

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش پاسخ

امید احمدی*

* استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

چکیده

کاهش نمک از آب‌پنیر باعث بهبود کیفیت و طعم نهایی محصولات لبنی می‌شود و به حفظ سلامت مصرف‌کنندگان کمک می‌کند. کاهش نمک همچنین می‌تواند به افزایش قابلیت استفاده مجدد از آب‌پنیر و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک کند. در تحقیق حاضر از رزین‌های کاتیونی برای کاهش غلظت نمک آب‌پنیر استفاده گردید. مقدار ۵۰ میلی‌لیتر آب‌پنیر با ۵۰ گرم رزین طبق طراحی آزمایش با روش پاسخ سطح در بازه دمای حرارت‌دهی با ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس و زمان فرآیند ۶ تا ۲۴ ساعت نمک‌زدایی گردید. پس از بهینه‌سازی، نتایج به‌دست آمده نشان داد دمای ۵۱ درجه سلسیوس و مدت زمان ۱۷ ساعت مناسب‌ترین حالت برای نمک‌زدایی از آب‌پنیر است که در این حالت بیشترین میزان حذف نمک، ۴۲ درصد، به‌دست آمد. نتایج حاصل از آنالیزهای UV-Vis به‌منظور بررسی میزان رنگ و کدورت نشان از کاهش به ترتیب ۳۰ درصد و ۲۶ درصد داشت و DLS برای ارزیابی میانگین اندازه ذرات دارای مقادیر ۱۷۰۰ و ۱۲۰۰ نانومتر قبل و بعد از نمک‌زدایی، شاخص پراکندگی ۰/۹۴۶ و ۰/۶۲۴ و پتانسیل زتا اختلاف معناداری نداشت.

واژه‌های کلیدی: آب‌پنیر، رزین کاتیونی، سطح پاسخ، شرایط عملیاتی

مقدمه

نتیجه بر کاربردهای صنعتی و تغذیه‌ای آن نیز تأثیرگذار باشد (Wai, et al., 2024). آب‌پنیر باید طعمی متعادل و خوشایند داشته‌باشد. با افزایش میزان شوری، طعم آن به‌شدت تغییر می‌کند و می‌تواند به طعمی ناخوشایند تبدیل شود. میزان شوری ایده‌آل برای آب‌پنیر عموماً به عواملی مانند نوع پنیر، مصرف نهایی و کاربرد آن بستگی دارد. شوری آب‌پنیر معمولاً به دلیل وجود نمک‌های تولیدی در مرحله فرآوری و ناشی از کاتیون‌های موجود در آن است (Talebi, et al., 2019). شوری بالاتر از مقدار استاندارد می‌تواند باعث ایجاد لطافت نامطلوب و طعم شور در آب‌پنیر شود و می‌تواند به کاهش کیفیت ارگانولپتیکی آن شامل طعم و بوی نامطلوب ناشی از شوری بینجامد که باعث ناراحتی مصرف‌کنندگان

پنیر یکی از محصولات لبنی پرمصرف در جهان است که از شیر تهیه می‌شود و تنوع و کاربردهای فراوانی دارد. این محصول حاوی پروتئین‌ها، ویتامین‌ها و مواد معدنی است و منبع غنی تغذیه‌ای شناخته می‌شود (Khanal, et al., 2019). یکی از فرآورده‌های جانبی مهم در تولید پنیر، آب‌پنیر (Whey) است که حاصل از فرآیند جداسازی کازئین و چربی از شیر است (Fassina, et al., 2019). آب‌پنیر منبعی غنی از پروتئین‌های با کیفیت، ویتامین‌ها و مواد معدنی به‌حساب می‌آید (Mehla, et al., 2020). اما یکی از چالش‌های مهم در آب‌پنیر، میزان شوری آن است. شوری می‌تواند بر کیفیت ارگانولپتیکی آب‌پنیر تأثیر بگذارد و در

تحقیق حاضر در دو بخش اصلی به اجرا در آمد:
 ۱- استفاده از رزین‌های کاتیونی به منظور کاهش غلظت نمک در آب‌پنیر ۲- بهینه‌سازی شرایط عملیاتی آن.

مواد و روش‌ها

مواد

پنیر به همراه آب نمک آن از یکی از کارخانه‌های لبنیاتی شهرستان سنندج تهیه شد. یکی از اصلی‌ترین معیارهای انتخاب آب‌پنیر موردنظر، در دسترس بودن آن در بین بازار مصرف‌کنندگان بود. آب دیونیزه از شرکت زلال طب شیمی تهیه و برای ماده پایه به منظور ساخت آب نمک با غلظت مشخص استفاده گردید. از آب با سختی مشخص ۱۵۰ ppm برای تغییر عامل سدیمی موجود در رزین به عامل کلسیمی استفاده گردید. نمک سدیم کلرید (NaCl) با خلوص ۹۹ درصد به منظور استفاده به‌عنوان ماده اولیه ساخت آب نمک سنتزی و نمک نیترات نقره ($AgNO_3$) به منظور تیتراسیون شناسایی املاح از شرکت سیگما-آلدریج خریداری گردید. شناساگر پتاسیم کرومات (K_2CrO_4) برای شناسایی یون نقره از شرکت مرک و معرف EDTA و محلول ۰/۱ مولار سدیم سولفید (Na_2S) از شرکت سیگما-آلدریج خریداری شدند. رزین کاتیونی مورد استفاده برای تبادل یونی با نام تجاری پرولایت (C100E) از شرکت طراحان تصفیه تهیه گردید.

روش‌ها

سختی زدایی و اندازه‌گیری سختی آب و تعویض یونی رزین به منظور سختی‌زدایی از آب و تعویض رزین کاتیونی سدیم‌دار به حالت رزین کاتیونی کلسیم‌دار، ۷۵۰ گرم از رزین به ۱ لیتر از آب با سختی مشخص ۱۵۰ ppm اضافه و نمونه آماده‌شده به مدت ۳ روز در آن با ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از عامل‌دار کردن رزین‌های کاتیونی و تبدیل آن از سدیم‌دار به کلسیم‌دار، محلول آب سخت و رزین فیلتر گردیده و رزین‌ها با آب دیونیزه شست‌وشو داده شدند.

