخراج مواد کافینی از قهوه و مواد گیاهی و چای استخراج نیکوتین از تنباکو به وسیله گاز دی اکسید کربن تحت شرایط فوق بحرانی انجام می‌شود. هم‌چنین در سال‌های اخیر، غذاهای حاوی کلسترول مشکلات زیادی را از نظر سلامتی برای انسان به وجود آورده‌اند. کلسترول به راحتی در دی اکسید کربن فوق بحرانی محلول است و این موضوع نوید بخش جداسازی کلسترول از مواد غذایی با منشاء حیوانی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سیال فوق بحرانی، کلسترول، دی اکسید کربن.



شکل ۱: محدوده حالت فوق بحرانی برای یک ماده خالص

محدوده حالت فوق بحرانی برای یک ماده خالص

زیر نیز دما و فشار - برای آشنایی بیشتر در جدول ۱ بحرانی چند حلال ارائه شده است. تحت شرایط فوق بحرانی یک سیال، یک مخلوط حاوی سیال فوق بحرانی و یک یا چند ماده حل شونده، رفتار تعادل فازی و دیگر مشخصات) مانند پدیده‌های انتقال (غیر منتظره و غیر معمول از خود نشان می‌دهد که این امر باعث ایجاد جذابیت برای محققان شده است تا از این خواص برای انجام موفقیت آمیز فرایندهای شیمیایی استفاده شود.

مقدمه

سیالات فوق بحرانی موادی هستند که در فشار و دمای بالاتر از حالت بحرانی خود قرار دارند که موجب می‌شود که خصوصیات این سیالات در محدوده وسیعی تغییر کند. قدرت حلالیت آن‌ها برای مواد غیر قطبی یا با قطبیت کم بسیار بالاست که با افزایش جرم مولکولی کاهش می‌یابد. سیالات فوق بحرانی برای استخراج جامدات به صورت ناپیوسته، برای جداسازی مایعات به صورت چند مرحله‌ای ناهمسو، برای جذب سطحی و هم‌چنین برای فرایند کروماتوگرافی استفاده می‌شوند. کاربردهای خاص آن در صنایع غذایی نیز شامل استخراج کافئین از دانه‌های قهوه سبز، تولید عصاره آبجو، بهبود بو و مزه گیاهان و ادویجات، استخراج و تفکیک جزء به جزء روغن‌های خوراکی و حذف مواد آلاینده و موارد دیگر است.

یک ماده خاص هنگامی به صورت فوق بحرانی فرض می‌شود که دما و فشارش بیش از حالت بحرانی باشد و از مشخصات آن محدوده، عدم امکان تبدیل به مایع تحت هرگونه افزایش فشار می‌باشد. این محدوده در شکل [۱] به صورت خطوط هاشورزده مشخص شده است. این خصوصیات مختلف می‌تواند بسیار زیاد باشد و تأثیرات مختلف و زیادی را بر جسم حل شده و واکنش دهنده اعمال کند. (در حالت $P > P_c$ و $T < T_c$ می‌توانیم به حالت مایعی برسیم که اثری شبیه حالت فوق بحرانی دارد).

جدول ۱- خواص بحرانی چند حلال فوق بحرانی

چگالی بحرانی (Kg/m^3)	فشار بحرانی (Mpa)	دمای بحرانی (K)	حلال
۵۷۹	۳/۹۲	۳۰۲	کلروفلورومتان
۴۶۸	۷/۳۸	۳۰۴/۲	دی اکسید کربن
۲۰۳	۴/۸۸	۳۰۵/۴	اتان
۲۲۳	۴/۴۲	۳۶۵	پروپیلن
۲۳۵	۱۱/۳	۴۰۵/۶	آمونیاک
۲۶۵	۳/۶۴	۴۶۷/۷	دی اتیل اتر
۲۲۷	۳/۲۷	۴۶۹/۶	نرمال پنتان
۲۷۸	۴/۷	۵۰۸/۱	استن

سیالات فوق بحرانی (SCFs)، نیرو محرکه لازم (نیروی پتانسیل متحرک) برای انتقال جرم و حرارت به وسیله اختلاف از حالت تعادل محاسبه می‌شود.

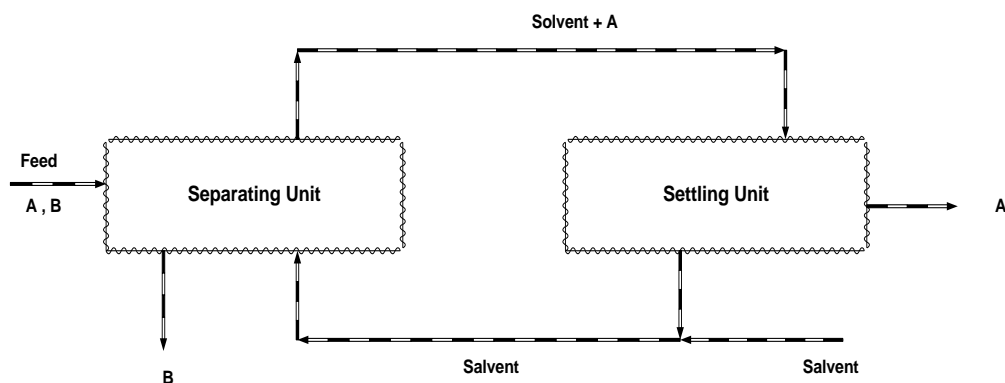
مشخصات ویژه برای حالت‌های گاز، مایع و حالت فوق بحرانی نیز در جدول ۲ وجود دارد. در حالت فوق بحرانی دانسیته - نیز در جدول وجود دارد. های شبیه حالت مایع، ویسکوزیته نزدیک به گازهای معمولی و با ضریب نفوذی به بزرگی ۲ برابر مایعات نمونه، مواجه‌ایم. در فرایندهای با

جدول ۲- مقادیر مشخصه گاز، مایع و حالت فوق بحرانی

State of the Fluid	Density (g/cm ³)	Diffusivity (cm ² /s)	Viscosity (g/cm/s)
Gas			
P=1 atm , T=15-30°C	$(0.6-2.0) \times 10^{-3}$	0.1-0.4	$(0.6-2.0) \times 10^{-4}$
Liquid			
P=1 atm , T=15-30°C	0.6-1.6	$(0.2-2.0) \times 10^{-5}$	$(0.2-3.0) \times 10^{-2}$
Supercritical Fluid			
P=P _c ; T≈T _c	0.2-0.5	0.7×10^{-3}	$(1-3) \times 10^{-4}$
P=4P _c ; T≈T _c	0.4-0.9	0.7×10^{-3}	$(3-9) \times 10^{-4}$

قرار دارد به کار می‌برند مکانیسم اساسی این فرایند را می‌توان با مکانیسم فرایند دو مرحله‌ای توصیف کرده و با شکل زیرنمایش داد.

