

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2022.315240.1151



DOR: 20.1001.1.17355400.1402.22.126.5.4



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Experimental Study of the Effect of Sodium Sulfite, Disodium Tartrate Dihydrate and Sodium Dihydrogen Phosphate on the Separation of Lactic Acid by Aqueous Two-Phase Systems

Sh. Abrchi<sup>1</sup>, H. Masoumi<sup>2</sup>, H. Ghanad Zadeh Gilani<sup>3\*</sup>

1- M. Sc. of Chemical Engineering, University of Guilan

2- Ph. D. of Chemical Engineering, University of Guilan

3- Professor of Chemical Engineering, University of Guilan

Email: hggilani@gmail.com

### Abstract

*The aim of this study was to investigate the distribution of lactic acid in polymer-salt aqueous two phase systems. Accordingly, four temperatures of 25, 30, 35 and 40°C were considered and at each temperature, three different salts including sodium sulfite, disodium tartrate dihydrate and sodium dihydrogen phosphate and two different molecular masses of polyethylene glycol 30% by weight (4000 and 8000 g/mol) was tested in aqueous two-phase system. Also, the percentage of acid extraction at pH 5 to 9 and the effect of polymer concentration were investigated. The effect of polymer molecular mass, polymer concentration, salt type, salt concentration and temperature change on the extraction percentage was evaluated. It was observed that in all three systems, with increasing the molecular weight of the polymer, temperature, salt concentration, polymer concentration and pH, the extraction efficiency decreases. The optimum values of polymer molecular weight, temperature, salt concentration and pH were determined as 4000 g/mol, 25 °C, 25% by weight of sodium sulfite, disodium tartrate dihydrate and sodium dihydrogen phosphate and 5.5 to 6.5, respectively. In addition, the optimal polymer concentration was determined to be 30% by weight. Finally, the extraction values for sodium sulfite, disodium tartrate dihydrate and sodium dihydrogen phosphate were calculated to be 53.205, 50.149 and 19.549%, respectively.*

Received: 19 November 2021

Accepted: 8 January 2022

Page Number: 7-19

### Keywords:

Lactic Acid,  
PEG 4000 & 8000 g/mol,  
Aqueous Two Phase  
System,  
Sodium Salts

### Please Cite this Article Using:

Abrchi, Sh., Masoumi, H., Ghanad Zadeh Gilani, H., "Experimental Study of the Effect of Sodium Sulfite, Disodium Tartrate Dihydrate and Sodium Dihydrogen Phosphate on the Separation of Lactic Acid by Aqueous Two-Phase Systems", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 22, No. 126, pp. 7-19, In Persian, (2023).



# بررسی تجربی تأثیر سدیم سولفیت، دی‌سولفید تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات در جداسازی اسید لاکتیک به روش سامانه‌های دوفازی آبی

شقایق ابرچی<sup>۱</sup>، حدیثه معصومی<sup>۲</sup>، حسین قنادزاده گیلانی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان

۲- دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان

۳- استاد تمام مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان

پیام نگار: hggilani@gmail.com

## چکیده

از اهداف پژوهش حاضر، محاسبه ضریب توزیع اسید لاکتیک در سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- نمک‌های فسفات است؛ بنابراین، درجه حرارت‌های ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سلسیوس تعیین و در هر یک از درجه حرارت، انواع نمک‌های فسفات مانند سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات و نیز جرم مولکولی متفاوت پلی‌اتیلن گلیکول با غلظت وزنی ۳۰ درصد (۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ گرم بر مول) ارزیابی شد. به علاوه، بازدهی استخراج اسید در اسیدیت‌های گوناگون در بازه ۵ تا ۹ آزمایش شد. تأثیر جرم مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول، نوع نمک، غلظت نمک و تغییر دما بر روی بازدهی استخراج بررسی شد. با توجه به نتایج، با بالا رفتن جرم مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول، درجه حرارت، غلظت نمک و pH مقادیر بازدهی استخراج نزول پیدا می‌کند. اعداد مطلوب جرم مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول، درجه حرارت، مقدار نمک و اسیدیته به ترتیب ۴۰۰۰ گرم بر مول، ۲۵ درجه سلسیوس، ۲۵ درصد وزنی سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات و ۵/۵ تا ۶/۵ تعیین شد. در نهایت، بازدهی استخراج سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات به ترتیب ۵۳/۲۰۵، ۵۰/۱۴۹ و ۱۹/۵۴۹ درصد حساب شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

شماره صفحات: ۷ تا ۱۹

## کلیدواژه‌ها:

اسید لاکتیک،

پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی

۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ گرم بر مول،

سامانه دوفازی آبی،

نمک‌های سدیم

\* رشت، دانشگاه گیلان، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

ابرچی، ش.، معصومی، ح.، قنادزاده گیلانی، ح. "بررسی تجربی تأثیر سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات در جداسازی اسید لاکتیک به روش سامانه‌های دوفازی آبی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ودوم، شماره ۱۲۶، صص. ۷-۱۹، (۱۴۰۲).

## ۱. مقدمه

اسید لاکتیک با نام شیمیایی ۲- هیدروکسی پروپیونیک اسید، دارای جرم مولکولی اندک است. این اسید از خانواده مواد آلی، بدون رنگ و نسبتاً دارای رایحه ناچیز است. اسید لاکتیک در آب و الکل قابل حل و شامل دو عامل هیدروکسیل و کربوکسیل است. این اسید آلی با نام معروف اسید شیر در کارخانه‌های غذایی، داروسازی و بسیار به کار می‌رود؛ در آن صورت، تهیه اسید لاکتیک دارای خلوص مناسب، از نظر هزینه قابل توجه است. حجم زیادی از اسید لاکتیک از راه فرایند تخمیر به دست می‌آید؛ ولی تولید آن در غلظت‌های بالا شرایط را برای فعالیت میکروب‌ها در فرایند تخمیر مختل می‌کند [۱]. به همین منظور، در بین فناوری‌های گوناگون برای استخراج اسید لاکتیک، به کارگیری سامانه‌های دوفازی آبی بسیار مناسب است [۲]. معمولاً در روش استخراج مایع-مایع اجرا بین دو فاز نامحلول در حال انتقال هستند. در سامانه‌های دوفازی آبی، دو بسیار ناسازگار یا یک بسیار و نمک در دما و جرم مطلوب آماده می‌شود. حضور مقدار بالای آب در بخش آلی و آبی و نیز کشش سطحی اندک، سبب به سامانه‌های آب و حلال آلی کمتر باعث ایجاد ناحیه بزرگی در فصل مشترک میان بخش آلی و آبی می‌شود که انتقال جرم بین دو فاز به سهولت ممکن می‌شود [۳]. اساس فرایند استخراج در سامانه‌های دوفازی آبی، پخش انتخابی ذرات میان دو بخش آبی و آلی است [۴]. در حال حاضر، سامانه‌های دوفازی آبی به‌طور گسترده در فرایندهای تخلیص به کار می‌رود. این فناوری را برای اولین بار بیجرینک<sup>۱</sup> گزارش داد. او بیان کرد که با ترکیب محلول‌های آبی ژلاتین، آگار و نشاسته، یک مخلوط با رنگ مات تشکیل می‌شود. سامانه‌های دوفازی آبی براساس رسم نمودارهای تعادلی، ضریب توزیع‌پذیری و سایر نتایج ترمودینامیکی در طراحی این فناوری در مقیاس تجاری به کار می‌رود [۵]. به علاوه، اخیراً به‌علت گزینش‌پذیری در استخراج، مقاومت در گستره بالایی از pH، عدم سمیت، نبود قابلیت انفجار، پیوسته‌بودن فناوری، بازدهی زیاد، زمان و انرژی اندک، مورد توجه قرار گرفته است. به‌کارگیری این روش، راهی مؤثر در جداسازی اسید است [۶]. در این روش، از پلی‌اتیلن گلیکول به‌دلیل نداشتن سمیت و انفجار، نداشتن فراریت و سازگاری با محیط زیست به‌عنوان بسیار به‌طور