شود، شوری باعث کاهش کارایی در فرآوری می‌شود. شوری بالا ممکن است فرآیندهای بعدی مانند تغلیظ و خشک‌کردن را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، کنترل میزان شوری یکی از مراحل کلیدی در تولید آب‌پنیر با کیفیت است (Siriwardana & Budiyanto & Usmiati, 2022; Wijesekara, 2021).

برای کاهش شوری آب‌پنیر می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد که یکی از مؤثرترین روش‌ها استفاده از رزین‌های تبادل یونی است، رزین‌های تبادل یونی موادی هستند که می‌توانند یون‌های مثبت یا منفی موجود در محلول‌ها را با یون‌های خود رد و بدل کنند (Radosavljević, et al., 2022). این روش می‌تواند به‌شکلی مؤثر میزان سدیم، کلر، و دیگر یون‌های معدنی غیرضروری را کاهش دهد (Yuliya Dzyazko, et al., 2020). در این میان استفاده از رزین‌های کاتیونی می‌تواند یون‌های کاتیون (مانند سدیم و کلسیم) را از آب‌پنیر حذف کنند، آن‌ها معمولاً یون‌های هیدروژن را به‌عنوان جایگزین وارد محلول می‌کنند. این نوع رزین‌ها برای کاهش شوری بسیار مؤثر هستند (Yu Dzyazko, et al., 2022). رزین‌های آنیونی قادر به حذف یون‌های آنیونی مانند کلریدها و سولفات‌ها هستند (Chen, et al., 2023). رزین‌های کاتیونی، می‌توانند شوری کلی را به‌طور مؤثری کاهش دهند. در برخی موارد، استفاده از ترکیبی از رزین‌های کاتیونی و رزین‌های آنیونی برای حصول نتیجه بهتر توصیه می‌شود. این نوع رزین‌ها می‌توانند هم‌زمان یون‌های مثبت و منفی را از آب‌پنیر حذف کنند (Hirsch, et al., 2020).

کاهش شوری آب‌پنیر بخشی از فرآیند کنترل کیفیت این محصول است و می‌تواند تأثیری مستقیم بر مصرف آن داشته باشد. استفاده از رزین‌های تبادل یونی، روشی قابل‌اعتماد و مؤثر برای کاهش شوری آب‌پنیر است. این کاربرد نه تنها به بهبود کیفیت ارگانولپتیکی آب‌پنیر کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان روشی پایدار و اقتصادی مورد توجه قرار گیرد (Özer & Evrendilek, 2022).

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش سطح پاسخ

برای اندازه‌گیری و حصول اطمینان از حذف سختی آب، از روش سختی کل (TH^1) استفاده شد، به طوری که محلول بافر بازدارنده سدیم سولفید، محلول ۱ مولار EDTA و آب سخت به ارلن اضافه شد و محلول بازدارنده و معرف رابطه (۱)

$$(V_{EDTA}) * (F_{EDTA}) * (100) * (1000) / V \text{ sample} = \text{Hardness}$$

V Sample: حجم آب نمونه

F EDTA: غلظت EDTA

طراحی آزمایش و آنالیز آماری داده‌ها برای کاهش غلظت نمک آب‌پنیر با تبادل یونی توسط رزین کاتیونی کلسیم‌دار بخش مهم و در واقع اصلی‌ترین بخش پژوهش حاضر، تحلیل تأثیرات کلیدی و اثر متقابل متغیرهای انتخابی به منظور بهینه‌سازی شرایط برای کاهش غلظت نمک موجود در آب‌پنیر است. به همین دلیل، از روش طراحی آماری سطح پاسخ برای این بخش استفاده شده است. این روش به مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری اشاره دارد که به منظور بهبود فرآیندها و تحقیقات به کار می‌رود، جایی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر تعدادی از متغیرها قرار دارد. با بهره‌گیری از این روش، تعداد آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و تمامی ضریب‌های مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل مؤلفه‌ها قابل برآورد خواهند بود. پژوهشگران متعددی (Eshghi, et al., 2021 ; Ahmadi & Jafarizadeh- Malmiri, 2021) نیز از این تکنیک برای بهینه‌سازی مقادیر و کاهش تعداد آزمایش‌ها بهره برده‌اند. در این تحقیق، برای کاهش و حذف غلظت نمک در آب‌پنیر، متغیرهای عملیاتی مختلفی مانند دما و زمان در فرآیند تبادل با رزین می‌توانند تأثیرگذار باشند. بنابراین، طراحی و بهینه‌سازی آزمایش‌ها به منظور تعیین مناسب‌ترین زمان و دمای عملیاتی برای دستیابی به حداقل غلظت نمک آب‌پنیر با شرایط مشخصی طراحی و بهینه‌سازی شدند.

رابطه (۲)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2$$

1 Total Hardness

اندازه‌گیری غلظت محلول آب نمک پس از تماس با رزین رزین‌های مورد استفاده ابتدا رزین‌های کاتیونی حاوی سدیم بودند و پس از تبادل با املاح موجود در آب سخت (املاح کلسیمی) به رزین‌های کلسیمی تبدیل شدند، از این رو در این مرحله با تبادل این رزین‌ها با آب‌پنیر، عوامل سدیمی و کلسیمی با یکدیگر مبادله می‌کنند و در نهایت، غلظت نمک موجود در آب‌پنیر کاهش می‌یابد. برای اندازه‌گیری میزان نمک در نمونه‌ها، از روش تیتراسیون موهر استفاده شد. در این کار، محلول ۰/۱ مولار نیترات نقره تهیه گردید و از هر یک از نمونه‌های تحت حرارت در آون، ۱۰ میلی‌لیتر برداشته شد و ۵ گرم شناساگر پتاسیم کرومات به آن اضافه گردید که باعث ایجاد رنگ زرد در نمونه‌ها شد. تیتراسیون با محلول نیترات نقره تا زمانی ادامه یافت که رنگ محلول نهایی به شیری تغییر کند. سرانجام میزان نمک موجود در ۱۰ میلی‌لیتر با استفاده از موازنه جرمی محاسبه گردید و نتایج به‌دست آمده در بخش بحث و نتایج ارائه شده است (De Winter, et al., 2018).