هم‌چنان‌که گفته شد در روش جداسازی با سیال فوق بحرانی گازی را به منزله عامل جداکننده (حلال) که تحت فشار و دمای عملیاتی بالاتر از فشار و دمای بحرانی اش



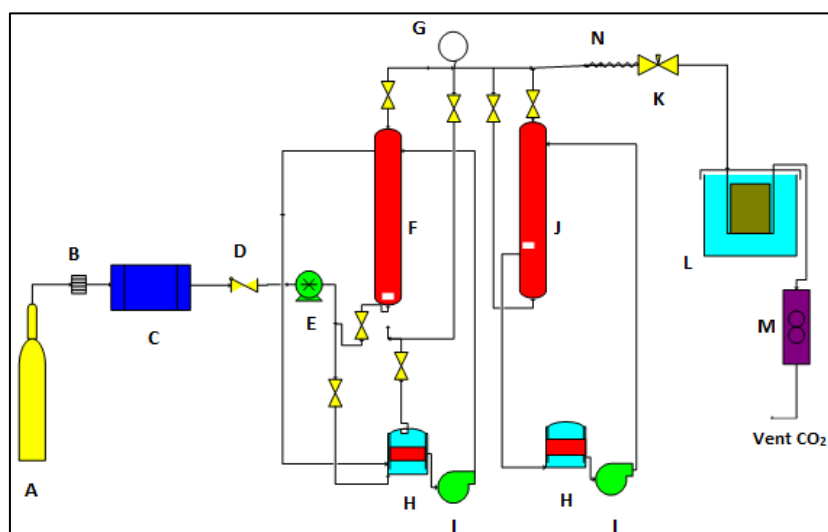
ویتامین‌ها و ترکیبات معطر نگردد، و از طرف دیگر فشار آن نیز نباید در حدی باشد که باعث پیچیده و هزینه دار شدن فرایند شود. هم‌چنین غیر سمی و غیر منفجره بودن آن نیز باید مد نظر قرار گیرد.

توصیف ترمودینامیکی یک سیال فوق بحرانی نسبتاً پیچیده است. مدل‌های تعادل فاز و معادلات حالت از اصول ترمودینامیکی هستند که برای توصیف کمی و ریاضی قدرت حل کنندگی سیال فوق بحرانی استفاده می‌شوند. در انتخاب سیال مناسب در فرایندهای صنایع غذایی باید توجه داشت که دمای فوق بحرانی آن به گونه‌ای باشد که باعث تغییر و یا نابودی ترکیبات حساس به حرارت مانند

پمپ می‌گردد. با توجه به فشار گاز داخل کپسول دمای چرخه تبرید تعیین می‌شود تا علاوه بر ایجاد مایع دی اکسید کربن، از انجماد آن و مسدود شدن مسیر جریان نیز جلوگیری به عمل آید. با وارد شدن مایع به داخل پمپ و پمپاژ آن تا فشار مورد نظر، دی اکسید کربن مایع با فشار بالا وارد مخزن نوسان گیر می‌شود. ظرف نوسان گیر مشابه ظروف استخراج ساخته شده است. این ظرف علاوه بر جلوگیری از نوسانات فشار، وظیفه تنظیم دمای سیال را توسط آب گرم به دمای مورد نظر، به عهده دارد. پس از آن، با باز کردن شیر، سیال فوق بحرانی وارد ظرف استخراجی می‌شود که خوراک قبلاً درون آن بارگذاری شده است.

۲-۱ نحوه انجام آزمایش

دانه‌های روغنی آماده شده پس از آسیاب کردن، با استفاده از مجموعه الک، به اندازه مش مورد نظر جدا می‌شود. با توجه به آزمایش مقدار لازم دانه روغنی توزین شده با مقدار لازم کمک حلال اتانول مخلوط می‌شود. از پرکننده‌های شیشه‌ای با قطر ۱ میلی متر استفاده شده و با استوانه مدرج حجم آن اندازه گیری می‌شود. قبل از عمل بارگذاری، ظرف استخراج را با الکل تمیز کرده تا روغن باقی مانده از آزمایش‌های قبل در آن باقی نماند. دستگاه را روشن و در دمای مورد نظر قرار می‌دهیم تا ظرف استخراج و پرکننده‌ها به دمای مورد نظر برسند پس از تثبیت دمای ظرف استخراج، بارگذاری دانه‌های روغنی انجام می‌شود. گاز خارج شده از کپسول دی اکسید کربن وارد چرخه تبرید می‌شود و پس از تبدیل آن به مایع، وارد



A: مخزن گاز دی اکسید کربن B: فیلتر C: سردکننده گاز D: شیریکطرفه E: پمپ فشارقوی
F: مخزن نوسانگی G: فشارسنج H: حمام آب گر I: پمپ آ J: ظرف استخراج K: شیر فشارکن L: ظرف جمع آور
M: جریان سنج N: گرم کننده شیرفشارکن

ظرف استخراج، در ورودی و خروجی، از فشارسنج نیز استفاده شده است. با کنترل دما و فشار می‌توان به شرایط مورد نظر رسید. پس از گذشت مدت زمان لازم استخراج به صورت استاتیک، شیر خروجی باز شده و با تنظیم مقدار

شیر خروجی ظرف استخراج بسته شده است و سیال در تماس با خوراک قرار داده می‌شود. ترمومتر جهت کنترل دمای آب و ظرف استخراج، در ورودی و خروجی آن ظرف تعبیه شده است. همچنین به منظور کنترل فشار

استفاده در مدل‌سازی ارائه شده، و با توجه به استفاده از دو مدل سلول‌های شکسته و سالم و مدل دانه و بستر، نتایج آزمایشگاهی برای هر کدام از این مدل‌ها به صورت جداگانه گزارش و مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به این که کیفیت روغن به دست آمده از اهمیت خاصی برخوردار است، آنالیز مربوط به میزان اسیدهای چرب موجود در روغن استخراج شده در ادامه ارائه شده است.