معمول استفاده می‌شود و به‌سهولت در محلول‌های نمکی، سامانه‌های دوفازی آبی ایجاد می‌کند. گزینش سامانه‌های دوفازی آبی به گونه اسید و مقادیر pH وابسته است و به‌علت آن که سامانه‌های بسیار- بسیار قیمت و گران‌روی بالایی دارند، سامانه‌های بسیار- نمک ترجیح داده می‌شود [۷].

روش‌های گوناگونی برای جداسازی اسید لاکتیک انجام گرفته که در ادامه توضیح داده شده است. در میان این روش‌ها، استفاده از سامانه دوفازی آبی در جداسازی اسید لاکتیک به‌ندرت انجام شده است. ورا و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۳ به جداسازی اسید لاکتیک به‌کمک روش الکترودیالیز پرداختند [۸]. فاطمه برجی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اسید لاکتیک را به‌کمک حلال بنزیل الکل استخراج کردند [۹]. نیراکار و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۷ به جذب سطحی اسید لاکتیک با استفاده از کربن فعال گرانولی پرداختند [۱۰]. جیانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ اسید لاکتیک را با فناوری سامانه دوفازی آبی جدا کردند [۱۱]. قنادزاده گیلانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به استخراج مایع- مایع اسید لاکتیک به‌کمک ۲- اتیل-۱- هگزانول پرداختند [۱۲]. پیرا و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۲ اسید کلارولانیک را به‌کمک سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- سدیم پلی‌آکریلات استخراج کردند [۱۳]. اشمیت و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۴ به جداسازی آلفا- آمیلاز با استفاده از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- سدیم کلرید پرداختند [۱۴]. آلمدیا و همکاران<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۴ اسید گالیک را با استفاده از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- سدیم سولفات استخراج کردند [۱۵]. گوجا و همکاران<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۳ پروتئین را با استفاده از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- پتاسیم فسفات استخراج کردند [۱۶]. قنادزاده گیلانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ اسید فرمیک را با استفاده از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- سدیم دی‌هیدروژن فسفات استخراج کردند [۱۷]. معصومی و همکاران در سال ۲۰۲۱ به استخراج اسید مالیک با استفاده از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول- نمک‌های فسفات پرداختند [۲۷].

در تحقیق حاضر، اثر سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول-

2. Vera, et al.  
 3. Nirakar, et al.  
 4. Pereira, et al.  
 5. Schmidt, et al.  
 6. Almeida, et al.  
 7. Goja, et al.

1. Beijerinck

جدول ۱. مشخصات مواد شیمیایی در تحقیق حاضر.

Table 1. The features of materials in the present research.

Type of Material	Chemical Formula	Measurement Method	CAS Number
Sodium Sulfite	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Chromatography	7757-83-7
Sodium Tartrate Dihydrate	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Chromatography	6106-24-7
Sodium Dihydrogen Phosphate	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Chromatography	7558-80-7
Sodium Hydroxide	NaOH	Chromatography	1310-73-2
Sulfuric Acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acid-base titration	7664-93-9
Polyethylene Glycol 4000	C <sub>2n</sub> H <sub>4n+2</sub> O <sub>n+1</sub>	Chromatography	25322-68-3
Polyethylene Glycol 8000	C <sub>2n</sub> H <sub>4n+2</sub> O <sub>n+1</sub>	Chromatography	25322-68-3
Lactic Acid	C <sub>3</sub> O <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Acid-base titration	50-21-5
Deionized Water	H <sub>2</sub> O	Conductometry	7732-18-5

نمکی با غلظت‌های متفاوت، ابتدا محلول نمکی ۵۰ درصد وزنی به وزنی از هر کدام از نمک‌های سدیم سولفیت، سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن ساخته می‌شود، به این صورت که ۱ گرم از هر یک از نمک‌ها به‌طور جداگانه در ۱ گرم آب حل می‌شود. آنگاه، محلول‌های نمکی ۵۰ درصد وزنی به وزنی برای تهیه غلظت‌های ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد رقیق می‌شود. به این صورت که ۲، ۳۳، ۱ و ۰٫۸۵ گرم آب به محلول نمکی ۵۰ درصد وزنی به وزنی به ترتیب برای تهیه غلظت‌های ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد وزنی اضافه می‌شود. برای ساخت محلول بسیاری با غلظت ۳۰ درصد وزنی به وزنی، ۱/۵ گرم بسیار در ۳/۵ گرم آب حل می‌شود. سپس، محلول‌های نمکی با غلظت‌های ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد وزنی با محلول بسیاری با غلظت ۳۰ درصد وزنی با وزن‌های مولکولی ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ گرم بر مول در لوله‌آزمایش تحت اختلاط قرار می‌گیرند تا حالت ابری و دوفازی تشکیل شود. آن‌گاه، ۴ میلی‌لیتر از بخش بالایی و پایینی برای سامانه‌های دوفازی انتخاب شد. به‌منظور جداسازی اسید در سامانه‌های دوفازی آبی، میزان ۰٫۲ میلی‌لیتر از اسیدلاکتیک به سامانه دوفازی وارد شد و پس از ترکیب شدن نمک و بسیار، به‌منظور رسیدن به تعادل، در آنکوباتور در درجه حرارت معین گذاشته شد. پس از برقراری تعادل، حجم‌های تعادلی هر

نمک‌های فسفات بر روی ضریب توزیع پذیری و بازدهی استخراج اسید لاکتیک از محلول‌های رقیق آبی در جرم‌های مولکولی گوناگون بسیار، غلظت نمک، pH و دماهای گوناگون بررسی شد و با نتایج سایر پژوهش‌ها به روش‌های مختلف جداسازی مقایسه شد.