در رابطه (۲)، ضریب β_0 ضریب ثابت، ضریب‌های β_1 و β_2 اثر خطی (درجه اول)، β_{11} و β_{22} اثر مربعی (درجه دوم) و در انتها β_{12} اثر متقابل یا برهمکنش دما و زمان انتخاب شده هستند. به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از روش آنالیز واریانس^۱ (ANOVA) و از روش آماری t-test به منظور مقایسه داده‌ها استفاده گردید. در این مدل، $P < 0/05$ به‌عنوان مقادیر آماری معنی‌دار در نظر گرفته می‌شود و جملاتی که دارای $P > 0/05$ باشند به‌عنوان نتایج بی‌معنی و غیر اثرگذار تلقی شدند. مقدار $P < 0/05$ بدین معناست که مدل ارائه شده و استخراج شده با احتمال ۹۵ درصد پذیرفته می‌شود. مقدار R^2 نیز معیار خوبی برای ارزیابی مناسب بودن مدل است که هرچه مقدار این عدد به یک نزدیک‌تر باشد دلالت بر دقیق بودن مدل در پیش‌بینی رفتار متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته دارد. نتایج حاصل از هر یک از آزمایش‌ها، تحلیل و اثر پارامترها و متغیرهای انتخاب شده بر آب‌پنیر نمک‌زدایی شده در بخش بحث و نتایج گزارش شده است.

$$\text{رابطه ۳} \quad V: \text{میزان حجم تیترا شده} = \frac{58.5 \text{ gr NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} * \frac{1 \text{ mol NaCl}}{1 \text{ mol AgNO}_3} * V(\text{AgNO}_3) * 0/1 \text{ مولار } \text{AgNO}_3 = \text{میزان نمک موجود (گرم نمک)}$$

بحث و نتایج

در پژوهش حاضر، هدف اصلی بهینه‌سازی شرایط عملیاتی از جمله انتخاب دما و زمان مناسب برای نمک‌زدایی از آب‌پنیر است. در بخش‌های زیر نتایج حاصل از طراحی آزمایش، پاسخ‌های مربوط به هر کدام از آزمایش‌های انجام گرفته، تأثیرگذاری متغیرهای انتخاب شده گزارش شده است. پس از بهینه‌سازی و به‌دست آوردن نقطه مناسب با استفاده از فرآیند حرارتی توسط آون، شدت رنگ، کدورت و میانگین اندازه ذرات ارزیابی شده است.

آنالیزها

شدت جذب اولیه آب‌پنیر و نمونه بهینه به‌دست آمده از فرآیند حذف نمک با روش طیف‌سنجی نور مرئی-فرا بنفش UV-Vis^۲ با دستگاه Jenway مدل ۶۷۰۵ در طول موج ۴۲۰ و ۶۲۵ نانومتر به ترتیب برای بررسی میزان رنگ و کدورت ارزیابی گردید. به منظور تعیین میانگین اندازه ذرات، از تجزیه پراکندگی نور پویایی DLS^۳ استفاده شد که روشی غیرمخرب و فیزیکی است. برای این اندازه‌گیری، دستگاه Malvern ساخت انگلستان به کار گرفته شد.

³ Dynamic Light Scattering

¹ Analysis of Variance

² Ultraviolet-visible

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش سطح پاسخ

مدل سطح پاسخ

طراحی آزمایش سطح پاسخ بر اساس طرح مرکب مرکزی انتخاب و دو متغیر مستقل در نظر گرفته شد که شامل زمان و دمای آزمایش است. ۱۳ آزمایش به همراه نتایج آن به صورت عملی و نتایج به دست آمده حاصل از مدل در

جدول ۱- طراحی آزمایش و نتایج مربوط به هر یک از متغیرهای مستقل به همراه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل
Table 1- Experimental design and results for each of the independent variables along with the results predicted by the model

متغیر وابسته		متغیرهای مستقل		
Dependent variable		Independent variables		
درصد حذف نمک		دما (°C)	زمان (ساعت)	
Salt Removal (%)		Temperature (°C)	Time (hr)	
نتایج مدل	نتایج آزمایشگاهی			
Model	Laboratory			
41.15	41.16	50	15	1
41.15	41.23	50	15	2
41.15	41.09	50	15	3
29.71	31.44	40	15	4
34.55	33.27	43	21	5
41.15	40.98	50	15	6
23.21	23.48	50	6	7
34.47	35.72	50	24	8
28.89	29.67	57	9	9
35.29	36.09	57	21	10
41.15	41.29	50	15	11
33.95	32.74	60	15	12
23.61	22.31	43	9	13

برای اعتبارسنجی متغیرهای عملیاتی (دما و زمان) در نظر گرفته شده در طراحی آزمایش از اصطلاح p-value استفاده خواهد شد، در تحقیق حاضر این مقدار ۰/۰۵ در نظر گرفته شد که نتایج گزارش شده در جدول ۲ نشان می‌دهد برای متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده اثر درجه اول برای متغیر وابسته (پاسخ) درصد حذف نمک معنی‌دار بوده است و برای زمان و دما به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰ و ۰/۰۰۸ است که نشان می‌دهد، متغیرهای در نظر گرفته شده به درستی انتخاب شده‌اند، اثرهای درجه دوم نیز معنی‌دار است و مقدار p-value در آن برای هر دو متغیر مستقل ۰/۰۰۰ به دست آمده است. اثرهای متقابل دو متغیر مستقل در نظر گرفته شده بر متغیر مستقل معنی‌دار نیست و برابر با ۰/۰۸۹ است. اثر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته در نمودارهای مختلف دوعبده و سه‌بعدی سطح پاسخ به طور کامل توضیح داده شده که در ادامه تحقیق حاضر گزارش شده است. یکی از هدف‌های کلی در بهینه‌سازی، به دست آوردن رابطه کلی به منظور ارتباط پاسخ در نظر گرفته شده (متغیر وابسته) با متغیر مستقل (دما و زمان فرآیند حذف نمک) است که تحت ثابت‌های معادله کلی درجه دوم به دست خواهد آمد و نتایج آن در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۲- مقادیر p-value مربوط به آب‌پنیر نمک‌زدایی شده (اثرهای خطی، درجه دوم و برهم‌کنش)
 Table 2- p-values for desalted whey (linear, quadratic, and interaction effects)