آزمایش‌های مربوط به مدل سلول‌های شکسته و سالم

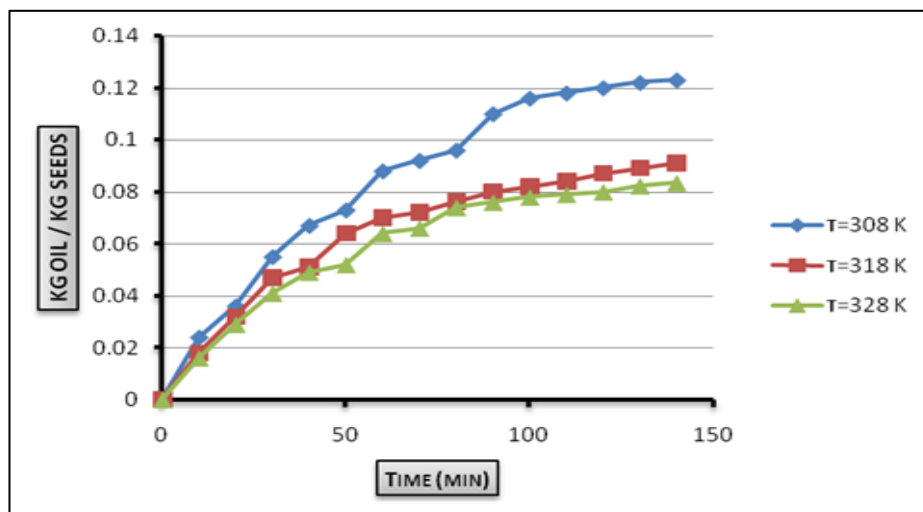
اثر فشار

تأثیرات فشار در سه آزمایش مختلف در فشارهای ۲۰/۱۷/۱۳ مگاپاسکال بررسی شد. افزایش فشار موجب افزایش دانسیته دی اکسید کربن (حلال) شده و به تبع آن، حلالیت نیز افزایش می‌یابد و حلال توانایی و قدرت بیشتری پیدا می‌کند، و همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش در استخراج روغن از دانه روغنی را موجب می‌شود. در این مورد نیز در سه آزمایش مختلف، ۲ و ۳ و جدول (۵-۱) اثر فشار مورد بررسی قرار گرفت شکل ۱ با افزایش فشار از ۱۳ مگاپاسکال به ۱۷ مگاپاسکال درصد استخراج ۴۹/۶۷ و با افزایش فشار از ۱۳ مگاپاسکال به ۲۰ درصد استخراج روغن در حدود ۱۰۳ درصد افزایش پیدا می‌کند. با افزایش فشار زمان استخراج نیز بسیار کوتاه تر می‌شود. البته از لحاظ اقتصادی و اجرای طرح‌های صنعتی باید هزینه ساخت دستگاه هم در نظر گرفته شود که با افزایش فشار دستگاه، بسیار بالا می‌رود. همان‌طور که در شکل (۱) و پیوست الف (جدول الف ۱) نشان داده شده است در فشار ۲۰ (۰ مگاپاسکال در زمانی حدود ۳۰ دقیقه به درصدی از استخراج روغن می‌رسیم که در مدت ۹۰ دقیقه در فشار ۱۷ مگاپاسکال و ۱۳۰ دقیقه در فشار ۱۲ مگاپاسکال خواهیم رسید. با این نمونه به خوبی می‌توان اثر فشار را درک نمود.

جریان توسط جریان سنج، مرحله استخراج دینامیکی آغاز می‌گردد. در این مرحله باید نحوه شکستن فشار و خارج شدن از ناحیه بحرانی نیز مورد توجه قرار گیرد، زیرا افت فشار شدید جریان سیال، تحول خفگی یا انبساط ژول تامسون را موجب می‌شود. با توجه به مثبت بودن ضریب ژول تامسون دی اکسید-کربن این امر سبب کاهش شدید دما در محل شیر فشار شکن می‌شود، لذا باید این محل را توسط گرم کن، گرم کرده تا مانع از ایجاد یخ خشک و منجمد شدن دی اکسید کربن و مسدود شدن مسیر جریان شود. برای این منظور از المنت‌های حرارتی با سیستم کنترل دما، استفاده شده است. با شکستن فشار در حدود فشار اتمسفر، گاز وارد ظرف جداسازی می‌شود. با عبور گاز از قسمت U شکل ظرف و سرد شدن آن، مواد حل شده در دی اکسید کربن از آن جدا و ته نشین می‌گردد و از شیر پایینی ظرف خارج می‌شود. دی اکسید کربن نیز به صورت گاز در آمده و از شیر بالایی ظرف خارج می‌شود. پس از گذشت مدت زمان لازم برای استخراج در حالت دینامیک مرحله تخلیه شروع می‌شود. در این مرحله پس از مسدود کردن مسیر گاز ورودی، گاز موجود در ظرف خارج می‌شود. پس از رسیدن فشار درون ظرف استخراج به فشار اتمسفر، درب آن باز شده و مواد داخل آن تخلیه می‌گردد.

بررسی پارامترها

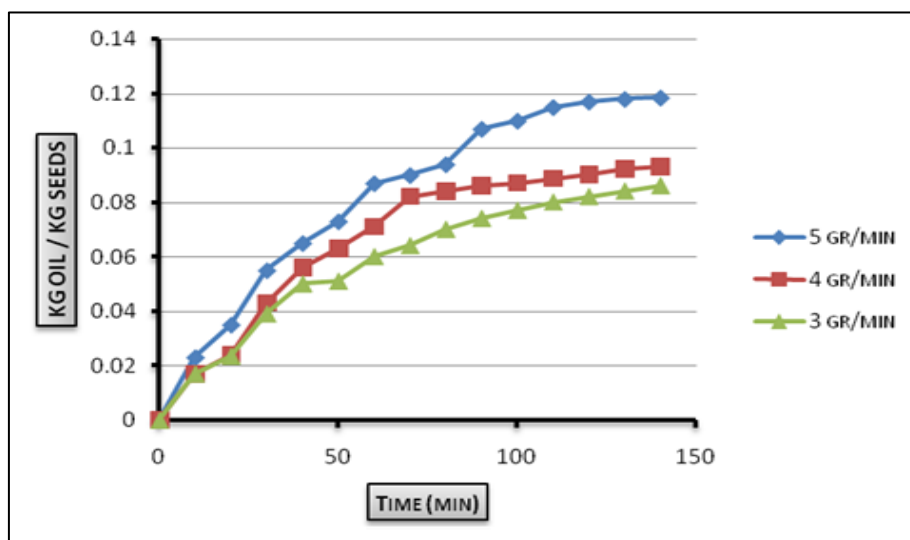
در این بخش نتایج آزمایشگاهی استخراج روغن از دانه‌های ی روغنی کنجد با استفاده از دی اکسید کربن فوق بحرانی گزارش شده است. نتایج بر اساس طراحی آزمایش ارائه شده در فصل پنجم می‌باشد و نتایج به صورت نمودار نشان داده شده است. همان‌طور که در فصل قبل نیز گفته شد، آزمایش‌ها در دو ظرف استخراج مختلف با شرایط استخراج متفاوت انجام شده و داده‌های عددی مربوطه، به صورت جدول درزی موجود می‌باشد. از آن جا که مدل‌سازی فرایند استخراج با کمک سیال فوق بحرانی هدف این پژوهش می‌باشد، نتایج آزمایشگاهی به صورت قابل



شکل ۱: نمودار مقایسه‌ای استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در دماهای مختلف، فشار ۲۰ مگاپاسکال، اندازه ۰/۱۵ میلی متر، شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه اثر دما

و با افزایش دما، درصد استخراج می‌تواند افزایش یابد (۲-۳) در این پژوهش افزایش دما اثر معکوس بر روی درصد استخراج، به دلیل انجام آزمایش حداکثر در فشار ۳۰ مگاپاسکال به ما نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲-۶) دیده می‌شود، با افزایش دما، از ۳۰۸ به ۳۱۸ درجه کلوین ۳۱/۲۷ و با افزایش دما از ۳۰۸ به ۳۲۸ درجه کلوین ۴۴/۵۳ می‌باشد.

در آزمایش‌های ۵/۴/۳ جدول ۲-۵ اثرات دما بر درصد استخراج مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر دما می‌تواند اثر دوگانه‌ای بر استخراج داشته باشد. افزایش دما، موجب کاهش چگالی حلال، و افزایش فشار بخار روغن می‌شود. کاهش چگالی اثر منفی و افزایش فشار بخار اثری مثبت بر استخراج دارد. با توجه به شرایط آزمایش هر کدام از این دو پارامتر می‌تواند تأثیرگذار باشد. اصولاً در فشارهای بالاتر از ۳۵ مگاپاسکال اثر فشار بخار بیشتر نمایان می‌شود



شکل ۲: نمودار مقایسه‌ای استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در شدت جریان‌های مختلف، فشار ۲۰ مگاپاسکال، اندازه ذرات ۰/۱۵ میلی متر و دمای ۳۰۸ کلوین