۲. بخش تجربی

۲-۱ مواد شیمیایی

در این پژوهش، از نمک‌های سدیم سولفیت (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) با خلوص بالای ۹۹٪، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات (C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) با خلوص بالای ۹۹٪ و سدیم دی‌هیدروژن فسفات (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) نیز با خلوص بالای ۹۹٪، ساخت شرکت مرک<sup>۱</sup> آلمان استفاده شد. از سدیم هیدروکسید و اسید سولفوریک ساخت شرکت مرک به‌منظور تنظیم pH استفاده شده است. برای تنظیم pH، در یک بالون ژوژه جداگانه سود ۰/۰۵ مولار و نیز در یک بالون ژوژه جداگانه نیز اسید سولفوریک ۰/۱ مولار تهیه شد. آن‌گاه، pH متر کالیبره شده را درون محلول حاوی اسید لاکتیک به‌منظور اندازه‌گیری pH قرار داده شد. حال برای افزایش مقدار pH از اضافه کردن ۲ الی ۳ قطره سود ۰/۰۵ مولار و نیز برای کاهش pH از اضافه کردن ۲ الی ۳ قطره اسید سولفوریک ۰/۱ مولار استفاده شد. به‌علاوه، سدیم هیدروکسید در تیتراسیون اسید-باز نیز استفاده شد. بسیار پلی‌اتیلن گلیکول با جرم مولکولی ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ گرم بر مول و اسید لاکتیک با خلوص بالای ۹۹٪ ساخت شرکت مرک برای ایجاد حالت دوفازی استفاده شده است. هم‌چنین، برای محلول‌سازی نیز آب دی‌یونیزه<sup>۲</sup> با هدایت الکتریکی ۰٫۰۵۵ میکرو زیمنس به کار گرفته شده است. مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۲ روش انجام آزمایش

یک فاز بالا (غنی از بسیار) و یک فاز پایین (غنی از نمک) در سامانه‌های دوفازی آبی بسیار-نمک گوناگون مشاهده می‌شود؛ بدین منظور باید مقادیر گوناگونی از محلول نمک و پلی‌اتیلن گلیکول تحت اختلاط قرار گیرند. بنابراین، محلول‌های پلی‌اتیلن گلیکول با مقدار وزنی ۳۰ درصد و محلول‌های فسفات با مقادیر وزنی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد تهیه شدند. برای ساخت محلول‌های

1. Merck  
 2. Deionized Water

$$V_r = \frac{V_t}{V_b} \quad (1)$$

ضریب تفکیک لاکتیک اسید: نشان‌دهنده نسبت غلظت اسید در فاز بالا  $C_t$  به غلظت اسید در فاز پایین  $C_b$  است. غلظت اسید در فاز بالا و پایین از معادله (۲) حساب می‌شود.

$$D = \frac{C_t}{C_b} \quad (2)$$

هم‌چنین، غلظت‌ها در فاز بالا و پایین به ترتیب از معادله‌های (۳) و (۴) حساب می‌شوند ( $V'_b$  و  $V'_t$  حجم خوانده شده در بورت طی فرایند تیتراسیون به ترتیب برای فاز بالا و فاز پایین و  $M$  همان مولاریته است):

$$C_t = \frac{M_{NaOH} \times M_{Acid} \times V_t}{V'_t} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{M_{NaOH} \times M_{Acid} \times V_b}{V'_b} \quad (4)$$

در نهایت، بازدهی استخراج اسید لاکتیک ( $Y$ %) از معادله (۵) حساب می‌شود [۲۰]:

$$\%Y = \frac{D \times V_r}{(D \times V_r) + 1} \times 100 \quad (5)$$

جدول ۲. ضریب توزیع‌پذیری اسید لاکتیک در شرایط مختلف آزمایشگاهی در  $pH=4$ .

Table 2. Lactic acid distribution coefficient in different laboratory conditions.

Salt type	Weight percentage of salts	4000 PEG				8000 PEG			
		Temperature (°C)				Temperature (°C)			
		40	35	30	25	40	35	30	25
Na <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	25	0.67	0.67	0.68	0.80	0.59	0.63	0.65	0.75
	30	0.53	0.53	0.54	0.56	0.48	0.48	0.50	0.50
	35	0.41	0.42	0.45	0.50	0.40	0.41	0.43	0.43
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	25	0.66	0.67	0.76	0.82	0.61	0.64	0.65	0.66
	30	0.55	0.57	0.62	0.72	0.53	0.56	0.56	0.59
	35	0.46	0.47	0.52	0.55	0.45	0.46	0.47	0.48
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	25	0.34	0.35	0.37	0.38	0.32	0.33	0.35	0.35
	30	0.27	0.27	0.28	0.3	0.25	0.25	0.26	0.27
	35	0.19	0.21	0.24	0.25	0.19	0.19	0.23	0.24

بخش مشاهده و یادداشت شد. به علاوه، به منظور آنالیز اسید، از بخش آلی و آبی به وسیله سمپلر نمونه برداری انجام شد. پس از نمونه‌گیری از هر فاز، آنالیز اسید لاکتیک با کمک سود ۰/۰۵ نرمال و شناساگر فنل فتالین انجام شد. نمونه‌ای از سامانه دوفازی آبی در این آزمایش در شکل (۱) آورده شده است [۱۸، ۱۹].



شکل ۱. سامانه دوفازی آبی بسیار-نمک در تحقیق حاضر.

Figure 1. The polymer-salt aqueous two phase system at the present research.

### ۳-۲ محاسبات شاخص‌های آزمایش

جداسازی و خالص‌سازی اسید لاکتیک در سامانه‌های دوفازی آبی با شاخص‌های مختلفی مانند نسبت حجمی فازها و ضریب تفکیک لاکتیک اسید ارزیابی شد. این شاخص‌ها به صورت زیر تعریف شدند: نسبت حجمی فازها: بیانگر حاصل تقسیم حجم تعادلی بخش آلی  $V_t$  به حجم تعادلی بخش آبی  $V_b$  است؛ و با  $V_r$  نشان داده می‌شود (معادله (۱)).