حذف نمک Salt Removal Y p-value	متغیرهای مستقل Independent variables	اثرات Effects
0.000	زمان Time (X ₁)	اثرات درجه اول (خطی) First-order (linear) effects
0.008	دما (X ₂) Temperature	
0.000	X ₁ ²	اثرات درجه دوم Second-order effects
0.000	X ₂ ²	
0.089	X ₁ X ₂	اثرات برهم‌کنش Interaction effects

پس از به‌دست آمدن ضریب‌ها β (ضریب‌های ثابت، درجه اول، دوم و اثرهای متقابل) و قرار دادن آن‌ها در رابطه (۲)، به‌راحتی می‌توان ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را ایجاد کرد و از طریق معادلات به‌دست آمده به پیش‌بینی خروجی و اعداد مربوط به متغیر وابسته دست‌یافت. اما اطمینان از نتایج به‌دست آمده وابسته به عبارت R^2 است که هر چه این عبارت نزدیک به ۱ و یا به بیانی دیگر نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد، نتیجه حاصل‌شده اطمینان بیشتری خواهد داشت. عبارت مربوط به R^2 نیز در جدول ۳ گزارش شده است که برای مدل به‌دست آمده این عبارت عدد مناسبی است و ۹۸/۲۶ درصد به‌دست آمده است که نشان می‌دهد مدل‌های به‌دست آمده پیش‌بینی نسبتاً دقیقی از خروجی خواهند داشت.

تأثیر پارامترهای موثر

پس از به‌دست آمدن نقاط و بازه‌های تأثیرگذار و یافتن ضریب تأثیر هر کدام به‌صورت جداگانه، نمودارهای خروجی مختلف شامل متغیرهای تعیین‌شده در طراحی آزمایش به‌صورت جداگانه رسم شد و در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

اثر دما و زمان بر حذف نمک از آب‌پنیر با در نظر گرفتن دو متغیر مستقل عملیاتی شامل دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی، هر یک از متغیرهای در نظر گرفته‌شده اثرگذاری‌های مختلفی بر میزان حذف نمک از آب‌پنیر توسط رزین کاتیونی دارد که در بخش حاضر اثر دو متغیر در نظر گرفته‌شده به‌صورت هم‌زمان بر متغیر وابسته (حذف نمک) گزارش شده است، نتایج آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

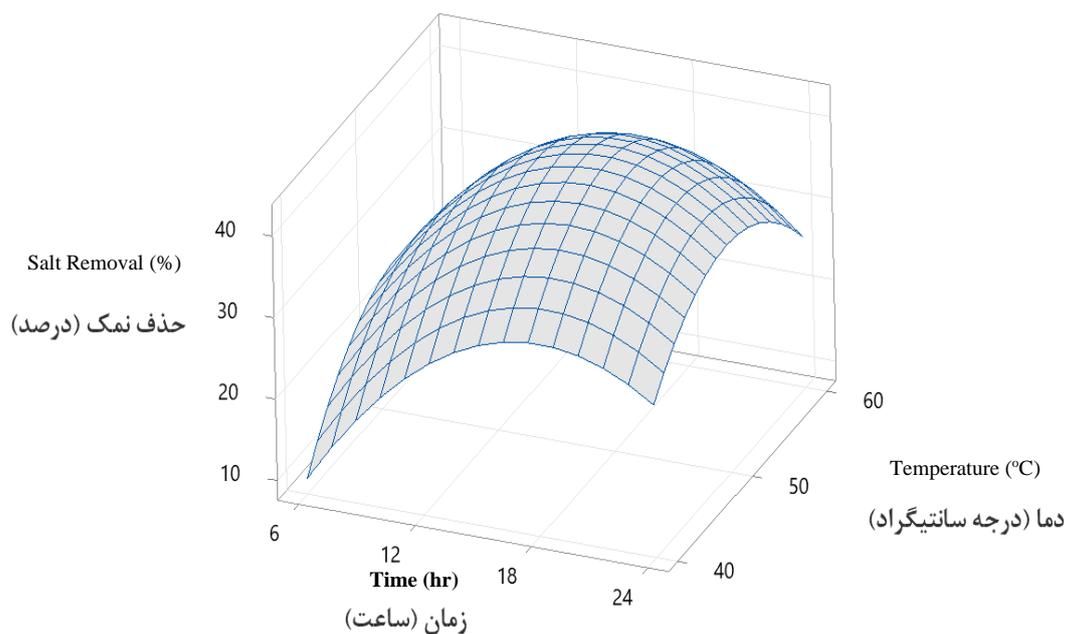
با توجه به نتایج نشان داده‌شده در شکل ۱، در مقادیر ثابت و پایین دمای آزمایش، درصد حذف نمک با افزایش زمان در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد در مقادیر ثابت و بالای دمای آزمایش نیز این روند مشاهده شد و به‌نحوی که در محدوده‌ای با افزایش زمان، درصد حذف نمک افزایش و پس از آن کاهش خواهد یافت. با توجه به روند یکسان به-دست آمده از نتایج شکل ۱ در مقادیر بالا و پایین، برهم‌کنشی بین متغیرهای وابسته مشاهده نشد که در جدول ۲ نیز مشاهده گردید مقدار متغیر p-value به‌دست آمده معادل ۰/۰۸۹ است. به نظر می‌رسد در زمان‌های اولیه فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر، یون‌های موجود در محیط مایع فرصت کافی و کاملی برای ایجاد ارتباط با رزین کاتیونی ندارند و منجر به حذف مقدار کمتری از آب نمک گردیده است.

بهبودسازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش سطح پاسخ

جدول ۳- ضریب‌های چندجمله‌ای درجه دوم همراه با ضریب‌های برازشی برای هر متغیر وابسته در نمک‌زدایی آب‌پنیر

Table 3 - Quadratic polynomial coefficients along with fitting coefficients for each dependent variable in whey desalination

حذف نمک Salt Removal Y	ضرایب Coefficients
-264.3	ثابت Constant (β_0)
6.315	درجه اول First-order (β_1 و β_2)
9.906	درجه دوم Second-order (β_{11} و β_{22})
-0.1457	برهمکنش Interaction effects (β_{12})
-0.0931	ضریب تعیین R-square
-0.0252	
98.26%	



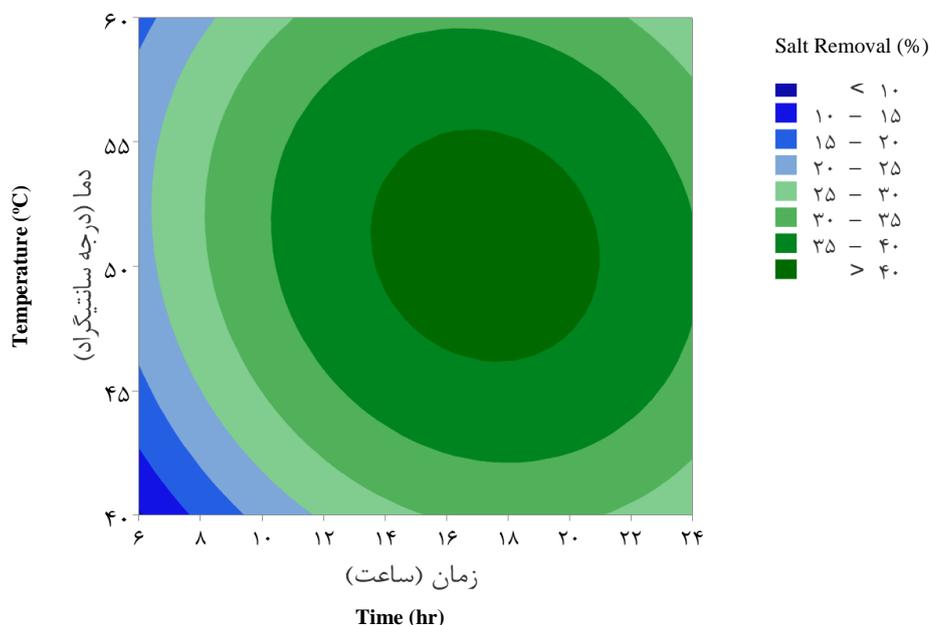
شکل ۱- نمودار سه‌بعدی سطح پاسخی برای تغییرات میزان حذف نمک از آب‌پنیر با زمان و دمای آزمایش توسط آن

Figure 1 - Three-dimensional response surface diagram for changes in the rate of salt removal from whey with oven heating time and temperature

به همین دلیل مقادیر حذف‌شده نمک از آب‌پنیر در بازه‌های اولیه زمان فرآیند نمک‌زدایی پایین است. در زمان‌های بالای فرآیند نمک‌زدایی به دلیل تبادل طولانی‌مدت بین رزین و آب‌پنیر، احتمال اینکه پدیده حذف نمک در جهت عکس فرآیند عمل کند و فرآیند تبادل در جهت غیر مطلوب پیش رود وجود دارد. با بررسی اثر دما، در مقادیر ثابت و پایین زمان با افزایش این دمای فرآیند، تغییرات کم و پایینی در حذف

نمک مشاهده شد، در مقادیر ثابت و بالای زمان فرآیند حذف نمک نیز روند مشابه است اما در مقادیر زمانی بالا و ثابت تغییرات حذف نمک با افزایش دما بیشتر است. به نظر می‌رسد اثرگذاری دما در حذف نمک نسبت به زمان فرآیند کمتر است و همان‌طور که در جدول ۲ هم مشاهده شد مقدار متغیر p-value برای متغیر مستقل زمان ۰/۰۰۰ و برای دما ۰/۰۰۸ است. اما با توجه به مقادیر میانه و متوسط دما و مقایسه آن با دماهای بالاتر و پایین‌تر، می‌توان نتیجه گرفت که عامل دما متغیر مناسبی در حذف میزان نمک از آب پنیر

است و رزین‌های مورد استفاده در محدوده‌ای مناسب از دما به بهترین نحو عمل می‌کنند و تبادل مناسبی بین املاح موجود در آب پنیر خواهد شد. در محدوده دمای بهینه، تبادل بین رزین کاتیونی کلسیم‌دار و آب پنیر حاوی املاح سدیمی دیده می‌شود و غلظت نمک آب پنیر کاهش پیدا خواهد کرد. اما در دماهای بالا با توجه به فعالیت بالای الکترولیت نمونه، تبادل کاهش پیدا می‌کند و درصد حذف نمک کاهش می‌یابد.



شکل ۲- نمودار دوبعدی سطح پاسخ برای تغییرات میزان حذف نمک از آب پنیر با زمان و دمای آزمایش توسط اون
 Figure 2 - Two-dimensional response surface diagram for changes in the rate of salt removal from whey with oven heating time and temperature

در شکل ۲ که مربوط است به نمودار دوبعدی اثر متغیرهای مستقل دما و زمان بر فرآیند نمک‌زدایی، بیشینه و کمینه درصد حذف نمک قابل مشاهده است. در این شکل، نقاط بیشینه با میزان حذف بیشتر از ۴۰ درصد با رنگ سبز پررنگ (محدوده تقریبی زمان ۱۴ تا ۲۱ ساعت و ۴۶ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد) نشان داده شده است، مقادیر گزارش شده مربوط به زمان و دماهای متوسط یا میانه اعمال شده است. کمترین درصد حذف نمک با مقادیر کمتر از ۱۰ درصد مربوط به رئوس حدى و کمترین زمان فرآیند نمک‌زدایی است، به‌طوری‌که مرتبط با دماهای بالا و پایین (۴۰ ساعت و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان ۶ ساعت است. به نظر می‌رسد در مقادیر پایین زمان فرآیند، فرصت کافی برای تبادل بین یونها وجود نداشته است و در دمای آزمایش پایین، فعالیت یونها پایین است و فرصت تبادل به‌طور کامل

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نم‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش سطح پاسخ