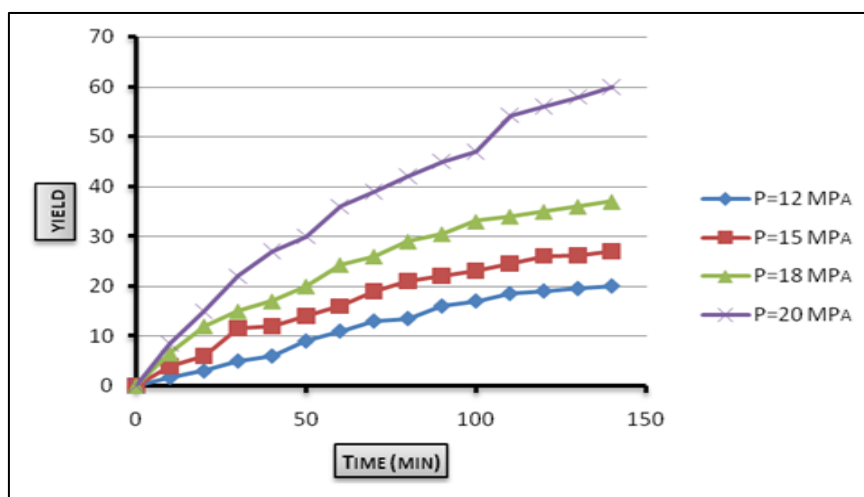
در شکل [۳] مشاهده نمود. با افزایش شدت جریان درصد استخراج افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به دلیل افزایش اختلاف غلظت بین حلال و ذره پیدا می‌شود [۴] این نیروی

اثر شدت جریان

اثر شدت جریان در ۳ آزمایش ۷/۶/۲۳ بر روی درصد استخراج روغن بررسی گردید. اثر این پارامتر را می‌توان

باید توجه داشت که مقدار مصرف حلال نیز افزایش پیدا کرده است. اما در عین حال با توجه به شکل (۳-۶)، در مقدار مساوی حلال نیز، با افزایش شدت جریان، درصد استخراج افزایش پیدا می‌کند. در مدت زمان ۱۴۰ دقیقه با افزایش شدت جریان ۷ درصد و / از ۳ به ۴ گرم بر دقیقه درصد استخراج در حدود ۷/۴۶ درصد افزایش / با افزایش شدت جریان به ۵ گرم بر دقیقه ۳ پیدا می‌کند.

محرکه اثر خود را در شکل [۳] به خوبی نشان می‌دهد. در ابتدای نمودار به دلیل آن‌که، غلظت حل شونده بر روی سطح زیاد است، این عامل اثر خود را نشان نمی‌دهد اما به تدریج با گذشت زمان اثر این عامل، مشهود است. البته شدت جریان می‌تواند اثر معکوس نیز بر درصد استخراج داشته باشد. شدت جریان زیاد، زمان ماند حلال در ظرف استخراج را کاهش داده و لذا موجبات مصرف زیاد حلال را فراهم خواهد نمود. لذا می‌بایست شرایط بهینه‌ای را در عملیات استخراج به دست آورد [۵] در شکل [۳] اثر شدت جریان نسبت به زمان استخراج نشان داده شده است. البته

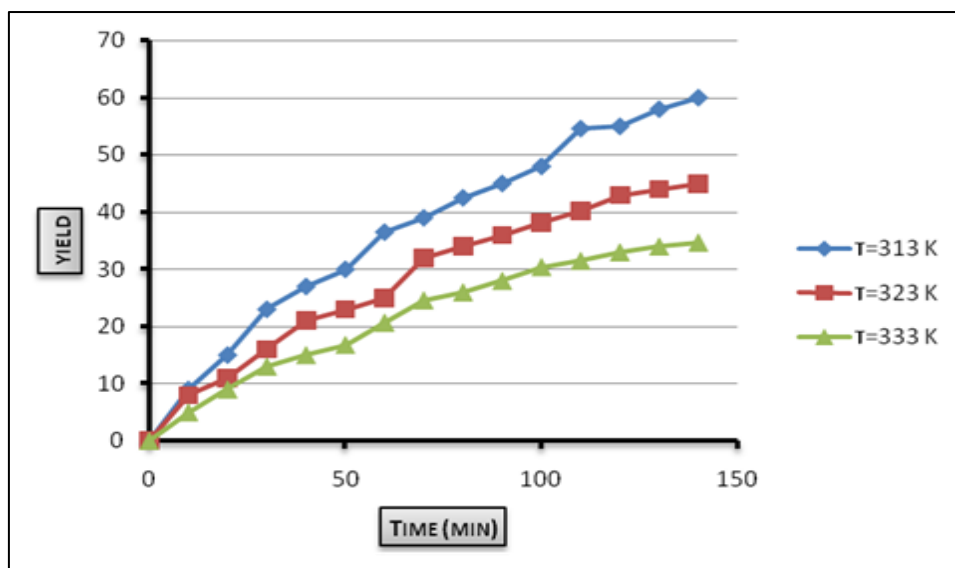


شکل ۳: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در فشارهای مختلف، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه و تخلخل بستر ۰/۴۵

اثر فشار

فشار در پایان ۱۹۰ دقیقه، با افزایش فشار از ۱۳ به ۱۵ مگاپاسکال درصد ۳۲ و با افزایش فشار از ۱۵ به ۳۰ مگاپاسکال / استخراج درصد استخراج ۱۰۲/۷ افزایش می‌یابد. این مطلب نشان می‌دهد که اثر فشار می‌تواند در استخراج روغن از دانه کنجد بسیار مؤثر باشد.

اثر فشار بر درصد استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در ۴ فشار مختلف (آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴) مورد بررسی قرار گرفته است که طراحی آزمایش آن وجود دارد. به دلیل تاثیر افزایش فشار بر افزایش چگالی حلال و به موجب آن افزایش حلالیت روغن در دی اکسید کربن، همان طور که انتظار می‌رفت افزایش فشار، استخراج روغن از دانه روغنی کنجد را نیز افزایش داد. با مقایسه اثرات



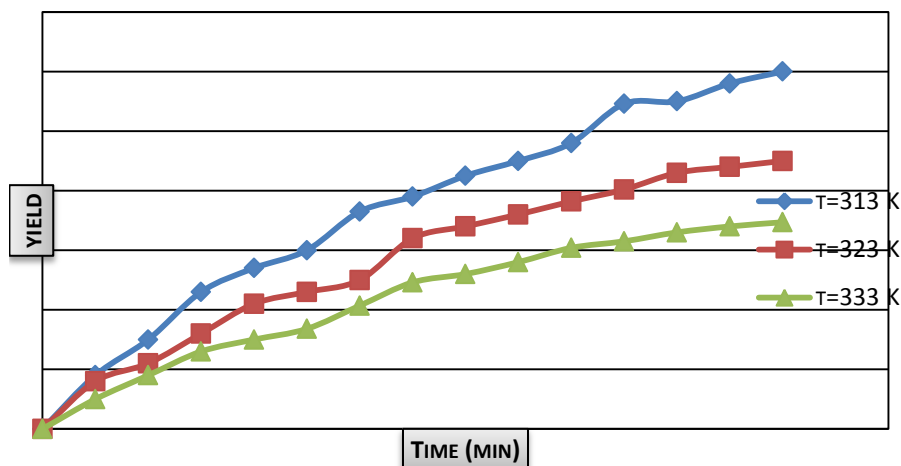
شکل ۴: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در فشارهای مختلف، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه و تخلخل بستر ۰/۴۵