## ۲. نتایج و بحث

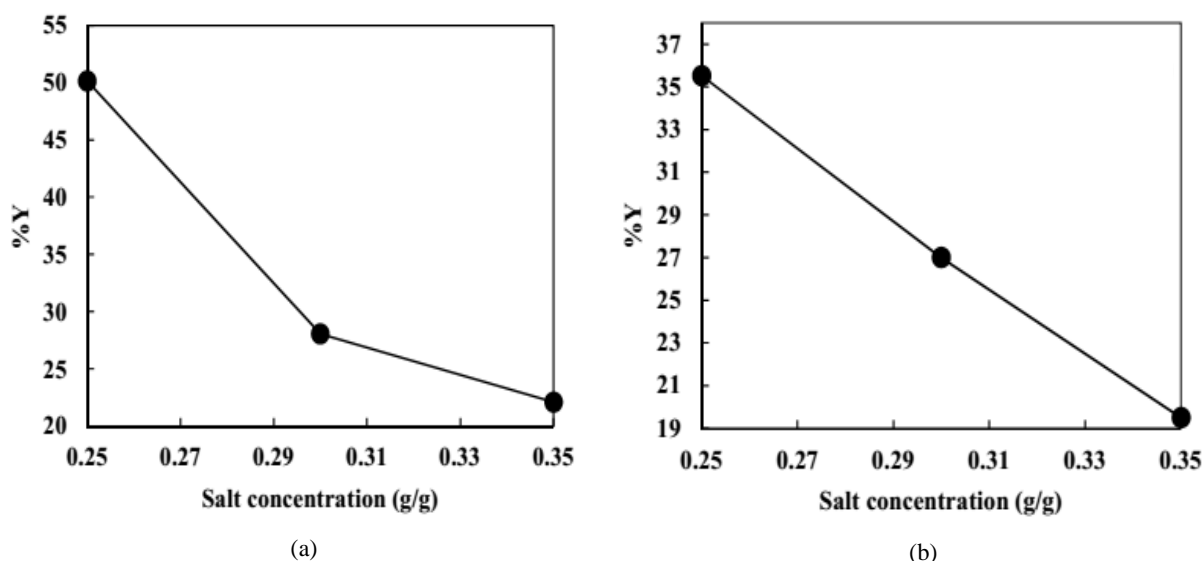
در پژوهش حاضر، برای جداسازی اسیدلاکتیک در سامانهٔ دوفازی آبی پلی اتیلن گلیکول- فسفات با توجه به برتری‌هایی مانند گرانروی کم و قیمت اندک استفاده شد. بسپارهایی با گرانروی بالا باعث کاهش شدید فعالیت اسیدلاکتیک در فاز غنی از بسپار می‌شود [۲۱]. در این قسمت، تأثیر عواملی مانند جرم مولکولی بسپار، نوع نمک، غلظت نمک، pH و دما بر روی بازدهی استخراج بررسی شد.

### ۳-۱ اثر جرم مولکولی بسپار

اثر آب‌گریزی PEG با افزایش طول آن که در واقع افزایش وزن مولکولی آن است افزایش پیدا می‌کند. PEG‌های با جرم مولکولی متفاوت به علت تغییر در نمودار فازی بر روی ضریب توزیع اثر می‌گذارند. با توجه به جدول (۲)، ضریب توزیع‌پذیری از ۰/۸۲ به ۰/۶۵ با افزایش جرم مولکولی بسپار از ۴۰۰۰ به ۸۰۰۰ گرم بر مول کاهش یافت، به این معنی که با افزایش جرم مولکولی PEG،

تمایل اسید لاکتیک برای ورود به فاز غنی از نمک افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین، با توجه به شکل‌های (۲- a) و (۲- b) استنباط می‌شود که استخراج اسید به دگرگونی جرم مولکولی پلی اتیلن گلیکول بسیار حساس است. با افزایش جرم مولکولی پلی اتیلن گلیکول از ۴۰۰۰ به ۸۰۰۰ گرم بر مول، بازدهی استخراج اسید از ۵۰/۱۵ درصد به ۳۵/۵۲ درصد (در غلظت وزنی ۰/۲۵ از نمک سدیم سولفیت و دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس) نزول می‌یابد که به دلیل دو عامل است:

- بر اساس نظریهٔ حجم آزاد، با افزایش جرم مولکولی پلی اتیلن گلیکول حجم تعادلی لاکتیک اسید در فاز غنی از پلی اتیلن گلیکول، کم و اسید به بخش آبی منتقل می‌شود.
- با افزایش جرم مولکولی، طول زنجیرهٔ پلی اتیلن گلیکول و در نتیجه، اثر آب‌گریزی آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش جرم مولکولی بسپار، اثر نیروهای بین مولکولی بسپار و لاکتیک اسید کمتر می‌شود و اسید به فاز غنی از نمک تمایل پیدا می‌کند.



شکل ۲. اثر جرم مولکولی پلی اتیلن گلیکول بر بازدهی استخراج لاکتیک اسید (a) ۴۰۰۰ گرم بر مول و (b) ۸۰۰۰ گرم بر مول با استفاده از نمک سدیم سولفیت در سه غلظت متفاوت در دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس.

Figure 2. The effect of polymer molecular weight for the percentage of extraction of lactic acid (a) 4000 g/mol (b) 8000 g/mol using sodium sulfite in the three different salt concentration at 25°C.

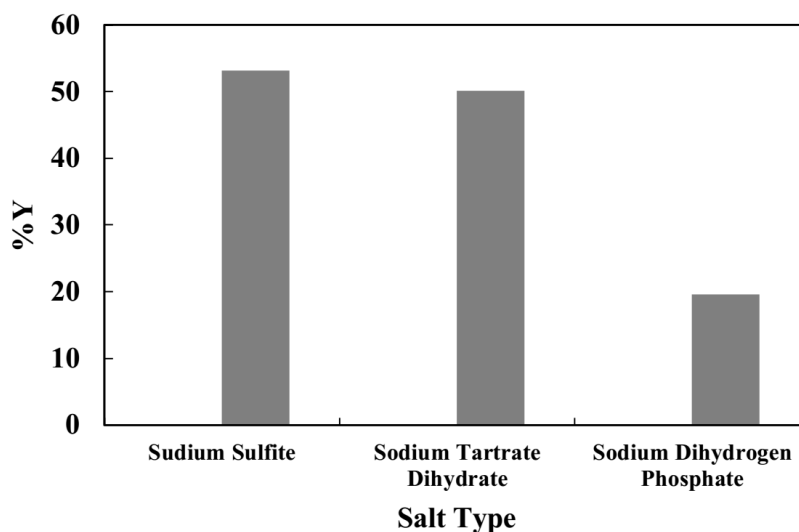
### ۲-۳ اثر نوع نمک

بیشتری هستند و قابلیت نمک‌زدایی بیشتری دارند. بنابراین، تعداد ذرات کمتر آب به منظور آبیوشی اسیدلاکتیک وجود دارد که باعث انباشتگی و انتقال ذرات اسیدلاکتیک به بخش آلی می‌شود. در واقع، انرژی آزاد گیبس آب پوشی یون سولفیت بسیار منفی‌تر از یون‌های تارتارات و هیدروژن فسفات است و در نتیجه بازدهی استخراج بالاتری دارد [۲۴].