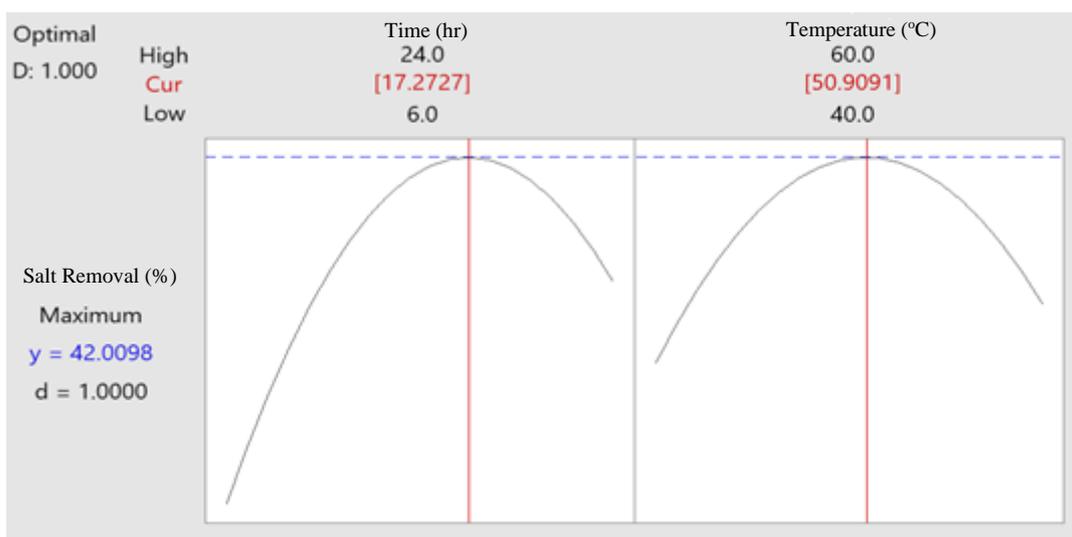
را به دست آورد که در آن نقطه درصد حذف نمک از آب‌پنیر دارای بیشترین مقدار باشد.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نقطه بهینه به دست آمده از طراحی آزمایش مذکور مربوط به زمان فرآیند حذف نمک ۱۷/۲۷ ساعت و دمای آزمایش با آن تقریباً ۵۱ درجه سانتی‌گراد است که اگر در این حالت فرآیند نم‌زدایی با رزین کاتیونی کلسیم‌دار پیش رود منجر به حذف ۴۲ درصد نمک از آب‌پنیر خواهد شد، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با طراحی آزمایش باید راستی آزمایی و صحت سنجی شوند تا مدل به دست آمده و نتایج مربوط به آن با داده‌های آزمایشگاهی قابل‌مقایسه باشد. در بخش بعد این موارد به تفصیل گزارش شده است.

وجود ندارد، در مقادیر بالای دمای آزمایش نیز با توجه به فعالیت بیش از حد یون‌های موجود در محیط آب‌پنیر، برخوردها کاهش یافته و منجر به حذف کمتری از نمک شده است.

بهینه‌سازی پارامترهای انتخاب شده برای فرآیند حذف نمک از آب‌پنیر

پس از طراحی آزمایش، بررسی آماری و تحلیل‌های اثر متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده شامل دمای آزمایش توسط آن و زمان فرآیند بر متغیر وابسته درصد حذف نمک، بهینه‌سازی عددی اجرا گردید که نتایج آن در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. در بهینه‌سازی حاضر می‌توان نقطه خاصی



شکل ۳- مقادیر بهینه (بهینه‌سازی عددی) شرایط عملیاتی حذف نمک از آب‌پنیر

Figure 3 - Optimal values (numerical optimization) of operating conditions for salt removal from whey

بهینه‌سازی و آزمایشگاهی نتایج نشان داد تفاوت معناداری میان این دو گروه نیست و درصد حذف نمک به میزان ۴۱/۸۵ درصد به دست آمد. بدین ترتیب، مدل‌های به دست آمده تأیید شدند و به درستی توانستند تأثیر متغیرهای مستقل دما و زمان فرآیند را بر متغیر وابسته در محدوده مورد نظر شناسایی کنند. در بخش‌های بعدی، نتایج تحلیل‌ها در نقطه بهینه به تفصیل بررسی می‌شوند.

بررسی خواص آب‌پنیر نم‌زدایی شده در شرایط بهینه

با شناسایی نقاط بهینه به دست آمده، صحت سنجی نتایج حاصل شده بررسی شد. در بخش حاضر، فرآیند نم‌زدایی از آب‌پنیر و مقادیر مربوط به متغیر وابسته (درصد حذف نمک) تحلیل و ارزیابی گردید. با مقایسه داده‌های حذف نمک مربوط به بخش پیش‌بینی شده از طریق

آنالیز طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش UV-Vis برای ارزیابی رنگ و کدورت

برای بررسی و ارزیابی میزان کدورت و رنگ آب‌پنیر در دو حالت قبل از فرآیند نمک‌زدایی با رزین کاتیونی و پس از فرآیند نمک‌زدایی از دستگاه طیف‌سنجی نور مرئی-فرابنفش UV-Vis در طول موج‌های ۴۲۰ و ۶۲۵ نانومتر استفاده شد و نتایج نشان داد که آب‌پنیر پیش از فرآیند نمک‌زدایی دارای شدت رنگ ۲/۸۴ و پس از فرآیند ۲/۱۷ واحد جذب بوده است و رزین‌های مورد استفاده توانایی کاهش میزان رنگ به میزان تقریباً ۳۰ درصد را داشته‌اند، با ارزیابی میزان کدورت نمونه، نتایج نشان داد که آب‌پنیر پیش از فرآیند دارای میزان جذب ۱/۹۶ و پس از فرآیند ۱/۴۵ واحد جذب بوده است که با کاهش ۲۶ درصد در میزان کدورت توانایی مناسبی در کاهش کدورت را داراست. دو نمونه قبل و بعد از فرآیند نمک‌زدایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

آنالیز پراکندگی نور دینامیکی DLS جهت بررسی میانگین اندازه ذره و پتانسیل زتا

در این بخش به بررسی میزان جذب نور عبوری از نمونه بهینه آب‌پنیر نمک‌زدایی شده پرداخته شد و نتایج آن با آنچه از نمونه اولیه آب‌پنیر (پیش از فرآیند نمک‌زدایی) به دست آمده بود مقایسه گردید. بالاتر بودن سطح املاح در آب‌پنیر اولیه به افزایش میانگین اندازه ذرات منجر شده است. نتایج حاصل در شکل‌های ۵ الف و ب ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ الف قابل مشاهده است، میانگین اندازه ذرات آب‌پنیر پیش از فرآیند نمک‌زدایی تقریباً ۱۷۰۰ نانومتر بوده که پس از حذف درصد مشخصی