اثر دما

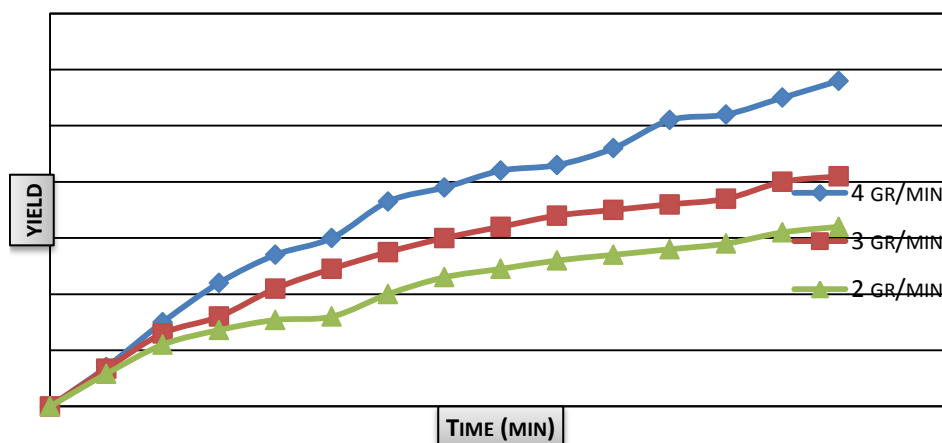
اثر دما بر روی استخراج روغن از دانه روغنی کلزا در ۳ آزمایش [۴، ۵ و ۶] جدول [۵-۲] مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر معکوس افزایش این پارامتر در فشار ۲۰ مگاپاسکال بر روی درصد استخراج روغن را می‌توان در شکل ۵-۶ مشاهده نمود. در این فشار اثر چگالی بیشتر از اثر فشار بخار حل شونده خود را نشان می‌دهد. افزایش دما درصد استخراج را از حدود ۶۱ درصد در دمای ۳۱۳ درجه کلوین به حدود ۴۸ درصد در دمای ۳۲۳ و ۳۹ درصد در دمای ۳۳۳ کلوین در مدت زمان ۱۴۰ دقیقه، کاهش داده است. می‌توان اظهار داشت که افزایش دما با کاهش چگالی سیال فوق بحرانی اثری عکس بر استخراج روغن کنجد دارد. البته اگر از فشارهای بالا استفاده شود می‌توان با بالا بردن دما از اثر فشار بخار در جهت افزایش درصد استخراج نیز استفاده کرد [۶].

اثر شدت جریان

با افزایش شدت جریان این امکان به وجود می‌آید که سیال تازه بیشتر در تماس با ذره باشند و باعث می‌شود درصد استخراج افزایش پیدا کند. جهت بررسی این تاثیر آزمایش‌های (۷، ۸ و ۹) از جدول (۵-۲) انجام شد. با افزایش شدت جریان از ۲ گرم بر دقیقه به ۳ گرم بر دقیقه درصد استخراج همان‌طور که در شکل (۶-۶) مشاهده می‌شود، از ۳۶/۹۵ درصد به ۴۴/۰۵ درصد افزایش پیدا می‌کند و با افزایش شدت جریان از ۲ گرم بر دقیقه به ۴ گرم بر دقیقه درصد استخراج روغن از ۴۴/۰۵ به ۶۰/۸۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. البته در بعضی از تحقیقات به علت کوچک بودن حجم ظرف استخراج زمان ماند سیال در درون ظرف کاهش می‌یابد و سیال زمان ماند کافی برای حل کردن ماده حل شونده در درون خود نداشته باشد و افزایش شدت جریان اثر معکوس بر روی درصد استخراج می‌گذارد.



شکل ۵: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در دماهای مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، تخلخل بستر ۴۵ درصد و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه

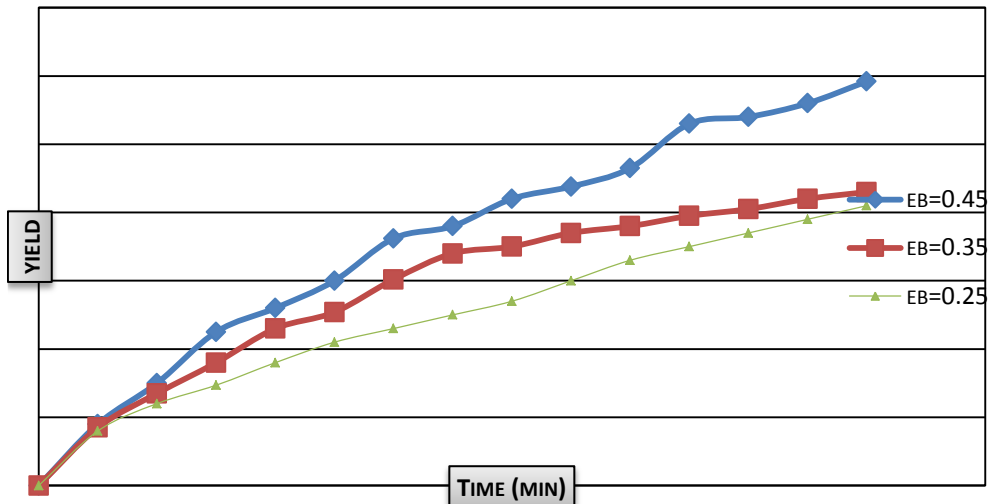


شکل ۶: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در شدت جریان‌های مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و تخلخل بستر ۴۵ درصد

در درون ذره، این امر بیشتر خود را نشان می‌دهد، زیرا سیال زمان کافی را برای نفوذ در درون ذره و استخراج مواد را پیدا می‌کند. این مساله موجب افزایش درصد استخراج روغن می‌شود. در زمان ۱۴۰ دقیقه با افزایش تخلخل بستر از ۰/۲۵ به ۰/۴۵ درصد استخراج روغن ۳۷/۳۲ درصد افزایش می‌یابد.

اثر تخلخل بستر

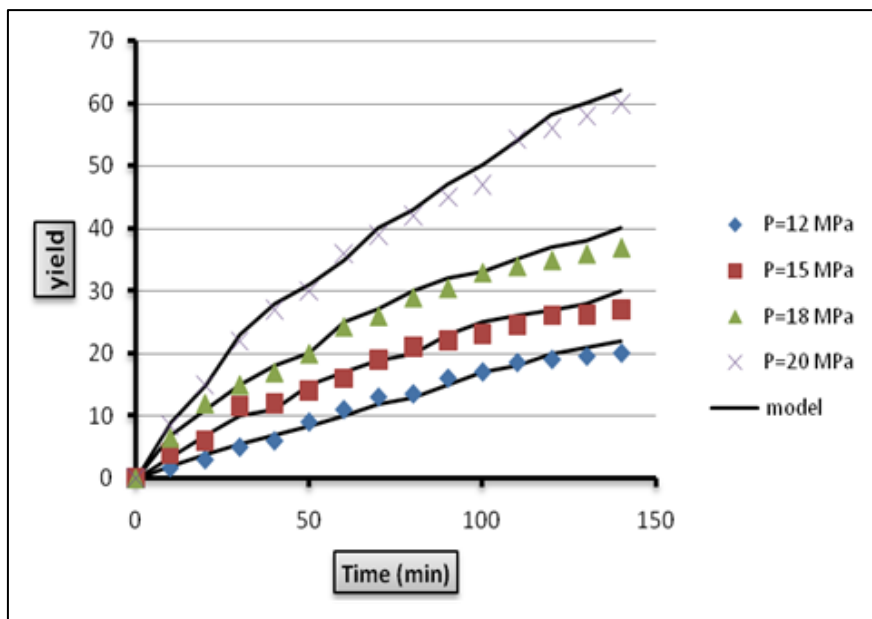
در بررسی اثر تخلخل بستر در سه آزمایش (۴، ۱۰ و ۹) جدول (۵-۲) با اندازه‌های ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ بررسی شده و اثر آن بر روی درصد استخراج مورد بررسی قرار گرفت. افزایش تخلخل بستر موجب بیشتر شدن فضای خالی درون بستر و افزایش زمان ماند سیال جهت حل کردن مواد درون خود، می‌گردد. با گذشت زمان و شروع مرحله نفوذ سیال