### ۳-۳ غلظت نمک

در سامانه‌های دوفازی، نمک‌ها تمایل متفاوت به فاز بالا و پایین دارند. تقسیم‌شدن غیر متقارن نمک در این سامانه‌ها در دو فاز منجر به تقسیم‌شدن اسید لاکتیک در دو فاز می‌شود و در نتیجه بر ضریب توزیع، اثر می‌گذارد. در یک سامانه دوفازی آبی که با نمک و بسپار ایجاد شده و دو فاز در آن در حال تعادل اند، تمایل نامساوی نمک به فاز بالا و پایین، دو اتمسفر مجزای یونی در هر فاز ایجاد می‌کند. سپس، اسید لاکتیک به سامانه دوفازی آبی اضافه می‌شود. آنگاه، اسید لاکتیک با دو اتمسفر جداگانه در دو فاز مواجه می‌شود؛ بنابراین، تمایل اسید به این دو فاز یکسان نیست و به یکی از فازها تمایل بیشتری نشان می‌دهد. این تفاوت به علت نیروهای الکترواستاتیکی بین هر فاز با اسید لاکتیک است؛ بنابراین، ضریب توزیع نیز به نوبه خود تابعی از اختلاف پتانسیل شیمیایی ناشی از نوع و غلظت نمک مورد استفاده خواهد بود. با توجه به جدول (۲).

تأثیر نوع نمک در بازدهی استخراج اسیدلاکتیک با کمک از سامانه دوفازی آبی پلی‌اتیلن گلیکول و نمک‌های فسفات در حالات گوناگون بررسی شد. با توجه به جدول (۲)، ضریب توزیع‌پذیری سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۸۰ و ۰/۳۸ در غلظت ۲۵ درصد وزنی، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و جرم مولکولی بسپار ۴۰۰۰ گرم بر مول حساب شد. همچنین، با توجه به شکل (۳)، بازدهی استخراج برای نمک‌های سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات به ترتیب ۵۳/۲، ۵۰/۱ و ۱۹/۵۵ درصد تعیین شد. نمک‌ها به‌طور معمول به‌منظور سهولت در استخراج مواد از میان بخش‌های آلی و آبی به کار می‌روند. به‌منظور مطالعه اثر نوع نمک، بازدهی استخراج در غلظت وزنی برابر از هر نوع از نمک‌های فسفات در مقادیر ثابتی از درجه حرارت و غلظت وزنی پلی‌اتیلن گلیکول آزمایش شد. نتایج در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) پیداست، سامانه متشکل از نمک سدیم سولفیت نسبت به بقیه نمک‌ها، بیشترین بازدهی استخراج را دارد. قابلیت نمک‌زدایی<sup>۱</sup> کاتیون یا آنیون، به بار الکتریکی یونی، شعاع آب‌پوشی و فعل و انفعالات آن با بسپار و انرژی آزاد گیبس یون‌ها وابسته است [۲۲، ۲۳]. به‌طور کلی، یون‌های نمک با مقدار بالاتر انرژی آزاد گیبس آب‌پوشی (منفی‌تر) قادر به آب‌پوشیده کردن ذرات آب



شکل ۳. اثر نوع نمک بر بازدهی استخراج در غلظت ۲۵ درصد وزنی از نمک‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.

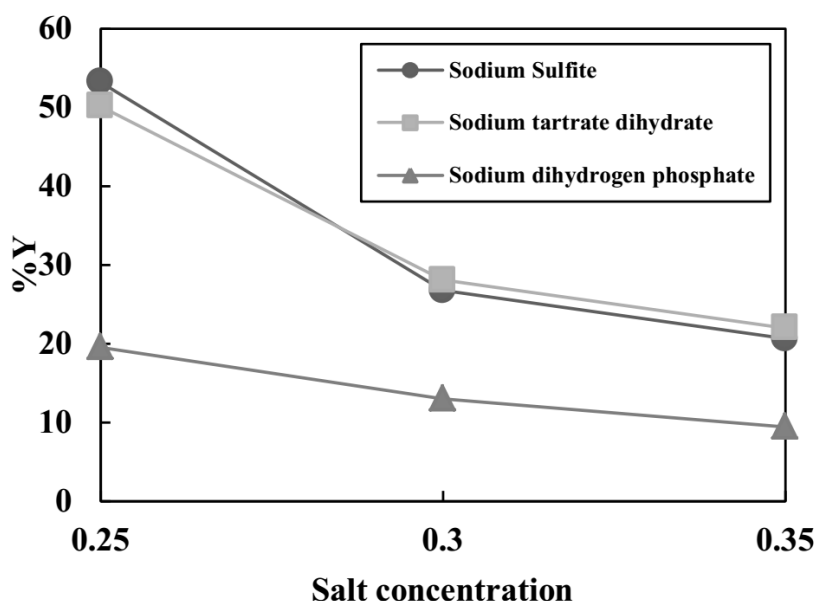
Figure 3. The effect of salt type on the percentage of extraction in the 25% (g/g) of salt concentrations at 25°C.

1. Salting-Out

مشاهده می‌شود که هرچه غلظت نمک سدیم سولفیت افزایش یابد، ضریب توزیع‌پذیری از ۰/۸۲ در غلظت ۰/۲۵ تا ۰/۵۵ در غلظت ۰/۳۵ در جرم مولکولی ۴۰۰۰ گرم بر مول و دمای ۲۵ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد، یعنی اسید لاکتیک تمایل به انتقال به فاز پایین دارد. همچنین، در شکل (۴) مشاهده می‌شود که در هر سه سامانه دوفازی با زیاد شدن مقدار نمک از ۰/۲۵ تا ۰/۳۵، بازدهی استخراج اسید نیز از ۵۰ درصد به ۲۲ درصد کم می‌شود. بیشینه بودن ضریب توزیع اسید در بخش آلی به معنی مناسب بودن هماهنگی میان آب‌گریزی پلی‌اتیلن گلیکول و نمک‌زدایی نمک است. به دلیل آن که ذرات نمک با ذرات باردار با بار مخالف اسید برخورد دارد و با ایجاد قسمت‌های دولایه از ذرات یونی منجر به جدا شدن مولکول آب از اسید می‌شود. ویژگی آب‌پوشی<sup>۱</sup> ذرات نمک و جدا کردن مولکول آب از اسید باعث افزایش بخش‌های آب‌گریزی اسید می‌شود. زیاد شدن مقدار نمک تا عدد معینی باعث کم شدن حجم آزاد در بخش آبی و منجر به انتقال اسید به بخش آلی می‌شود، ولی در مقادیر زیاد نمک، نمک‌زدایی باعث ته‌نشینی اسید در لایه مشترک دو بخش و کم شدن ضریب توزیع و در نهایت، نزول بازدهی استخراج می‌شود [۲۵].

