اثر انتقال جرم بر توزیع فاز پراکنده در طول ستون پرشده ضربه‌ای

آرمین طاهری[۱]، ایرج گودرزنیا[۲]، سیدجابر صفدری[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۸۷/۶/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۸۷/۷/۲۰

چکیده:

اگرچه ستون‌های ضربه‌ای هم بصورت سینی‌دار و هم پرشده استفاده می‌شوند ولی بیشتر تحقیقات روی ستون‌های سینی‌دار انجام شده است. موجودی فاز پراکنده(holdup) یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی ستون‌های پرشده ضربه‌ای می‌باشد. هدف این مقاله بررسی تاثیر انتقال جرم بر روی تغییرات موجودی فاز پراکنده در ستون استخراج ضربه‌ای پرشده می‌باشد. آزمایشات بر روی یک ستون استخراج ضربه‌ای شیشه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی به قطر ۲ اینچ انجام شده است. تغییرات موجودی فاز پراکنده در طول ستون و تاثیر انتقال جرم بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، به عنوان یک روند کلی، با افزایش ارتفاع، موجودی فاز پراکنده زیاد می‌شود. هنگامی که انتقال جرم از فاز پیوسته به فاز پراکنده(قطرات) باشد، موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. بلعکس هنگامی جهت انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز پیوسته باشد، موجودی کمتر می شود.

کلمات کلیدی:
استخراج مایع ـ مایع، موجودی فاز پراکنده، ستون استخراج ضربه‌ای پرشده.

۱) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، کارشناس ارشد مهندسی شیمی Armin.Taheri@gmail.com
۲) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، استاد مهندسی شیمی.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

مقدمه

ستون‌های ضربه‌ای از سال ۱۹۵۰ در مقیاس صنعتی در صنایع هسته‌ای در کشورهای پیشرفته استفاده شده است. بدلیل بازده بالا و ایمنی بالا، از این نوع ستون‌ها بطور وسیع در صنایع هسته ای استفاده می شود.[۱] ستونهای ضربه‌ای معمولاً برای استخراج اورانیوم، پلوتونیوم و توریم در صنعت هسته‌ای وکارخانه‌های باز فرآوری فلز و همچنین در فرآیندهای بیوتکنولوژی استفاده می‌شود.[۲]

ستون‌های ضربه‌ای معمولاً به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱) ستون‌های ضربه‌ای با سینی مشبک (Pulsed-perforated-plate columns)

۲) ستون‌های ضربه‌ای پر شده با آکنه (Pulsed packed columns)

در ستون‌های ضربه‌ای، عملیات ستون توسط ظرفیت و راندمان استخراج بیان می‌شود و راندمان استخراج معمولاً با HTU[1] یا HETU[2] بیان می‌شود.[۳]

جهت خالص سازی یک مایع یا بازیافت اجزا، از یک ترکیب، ستون استخراج ضربه ای پرشده یک جواب خیلی راضی کننده و موثر را می دهد. این برجها قابلیت تحمل ظرفیت زیاد با بازده بالا در اندازه های بزرگ و کوچک را دارند.

مزایای این برجها عبارتند از:

۱) اختلاط محوری آنها کم است.

۲) توزیع فاز پراکنده در طول سطح مقطع یکسان است.

۳) سطح انتقال جرم را می‌توان کنترل کرد.

۴) در شرایط هیدرودینامیکی یکسان، بازده استخراج مستقل از قطر ستون است.

۵) عملیات استخراج در این برجها اقتصادی‌تر است.[۴]

انواع روش‌های اندازه‌گیری موجودی فاز پراکنده[۵]

۱) روش جابجایی فصل مشترک: بیشترین روش مورد استفاده است. بلافاصله بعد از خاموش کردن دستگاه تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها به برج را می‌بندند. بعد از اینکه فاز پراکنده در یک انتهای ستون جمع شد، حجم آن را اندازه می‌گیرند. اگرچه این روش ساده‌ای است ولی مهمترین عیب آن این است که مقدار صحیح موجودی فاز پراکنده کلی را در قسمت فعال ستون را نمی دهد.

---

1) Height of transfer unit (مورد استفاده در ستون‌های سینی‌دار)

2) Height equivalent to a theoretical stage (مورد استفاده در ستون‌های پرشده)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

۲) روش اختلاف فشار: با استفاده از اختلاف فشار نقاط مختلف برج و با توجه به دانسیته دو فاز، موجودی فاز پراکنده اندازه‌گیری می‌شود. اگرچه با استفاده از این روش بطور پیوسته تغییرات موجودی فاز پراکنده را با ارتفاع ستون مشاهده می‌شود ولی با توجه به تغییرات ناگهانی فشار (به علت جریان آشفته مایع درستون) خطای این روش بالاست.