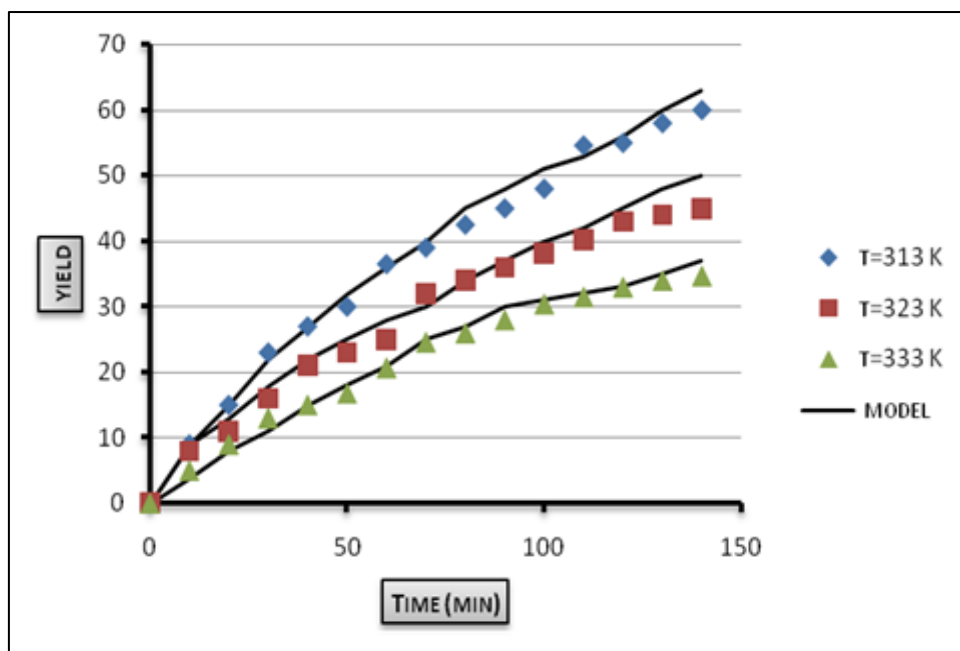
شکل ۷: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد با تخلخل بستر متفاوت، مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه

شده و روغن به دست آمده برای انجام آزمایش اسیدهای چرب مورد استفاده قرار گرفت.

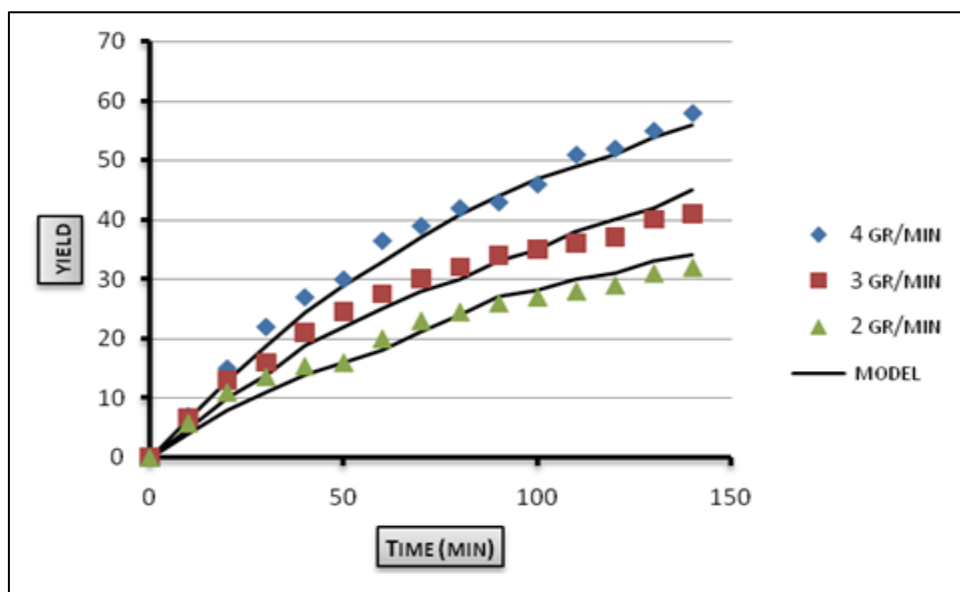
برای تهیه روغن جهت انجام آنالیزهای روغن کنجد با دستگاه کروماتوگرافی گازی آزمایشی را در مدت ۸ ساعت و با شرایطی که در نمودار ۶-۸ گزارش شده است انجام



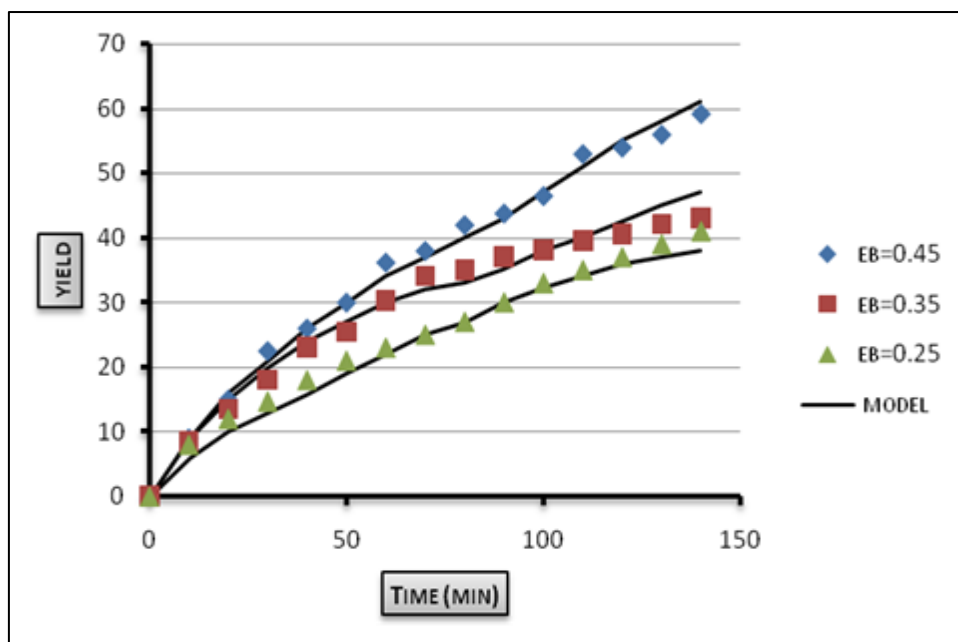
شکل ۸: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در فشارهای مختلف، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه و تخلخل بستر ۰/۴۵