از آن (تقریباً ۴۲ درصد) با استفاده از رزین‌های کاتیونی، میانگین اندازه ذرات با کاهش تقریباً ۴۰۰ نانومتر به مقدار میانگین ۱۳۰۰ نانومتر رسیده است. به نظر می‌رسد با کاهش میزان غلظت نمک در آب‌پنیر، میانگین اندازه ذرات کاهش یافته و کاربردهای مطلوب‌تری پیدا کرده است که منجر به خواص ارگانولپتیکی مناسب‌تری نیز خواهد شد. هم‌زمان با آنالیز پراکندگی نور دینامیکی، پارامتر مهم شاخص پراکندگی (PDI) نیز ارزیابی شد که نتایج این ارزیابی نشان داد آب‌پنیر پیش از فرآیند نمک‌زدایی دارای شاخص پراکندگی ۰/۹۴۶ بوده و بعد از فرآیند این شاخص ۰/۶۲۴ به دست آمده است. لازم است گفته شود شاخص پراکندگی عددی بدون بعد و در بازه صفر تا یک ۱ متغیر است و این متغیر هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، توزیع مناسب ذرات و یکنواختی آن‌ها را نشان می‌دهد و بالعکس هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، غیریکنواختی و غیریکسان بودن ذرات (حمود الشاهرانی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲، هاشمیلر^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

در تحقیق حاضر با استفاده از آنالیز DLS به‌طور جداگانه به بررسی پتانسیل زتا (بار سطحی ذرات) نیز پرداخته شد. نتایج بررسی بار سطحی آب‌پنیر پیش و پس از فرآیند نمک‌زدایی اختلاف معنادار را نشان نمی‌دهد و به ترتیب دارای مقادیر ۷/۶۵ و ۷/۴۲ میلی ولت به دست آمده است. با توجه به فرآیند تبادل یونی توسط رزین کاتیونی و کاهش یون‌های سدیم و افزایش یون‌های کلسیم در آب‌پنیر، نتایج به دست آمده قابل قبول به نظر می‌رسد که در نهایت منجر به تقریباً ثابت ماندن پتانسیل زتا گردیده است.

² Hashemilar

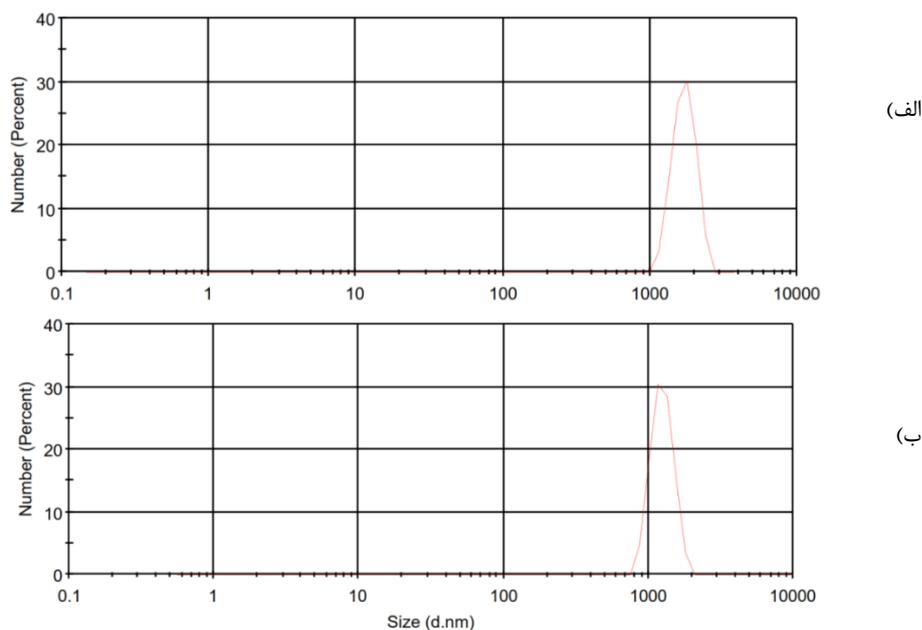
¹ Hamoud Alshahrani

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دما و زمان فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر با استفاده از رزین‌های کاتیونی به روش سطح پاسخ



شکل ۴- شکل ظاهری نمونه الف) پیش از فرآیند نمک‌زدایی و ب) پس از فرآیند نمک‌زدایی

Figure 4 - Appearance of the sample a) before the desalination process and b) after the desalination process



شکل ۵- پراکندگی نور دینامیکی DLS، الف) پیش از فرآیند حذف نمک و ب) پس از فرآیند حذف نمک

Figure 5- Dynamic light scattering DLS, a) before the salt removal process and b) after the salt removal process

آن بود. نتیجه‌گیری کلی از تحقیق حاضر به این نکات اشاره دارد که رزین کاتیونی مبتنی بر سدیم توانایی خوبی در کاهش سختی آب دارد. همچنین، روش سطح پاسخ به‌عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش و آنالیز آماری، به‌طور

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر فعالیت‌ها شامل تبدیل رزین کاتیونی سدیم دار به کلسیم‌دار، طراحی آزمایش و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر و بررسی خواص نهایی

مؤثری در کاهش تعداد آزمایش‌ها و شناسایی نقاط بهینه یافته است. ویژگی‌های ایجادشده منجر به خواص عملیاتی در فرآیند نمک‌زدایی از آب‌پنیر عمل می‌کند. رزین ارگانولپتیکی بهتر و مناسب‌تری برای مصرف‌کنندگان خواهد کاتیونی عامل‌دار شده کلسیمی توانایی مناسبی در حذف نمک از آب‌پنیر را از خود نشان داد که با توجه به آنالیزها، میانگین اندازه ذرات آن کمتر شده و رنگ و کدورت کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران دیگر با بررسی روش‌های مختلف حرارت‌دهی یا تسریع واکنش، تحقیق حاضر را تکرار و نتایج به‌دست‌آمده را مقایسه کنند.