### ۳-۴. اثر pH

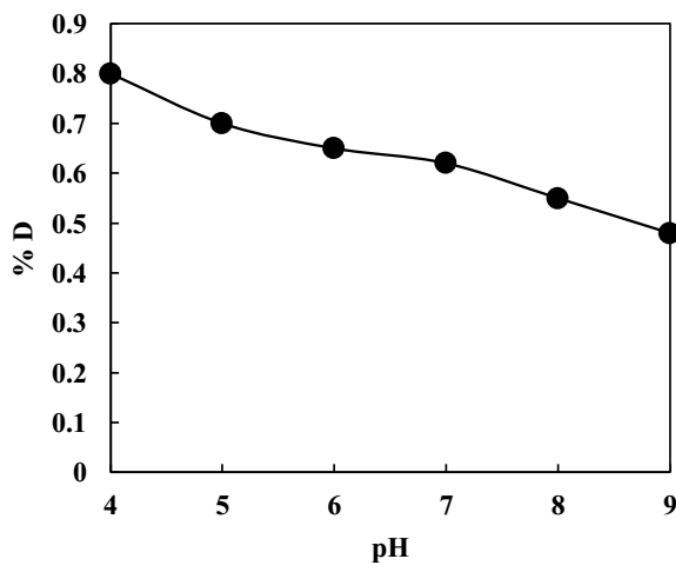
با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که به ترتیب، با افزایش pH، ضریب توزیع و بازدهی استخراج کاهش می‌یابد و بیشترین ضریب توزیع و بازدهی استخراج در pH معادل با ۴ دیده شد. به عبارت دیگر، ضریب توزیع از مقدار ۰/۸ در pH برابر با ۴ تا ضریب توزیع ۰/۴۸ در pH برابر با ۹ کاهش می‌یابد. همچنین، بازدهی استخراج از ۵۲ درصد در pH برابر با ۴ تا ۱۷/۳۵ درصد در pH برابر با ۹ تغییر یافت؛ زیرا با افزایش pH در بخش آلی و آبی، از انتقال اسید به بخش آلی کاسته می‌شود. به علاوه، با کاهش خاصیت اسیدی محیط، از نیروی کششی میان پلی‌اتیلن گلیکول و آب کاسته می‌شود و آب به بخش آبی منتقل می‌شود. با این اوصاف، حجم بخش آلی کم و حجم بخش آبی زیاد می‌شود که منجر به کاهش حجم کاهیده و نیز کم شدن بازدهی استخراج می‌شود. ارزیابی pH در درجه حرارت ۲۵ سلسیوس انجام گرفته است [۲۶].



شکل ۴. اثر غلظت نمک بر بازدهی استخراج اسید لاکتیک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و جرم مولکولی بسیار ۴۰۰۰ گرم بر مول.

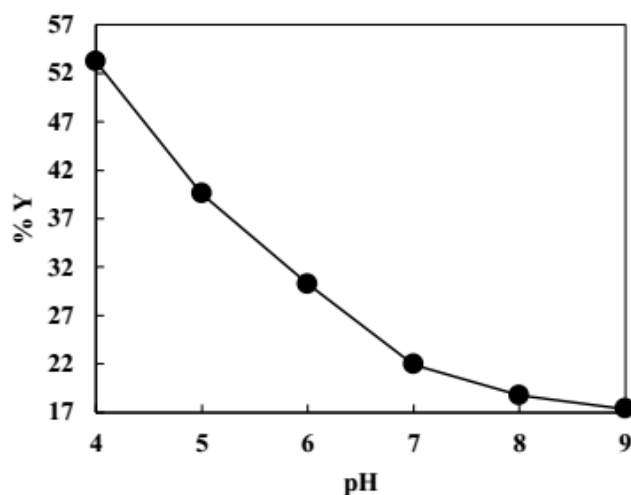
Figure 4. The effect of salt concentration on percentage of extraction of Lactic acid at the temperature of 25°C and polymer molecular weight of 4000 g/mol.





شکل ۵. اثر pH بر روی ضریب توزیع اسیدلاکتیک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، جرم مولکولی ۴۰۰۰ گرم بر مول و غلظت نمک ۲۵ درصد وزنی.

Figure 6. Effect of pH on the distribution coefficient of Lactic acid at 25°C, polymer molecular weight of 4000 g/mol, and salt concentration 25% by weight.



شکل ۶. اثر pH بر روی بازدهی استخراج اسیدلاکتیک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، جرم مولکولی ۴۰۰۰ گرم بر مول و غلظت نمک ۲۵ درصد وزنی.

Figure 6. Effect of pH on the percentage of extraction of Lactic acid at 25 °C, polymer molecular weight of 4000 g/mol, and salt concentration 25% by weight.

استفاده می‌شود. در رابطه (۱)،  $K_C$  همان ثابت تعادل ترمودینامیکی است. با توجه به رابطه (۶)، با ترسیم نمودار لگاریتم ضریب توزیع نسبت به معکوس درجه حرارت، شیب نمودار تغییرات آنتالپی و عرض از مبدأ آن تغییرات آنتروپی را نشان می‌دهد. بنابراین، با محاسبه تغییرات آنتالپی و آنتروپی، به توضیح درباره تأثیر درجه

### ۳-۵ اثر دما

دما عاملی اصلی در بازدهی استخراج و تأثیر آن در جداسازی برای سامانه‌های گوناگون، متغیر است. به همین دلیل، از رابطه وانت هوف (رابطه (۶)) برای محاسبه تغییرات آنتالپی ( $\Delta H^\circ$ ) و آنتروپی ( $\Delta S^\circ$ ) و از رابطه (۷) برای محاسبه تغییرات انرژی آزاد گیبس ( $\Delta G^\circ$ )

الکترودیالیز در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به جدول زیر، کار حاضر به روش سامانه دوفازی آبی نسبت به روش استخراج مایع-مایع دارای بازدهی استخراج بالاتری است. این جدول همچنین نشان می‌دهد که روش دوفازی آبی در pH های پایین مانند ۲ بازدهی استخراج بالاتری است که کار حاضر نیز اگر در pH های کمتر از ۴ انجام می‌شد دارای بازدهی استخراج بیشتر از ۵۳ درصد می‌شد. به علاوه، روش الکترودیالیز نیز دارای بازدهی استخراج بالاتری نسبت به کار حاضر است؛ ولی روش مقرون به صرفه‌ای نیست؛ زیرا هزینه برق و هزینه تعویض غشا وجود دارد. همچنین، مشاهده شده است که سامانه دوفازی آبی بسیار-نمک در استخراج اسید گالیک (در کار آل‌مدیا و همکاران) نسبت به اسید لاکتیک دارای بازدهی بالاتری است. همچنین، با توجه به جدول (۴)، برای افزایش بازدهی استخراج بهتر است که از نمک‌های فسفات مانند پتاسیم فسفات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات استفاده شود. به علاوه، در بین بسپارهای مورد استفاده، پلی‌اتیلن گلیکول دارای عملکرد بهتری است. به علاوه، پیشنهاد می‌شود که استخراج در دمای کمتر از ۲۵ درجه سلسیوس انجام شود. نتایج در بخش مقایسه بیان می‌کند که سامانه دوفازی آبی بسیار-نمک در جداسازی اسیدهای نوکلئیک مناسب‌تر است. همچنین، سامانه دوفازی آبی نسبت به جذب سطحی، الکترودیالیز و استخراج مایع-مایع بازدهی استخراج بالاتری دارد.