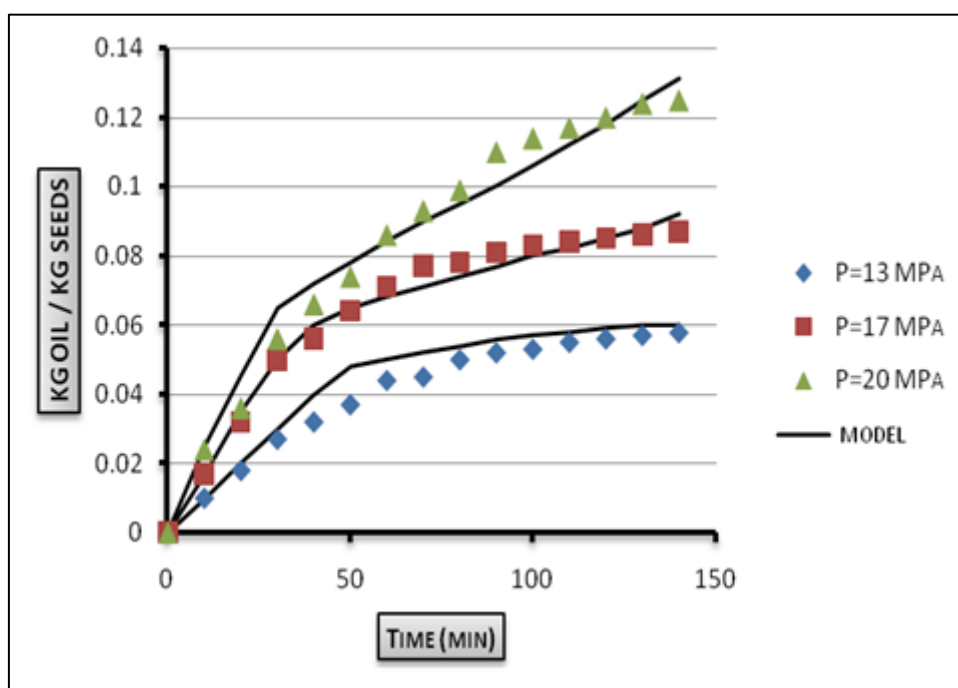
شکل ۹: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در دماهای مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، تخلخل بستر ۴۵ درصد و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه



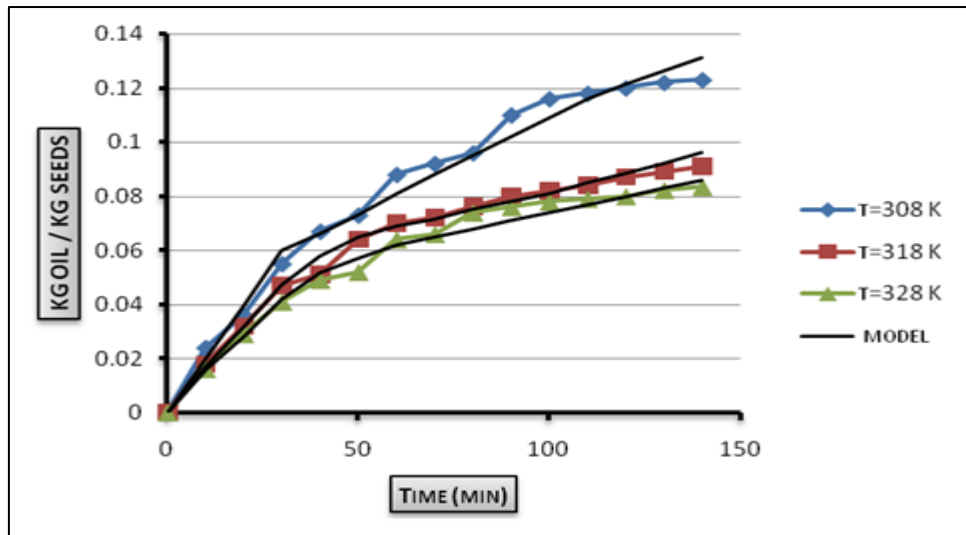
شکل ۱۰: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در شدت جریانهای مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، دمای ۳۱۳ درجه کلون و تخلخل بستر ۴۵ درصد



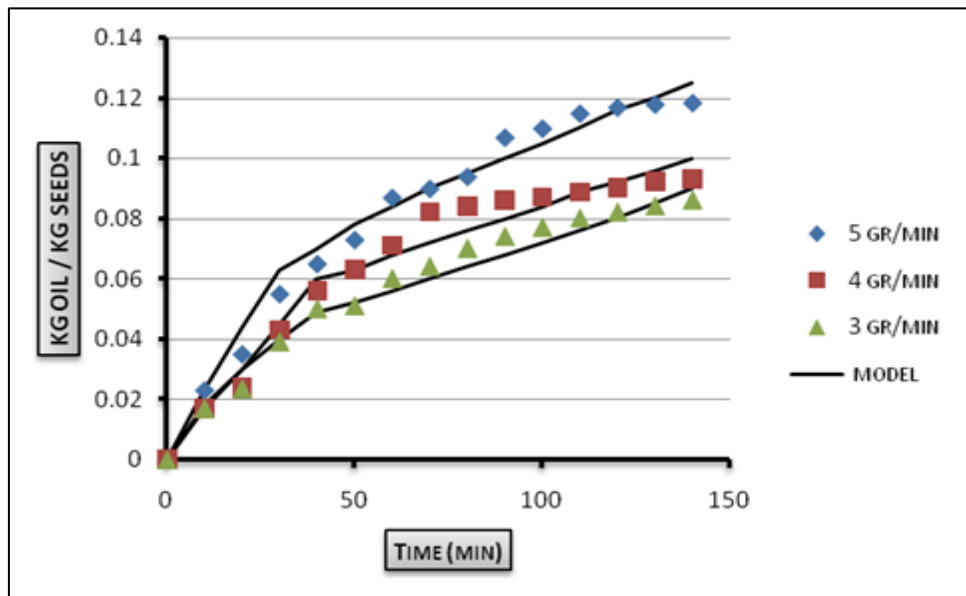
شکل ۱۱: نمودار مقایسه بازده استخراج روغن از دانه روغنی کنجد با تخلخل بستر متفاوت، مختلف در فشار ۲۰ مگاپاسکال، دمای ۳۱۳ درجه کلوین و شدت جریان ۴ گرم بر دقیقه



شکل ۱۲: نمودار مقایسه مدل با نتایج آزمایشگاهی استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در فشارهای مختلف دمای ۳۰۸ درجه کلوین، تخلخل بستر ۰/۴۵ و شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه



شکل ۱۳: نمودار مقایسه مدل با نتایج آزمایشگاهی استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در دماهای مختلف، فشار ۲۰ مگاپاسکال، تخلخل بستر ۰/۴۵ و شدت جریان ۵ گرم بر دقیقه



شکل ۱۴. نمودار مقایسه مدل با نتایج آزمایشگاهی استخراج روغن از دانه روغنی کنجد در شدت جریان های مختلف، در فشار ۲۰ مگاپاسکال، دمای ۳۰۸ درجه کلوین، تخلخل بستر ۰/۴۵