مراجع

- Ahmadi, O., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Intensification and optimization of the process for thyme oil in water nanoemulsions preparation using subcritical water and xanthan gum. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 235(5), 629-648 .
- Budyanto, A & .,Usmiati, S. (2022). *The Effect of Carbon Sources and Whey Storage on Physicochemical and Organoleptic Properties of Nata de Whey*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Chen, G. Q., Qu, Y., Gras, S. L., & Kentish ,S. E. (2023). Separation technologies for whey protein fractionation. *Food Engineering Reviews*, 15(3), 438-465 .
- De Winter, W., Van Dam, D., Delbecque, N., Verdoodt, A., Ruessink, B., & Sterk, G. (2018). Measuring high spatiotemporal variability in saltation intensity using a low-cost Saltation Detection System: Wind tunnel and field experiments. *Aeolian Research*, 31, 72-81 .
- Dzyazko, Y., Borysenko, Y., Zmievskii, Y., Zakharov, V., Myronchuk, V., & Kolomiets, E. (2022). Organic-inorganic ion exchange materials for electromembrane processing of liquid wastes produced dairy industry. *Materials Today: Proceedings*, 50, 496-501 .
- Dzyazko, Y., Zakharov, V., Kolomiets, Y., & Kudelko, K. (2020). Composite ion-exchanges for the recycling of liquid waste of dairy industry. *Ukrainian Chemistry Journal*, 86(5), 38-52 .
- Eshghi, M., Kamali-Shojaei, A., Vaghari, H., Najian, Y., Mohebian, Z., Ahmadi, O., & Jafarizadeh-Malmiri, H. J. G. P. (2021). Corylus avellana leaf extract-mediated green synthesis of antifungal silver nanoparticles using microwave irradiation and assessment of their properties. *Green Processing Synthesis*, 10(1), 606-613 .
- Fassina, P., Nunes, G. Q., Adami, F. S., Goettert, M. I., & Volken de Souza, C. F. (2019). Importance of cheese whey processing: supplements for sports activities-a review. *Polish Journal of food nutrition sciences*, 69(1) .(
- Guo, B., Zhang, L., Cao, L., Zhang, T., Jiang, F., & Yan, L. (2018). The correction of temperature-dependent Vickers hardness of cemented carbide base on the developed high-temperature hardness tester. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 426-433 .
- Hamoud Alshahrani, S., Alameri, A. A., Zabibah, R. S., Turki Jalil, A., Ahmadi, O., & Behbudi, G. (2022). Screening method synthesis of AgNPs using *Petroselinum crispum* (parsley) leaf: Spectral analysis of the particles and antibacterial study. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 66(4), 480-487 .
- Hashemilar, H., Jafarizadeh-Malmiri, H., Ahmadi, O., & Jodeiri, N. J. I. J. o. B. M. (2023). Enzymatically preparation of starch nanoparticles using freeze drying technique—gelatinization, optimization and characterization. 237, 124137 .

- Hirsch, D. B., Álvarez, L. M. M., Urtasun, N., Baieli, M. F., Lázaro-Martínez, J. M., Glisoni, R. J., . . . Wolman, F. (2020). (Lactoferrin purification and whey protein isolate recovery from cheese whey using chitosan mini-spheres. *International Dairy Journal*, 109, 104764 .
- Khanal, B. K. S., Pradhan, M., & Bansal, N. (2019). Cheese: Importance and introduction to basic technologies. *Journal of Food Science Technology Nepal*, 11, 14-24 .
- Mehla, R., Kumari, A., Dhankhar, J., Bumbadiya, M., & Tyagi, A. (2020). Whey: Importance and Techno-functional Applications. *Dairy Processing: Advanced Research to Applications*, 161-179 .
- Özer ,B., & Evrendilek, G. A. (2022). Whey beverages. In *Dairy Foods* (pp. 117-137): Elsevier.
- Radosavljević, J., Stanić-Vučinić, D., Stojadinović, M., Radomirović, M., Simović, A., Radibratović, M., & Veličković, T. Č. (2022). Application of ion exchange and adsorption techniques for separation of whey proteins from bovine milk. *Current Analytical Chemistry*, 18(3), 341-359 .
- Siriwardana, J., & Wijesekara, I. (2021). Analysis of the effectiveness of an antimicrobial edible coating prepared from sweet whey base to improve the physicochemical, microbiological, and sensory attributes of swiss cheese. *Advances in Agriculture*, 2021(1), 5096574 .
- Suleimanov, B. A., Latifov, Y. A., Veliyev, E. F., & Frampton, H. (2018). Comparative analysis of the EOR mechanisms by using low salinity and low hardness alkaline water. *Journal of Petroleum Science Engineering*, 162, 35-43 .
- Talebi, S., Kee, E., Chen, G. Q., Bathurst, K., & Kentish, S. E. (2019). Utilisation of salty whey ultrafiltration permeate with electrodialysis. *International Dairy Journal*, 99, 104549 .
- Wai, K., Zhong, N., Feng, Y., & Xu, Y. (2024). Salt Reduction: Product Challenges, Approaches, and Application of Flavors. In *Flavor-Associated Applications in Health and Wellness Food Products* (pp. 197-224): Springer.



Original Research

Optimizing the Operating Conditions of Temperature and Time of Whey Desalination Process Using Cationic Resins by Response Surface Method

O. Ahmadi*

* **Corresponding Author:** Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Technology, Sanandaj, Iran

Email: o.ahmadi@uok.ac.ir

Received: 19 August 2024 **Accepted:** 20 October 2024

http://doi: 10.22092/FOODER.2025.366792.1401

Abstract

Reducing salt from whey is very important because it improves the quality and final taste of dairy products while also helping to maintain the health of consumers. Reducing the salt can enhance the reusability of whey and minimize environmental pollution. In the current research, cationic resins were used to decrease the salt concentration in whey. An amount of 50 mL of whey was treated with 50 g of resin according to the experimental design using the response surface methodology, within a heating temperature range of 40 to 60 °C over various process times. The desalination process was conducted for 6 to 24 hours. After optimization, the results indicated that a temperature of 51 °C and duration of 17 hours were the most suitable conditions for whey desalination, with the highest percentage of salt removal achieved at 42%. The results of UV-Vis analysis showed a decrease in color and turbidity of 30% and 26%, respectively. Additionally, DLS measurements for average particle size yielded values of 1700 nm and 1200 nm before and after desalination. The dispersion indices were 0.946 and 0.624, respectively, and no significant difference in zeta potential was observed.

Keywords: Whey, Cationic resin, Response surface, Operating conditions