حرارت پرداخته می‌شود. مقادیر تغییرات آنتالپی، آنتروپی و انرژی آزاد گیبس در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به جدول (۳)، با افزایش درجه حرارت، تغییرات انرژی آزاد گیبس مثبت‌تر می‌شود که دلالت بر حرکت فرایند جداسازی به سوی حالت غیرخود به خودی و نامطلوب است. همچنین، علامت منفی تغییرات آنتالپی استاندارد بیانگر گرم‌آب‌بودن فرایند است. منفی بودن تغییرات آنتروپی استاندارد توضیح می‌دهد که با بالا رفتن درجه حرارت، بی‌نظمی ناچیزی برای حرکت اسید به بخش آلی است [۲۷]. لازم به ذکر است که طبق جدول (۲)، افزایش دما منجر به کاهش ضریب توزیع نیز می‌شود. نامطلوب‌بودن افزایش درجه حرارت در فرایند استخراج اسید لاکتیک-به دلیل تغییر ساختار بسپار و کم کردن فعل و انفعالات بسپار با اسید-باعث نزول ضریب توزیع و بازدهی استخراج اسید لاکتیک می‌شود. به علاوه، دمای کم به دلیل گسترش آب‌پوشی نمک منجر به بالا رفتن ضریب توزیع اسید می‌شود.

$$\ln(K_c) = \frac{-\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{T} \quad (6)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - (T \times \Delta S^\circ) \quad (7)$$

### ۳-۶ مقایسه

مقایسه کار حاضر با روش دوفازی آبی، استخراج مایع-مایع و

جدول ۳. شاخص‌های ترمودینامیکی استخراج اسید لاکتیک در سامانه پلی‌اتیلن گلیکول-سدیم سولفیت.

Table 3. Thermodynamic parameters for lactic acid extraction in polyethylene glycol-sodium sulfite.

Separation System	Temperature(K)	K	$\Delta H^\circ$ (KJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (KJ/mol.K)	$\Delta G$ (KJ/mol)	Extraction Yield
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> %25 + %30 PEG 4000	298.15	0.80	-9.22	-0.03	-0.28	53.20
	303.15	0.68			-0.13	51.20
	308.15	0.67			0.02	49.85
	313.15	0.67			0.17	47.73

جدول ۴. مقایسه نتایج کار حاضر با سایر پژوهش‌ها.

Table 4. Contrasting the observations between this research and other investigations.

Ref.	Extraction Percentage (%)	pH	Separation Type	Years	Researchers
[10]	80	2.00	Adsorption	2017	Nirakar et al.
[11]	71.57	3.00	Aqueous Two Phase System	2021	Jiang et al.
[9]	46.12	7.00	Liquid-Liquid Extraction	2016	Borji et al.
[12]	22.82	7.00	Liquid-Liquid Extraction	2017	Ghanad Zadeh Gilani et al.
[8]	81	7.00	Electrodialysis	2003	Vera et al.
[13]	50	6.50	Aqueous Two Phase System	2012	Pereira et al.
[14]	24	7.00	Aqueous Two Phase System	1994	Schmidt et al.
[15]	93	3.00	Aqueous Two Phase System	2014	Almeida et al.
[16]	83.4	7.00	Aqueous Two Phase System	2013	Goja et al.
[17]	56.09	7.00	Aqueous Two Phase System	2020	Ghanad Zadeh Gilani et al.
[27]	80	5	Aqueous Two Phase System	2021	Masoumi et al.
-	53.205	4.00	Aqueous Two Phase System	2021	Present et al.

#### ۴. نتیجه‌گیری

جدول (۳)، برای افزایش بازدهی استخراج بهتر است از نمک‌های فسفات مانند پتاسیم فسفات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات استفاده شود. به‌علاوه، در بین بسپارهای مورد استفاده، پلی‌اتیلن گلیکول دارای عملکرد بهتری است. نتایج در بخش مقایسه بیان می‌کند که سامانه دوفازی آبی بسپار- نمک در جداسازی اسیدهای نوکلئیک مناسب‌تر است. هم‌چنین، سامانه دوفازی آبی نسبت به جذب سطحی، الکترودیالیز و استخراج مایع-مایع بازدهی استخراج بالاتری دارد.

#### مراجع

- [1] Villalobos, J. A., Zamora, J., Barboza, N., Garbanzo, C., Usaga, J., Solano, M., Schroedter, L., Widdrat, A., Gómez, J. P., "Multi-product lactic acid bacteria fermentations: A review", *Fermentation*, 6: pp. 1-21, (2020).
- [2] Masoumi, H., Gilani, H., "Effect of phosphate salts on the extraction of malic acid", *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 167-175, In Persian, (2021).

در تحقیق حاضر از سامانه دوفازی نمک‌های فسفات و پلی‌اتیلن گلیکول با جرم‌های مولکولی گوناگون، در یافتن بازدهی استخراج اسیدلاکتیک استفاده شد و تأثیر شاخص‌های گوناگون مانند گونه و مقدار نمک، جرم مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول، درجه حرارت و اسیدیته ارزیابی شد. با توجه به نتایج، با ازدیاد جرم مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول، مقدار نمک و اسیدیته، بازدهی استخراج نزول پیدا می‌کند. بنابراین، بازدهی استخراج در نمک‌های سدیم سولفیت، دی‌سدیم تارتارات دی‌هیدرات و سدیم دی‌هیدروژن فسفات به ترتیب ۵۳/۲۰۵، ۵۰/۱۴۹ و ۱۹/۵۴۹ درصد حساب شد. شرایط بهینه عبارت‌اند از pH معادل ۴، جرم مولکولی بسپار ۴۰۰۰ گرم بر مول، غلظت نمک ۲۵ درصد وزنی و نمک سدیم سولفیت. با توجه به نتایج آزمایش، پیشنهاد می‌شود که از بسپار با جرم مولکولی کمتر از ۴۰۰۰ گرم بر مول، نمک با غلظت وزنی کمتر از ۲۵ درصد وزنی و pH کمتر از ۴ استفاده شود. هم‌چنین، با توجه به