جدول ۳- شرایط انجام آزمایش و پارامترهای مدل دانه و بستر برای دانه کنجد

P (MPa)	T (K)	Q (g/min)	ϵ_b	$D_{eff} \times 10^8$ (m ² /s)	$D_{ax} \times 10^7$ (m ² /s)	$K_f \times 10^5$ (m ² /s)
۱۲	۳۱۳	۴	۰/۴۵	۳/۳	۰/۴۰۲	۰/۷
۱۵	۳۱۳	۴	۰/۴۵	۲/۳	۰/۲۰۲	۰/۵
۱۸	۳۱۳	۴	۰/۴۵	۰/۸۷	۰/۲۵	۰/۱۳
۲۰	۳۱۳	۲	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۲۶	۰/۰۵۴۳
۲۰	۳۱۳	۳	۰/۴۵	۰/۸۶	۰/۲۷	۰/۰۵۴۵

۲۰	۳۱۳	۳	۰/۴۵	۰/۱۰۸	۰/۴۰۵	۰/۰۶۰۵
۲۰	۳۱۳	۴	۰/۴۵	۰/۱۰۸	۰/۲۸	۰/۵۰۵
۲۰	۳۱۳	۴	۰/۴۵	۰/۱۰۸	۰/۳۵۵	۰/۰۸۰۵
۲۰	۳۲۳	۴	۰/۴۵	۴/۴۸	۰/۳۲۵	۰/۵۰۲
۲۰	۳۳۳	۴	۰/۴۵	۰/۰۴۶	۰/۲۵	۰/۷۱۹

جدول ۴- شرایط انجام آزمایش و پارامترهای مدل سلول‌های شکسته و سالم برای دانه کنجد

P(MPa)	T (K)	Q (g/min)	ε_b	$k_s a \times 10^4 (s^{-1})$	$k_f a \times 10^2 (s^{-1})$	$x_k (g/g)$	$y_r \times 10^3 (kg/kg)$
۱۳	۳۰۸	۵	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۴۶۰	۰/۹۱۰	۲/۹۰
۱۷	۳۰۸	۵	۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۴۲۵	۰/۹۰	۴/۶۵
۲۰	۳۰۸	۵	۰/۴۵	۰/۷۲	۰/۴۱۰	۰/۸۹۳	۵/۲۰
۲۰	۳۰۸	۴	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۳۳۶	۰/۹۰	۵/۲۰
۲۰	۳۰۸	۳	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۳۰۶	۰/۹۱	۵/۲۰
۲۰	۳۱۸	۵	۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۴۱۱	۰/۸۹۸	۵/۰۴
۲۰	۳۲۸	۵	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۴۸۰	۰/۹۰۵	۳/۹۱

نتایج

ذره کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که ضریب انتقال جرم فیلمی که نسبت معکوس با ضخامت فیلم دارد افزایش پیدا کند. با توجه به این که حدود ۵۰ درصد کنجد از روغن تشکیل شده است جداسازی ذرات آسیاب شده در اندازه‌های بسیار ریز مشکل می‌باشد در نتیجه در مورد کنجد اثر اندازه ذرات مورد بررسی قرار نگرفت و تخلخل بستر به عنوان یکی دیگری از پارامترهای آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش تخلخل بستر، سیال بیشتر می‌تواند با ذرات در تماس باشد در نتیجه می‌تواند در افزایش درصد استخراج نیز بسیار تأثیر گذار باشد. در شکل (د) می‌توان نتایج اثر تخلخل بستر بر درصد استخراج روغن و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل را نیز مشاهده کرد. با افزایش تخلخل بستر ضریب نفوذ مؤثر ثابت و ضریب انتقال جرم فیلمی و ضریب پراکندگی محوری افزایش پیدا کرد و این می‌تواند به علت وجود سیال بیشتر در بستر باشد.

در استخراج روغن از دانه روغنی کنجد شرایط مندرج در جدول (الف) برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد و مدل‌سازی آن مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مدل نیز در جدول (ج) گزارش شده است. در شکل (الف) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل در فشارهای مختلف نمایش داده شده است. در مورد استخراج روغن از دانه کنجد با افزایش فشار ضریب نفوذ مؤثر کاهش و با افزایش دما افزایش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان برای ضریب انتقال جرم فیلمی نیز مشاهده کرد که با افزایش دما و کاهش فشار افزایش می‌یابد. در مورد ضریب پراکندگی محوری افزایش فشار سبب افزایش ضریب پراکندگی محوری و کاهش دما سبب افزایش آن می‌شود. در شکل (ب) نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی در دماهای مختلف نشان داده شده است. در شکل (ج) نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی مدل در شدت جریان‌های مختلف نشان داده شده است. با افزایش شدت جریان ضریب نفوذ مؤثر ثابت می‌ماند ولی ضریب انتقال جرم فیلمی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش می‌تواند این باشد که ضخامت فیلم در اطراف

منابع

- 1- Passos, C.p., Silva, R.M., Da Silva, F.A., Coimbra, M.A., Silva, C.M., 2009, *Enhancement of the supercritical fluid extraction of grape seed oil by using enzymatically pre-treated seed*, J. of Supercritical Fluids 48, pp. 225_229.
- 2- Perrut, M., Clavier, J.Y., Poletto, M., Reverchon, E., 1997, *Mathematical modeling of sunflower seed extraction by supercritical CO₂*, Ind. Eng. Chem. Res. 36, pp. 430-435.
- 3- Salami, A.R., Fatemi, S., Zakizadeh, H., Safaralie, A., 2008, *Mathematical modeling of supercritical of valerianic acid from valeriana officinalis L.* chem. Eng. Technol., 31, No. 10, pp. 1470-1480.
- 4- Hannay, J.B., Hogarth, J., 1879, *On the Solubility of Solids in Gases*, Proc. Roy. Soc., London, 29:324.
- 5- Salgın, U., 2006, *Extraction of jojoba seed oil using supercritical CO₂+ethanol mixture in green and high-tech separation process*. J. of Supercritical Fluids 39, pp. 330-337.

اثر شرایط آزمایش بر پارامترهای مدل

سلول های شکسته و سالم

مقدار پارامترهای مدل و شرایط انجام آزمایش در جدول (الف) و پارامترهای مدل در جدول (د) گزارش شده است. با افزایش فشار از ۱۲ مگاپاسکال به ۳۰ مگاپاسکال درصد استخراج افزایش پیدا کرده است. در شکل (ه) نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با افزایش فشار، حلالیت افزایش پیدا می کند، افزایش مقدار Y_I نمایانگر این موضوع می باشد. این در حالی است که مقدار Y_I با افزایش دما کاهش پیدا کرده است. افزایش فشار سبب کاهش ضریب انتقال جرم در فاز سیال شده و باعث می شود نفوذ کمتر صورت گیرد. اما افزایش دما سبب افزایش ضریب انتقال جرم در فاز سیال می شود و باعث می شود نفوذ بهتر صورت گیرد. در شکل (و) نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و این نتایج تطابق خوبی با پیش بینی مدل داشته است. با افزایش فشار و کاهش دما مقدار مقاومت انتقال جرم کاهش پیدا می کند و باعث می شود درصد استخراج بیشتر گردد. افزایش شدت جریان نیز با افزایش ضریب انتقال جرم در فاز سیال و جامد سبب افزایش درصد استخراج گردید. شکل (ز) با افزایش شدت جریان و به وجود آمدن مقدار بیشتری از سیال تازه در اطراف دانه سبب می شود تا نیروی محرکه بیشتر شده و استخراج بهتر صورت گیرد.