- [3] Pereira, J. F., Freire, M. G., Coutinho, J. A., "Aqueous two-phase systems: Towards novel and more disruptive applications", *Fluid Phase Equilibria*, 505: pp.1-10, (2020).
- [4] Masoumi, H., Penchah, H. R., Gilani, H. G., Shaldehi, T. J., "Malic acid extraction from aqueous solution by using aqueous two-phase system method", *Results in Chemistry*, 1: pp. 1-6, (2019).
- [5] Shaldehi, T. J., Masoumi, H., Gilani, H., Hosseinpour, H., "Investigating the Parameters Effect on Ascorbic Acid Extraction Using Sulfate Salts and Polyethylene Glycol in Aqueous Two-Phase Systems", *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 163-170, In Persian, (2020).
- [6] Khayati, G., Gilani, H. G., Safari Keyvani, Z., "Extraction of Cu (II) ions from aqueous media using PEG/Sulphate salt aqueous two-phase system", *Separation Science and Technology*, 51: pp. 601-608, (2016).
- [7] Pirdashti, M., Bozorgzadeh, A., Ketabi, M., Khoiroh, I., "Phase equilibria of aqueous mixtures of PEG with formate salt: Effects of pH, type of cation, polymer molecular weight and temperature", *Fluid Phase Equilibria*, 485: pp. 158-167, (2019).
- [8] Hábová, V., Melzoch, K., Rychtera, M., Sekavová, B., "Electrodialysis as a useful technique for lactic acid separation from a model solution and a fermentation broth". *Desalination*, 162: pp. 361-372, (2004).
- [9] Gilani, H. G., Gilani, A. G., Peydeh, F. B., Saadat, S. S., Ahmadifar, S., Shekarsaraee, S., Reiszadeh, M., Sanjari, E., Jali, Z., Baktash, M. S., "Experimental and Theoretical Study of Phase Equilibria in Aqueous Mixtures of Lactic Acid with Benzyl Alcohol and p-Xylene at Various Temperatures". *Measurement*, 4: pp. 485-505, (2017).
- [10] Pradhan, N., Rene, E. R., Lens, P. N., Dipasquale, L., Ippolito, G. D., Fontana, A., Panico, A., Esposito, G., "Adsorption behaviour of lactic acid on granular activated carbon and anionic resins: thermodynamics, isotherms and kinetic studies", *Energies*, 10: pp. 1-16, (2017).
- [11] Jiang, B., Wang, L., Zhu, M., Wu, S., Wang, X., Li, D., Liu, C., Feng, Z., Tian, B., "Separation, structural characteristics and biological activity of lactic acid bacteria exopolysaccharides separated by aqueous two-phase system", *LWT*, 147: pp. 1-10, (2021).
- [12] Ahsaie, F. G., Pazuki, G., "Separation of phenyl acetic acid and 6-aminopenicillanic acid applying aqueous two-phase systems based on copolymers and salts", *Scientific reports*, 11: pp. 1-10, (2021).
- [13] Tanimura, K., Amau, M., Kume, R., Suga, K., Okamoto, Y., Umakoshi, H., "Characterization of ionic liquid aqueous two-phase systems: phase separation behaviors and the hydrophobicity index between the two phases", *The Journal of Physical Chemistry B*, 123: pp. 5866-5874, (2019).
- [14] da Silveira Leite, D., Carvalho, P. L. G., Almeida, M. R., de Lemos, L. R., Mageste, A. B., Rodrigues, G. D., "Extraction of yttrium from fluorescent lamps employing multivariate optimization in aqueous two-phase systems", *Separation and Purification Technology*, 242: pp. 1-9, (2020).
- [15] Shiran, H. S., Baghbanbashi, M., Ahsaie, F. G., Pazuki, G., "Study of curcumin partitioning in polymer-salt aqueous two phase systems", *Journal of Molecular Liquids*, 303: pp. 1-8, (2020).
- [16] Sadeghi, R., Jamehbozorg, B., "The salting-out effect and phase separation in aqueous solutions of sodium phosphate salts and poly (propylene glycol)", *Fluid phase equilibria*, 280: pp. 68-75, (2009).
- [17] Sosa, F. H. B., de Araujo Sampaio, D., Farias, F. O., Bonassoli, A. B. G., Mafra, L., Mafra, M. R., "Measurement and correlation of phase equilibria in aqueous two-phase systems containing polyethyleneglycol (2 000, 4 000, and 6 000) and sulfate salts (manganese sulfate and copper sulfate) at different temperatures (298.15, 318.15, and 338.15 K)", *Fluid Phase Equilibria*, 449: pp. 68-75, (2017).
- [18] Nandini, K., Rastogi, N., "Liquid-liquid extraction of lipase using aqueous two-phase system", *Food and Bioprocess Technology*, 4: pp. 295-303, (2011).
- [19] Zafarani, M. T., Shekaari, H., Jafari, P., "Thermodynamics of acetaminophen and bovine serum albumin partitioning in ternary aqueous solutions comprising polyethylene glycol dimethyl ether 250 and choline bitartrate: Liquid-liquid equilibria, volumetric and acoustic investigations", *Journal of Molecular Liquids*. 323: pp. 1-10, (2021).
- [20] Bai, S., Wan, J., Cao, X., "Partitioning of tylosin in recyclable aqueous two-phase systems based on two pH-responsive polymers", *Process Biochemistry*, 87: pp. 204-212, (2019).
- [21] Gilani, H. G., Gilani, A., Nia, B., Eftekhari, A., "lactic acid extraction from aqueous solutions with 2-Ethyl-1-hexanol by using experimental liquid-liquid equilibrium data at T=298.2K and atmospheric pressure", *Quarterly Journal of Iranian Chemical Communication*, 5: pp. 7-15, (2017).
- [22] Sadeghi, R., Jamehbozorg, B., "The salting-out effect and phase separation in aqueous solutions of sodium phosphate salts and poly (propylene glycol)", *Fluid phase equilibria*, 280: pp. 68-75, (2009).
- [23] Sosa, F. H. B., Sampaio, D., Farias, F. O., Bonassoli, A. B. G., Mafra, L., Mafra, M. R., "Measurement and correlation of phase equilibria in aqueous two-phase systems containing polyethyleneglycol (2000, 4000,

- and 6 000) and sulfate salts (manganese sulfate and copper sulfate) at different temperatures (298.15, 318.15, and 338.15 K)", *Fluid Phase Equilibria*, 449: pp. 68-75, (2017).
- [24] Marcus, Y., "Thermodynamics of solvation of ions. Part 5.—Gibbs free energy of hydration at 298.15 K", *Journal of the Chemical Society*, 87: pp. 2995-2999, (1991).
- [25] Nandini, K., Rastogi, N., "Liquid-liquid extraction of lipase using aqueous two-phase system", *Food and Bioprocess Technology*, 4: pp. 295-303, (2011).
- [26] Bai, S., Wan, J., Cao, X., "Partitioning of tylosin in recyclable aqueous two-phase systems based on two pH-responsive polymers", *Process Biochemistry*, 87: pp. 204-212, (2019).
- [27] Masoumi, H., Gilani, H., "Effect of phosphate salts on the extraction of malic acid by aqueous two-phase system", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 39: pp. 167-175, (2021).