۳) روش نمونه‌گیری: از نقاط مختلف برج نمونه‌گیری می‌شود. نسبت فاز پراکنده به پیوسته، موجودی فاز پراکنده را نشان می‌دهد. در این روش لازم است بعد از هر نمونه‌گیری دستگاه به حالت پایدار برسد.

۴) روش آلتراسونیک: که بر اساس اندازه‌گیری سرعت صوت با توجه به اختلاف سرعت صوت در دو فاز، موجودی اندازه‌گیری می‌گردد.[۶]

در این کار با استفاده از روش نمونه‌گیری, میزان موجودی فاز پراکنده در طول برج بررسی شده است.

دستگاه آزمایش

مشخصات ستون مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

محافظ آکنه‌ها (Packing Support) از جنس PTFE و در بالای آکنه‌ها قرار داده شده است. شیرهای نمونه‌گیری به فاصله مساوی در طول قسمت فعال ستون قرار داده شده‌اند. دو عدد پمپ از نوع پیستونی، جهت فازهای سبک و سنگین استفاده شده است. فاز پیوسته از بالای برج و فاز پراکنده از پایین برج، توسط پمپ وارد می‌شوند.

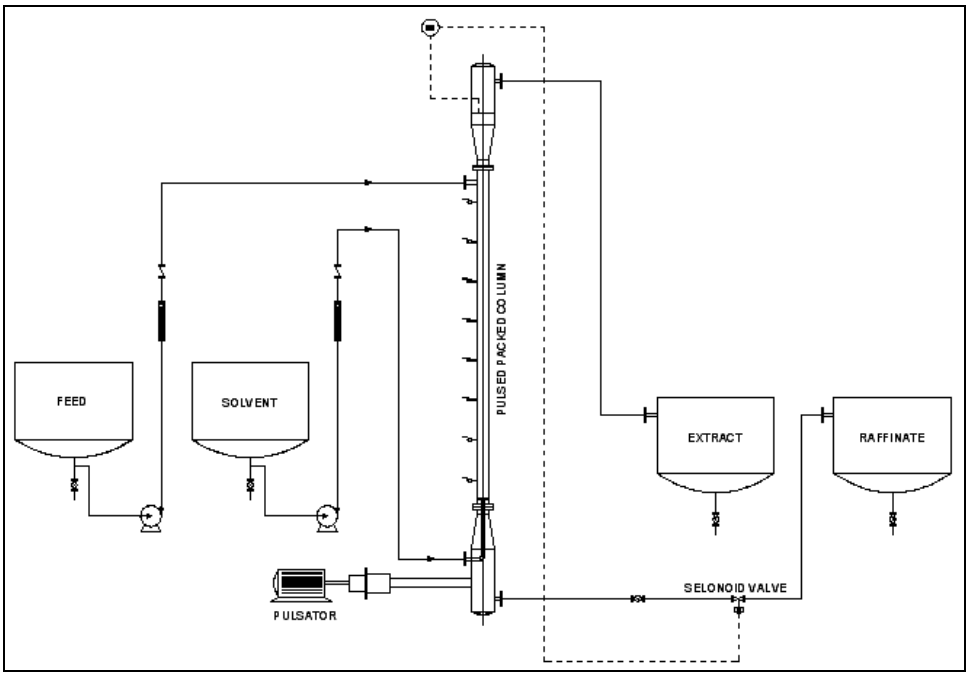
جدول(۱): مشخصات ستون مورد آزمایش

نوع ستون	قطر ناحیه فعال(اینچ)	قطر ناحیه ته‌نشینی(اینچ)	طول ناحیه فعال(متر)	نوع آکنه و سایز	تعداد شیرهای نمونه‌گیری
شیشه‌ای	۲	۳	۱/۲	راشیگ سرامیکی ۱/۴ اینچ	۵

از یک سینی سوراخ‌دار بعنوان توزیع‌کننده فاز پراکنده در پایین برج استفاده می‌شود که این توزیع بوسیله بطور موثر با عمل پالس در طول ستون باقی می‌ماند لذا نیازی به نصب توزیع‌کننده مجدد نداریم. شکل(۱) نمودار شماتیک از ستون مورد استفاده در آزمایش می‌باشد.

دستگاه مولد ضربه یک پمپ پالسی (Pump Pulsator) از نوع رفت و برگشتی است که توسط یک الکتروموتور برقی تولید ضربه می‌نماید و مجهز به کنترل کننده دامنه و فرکانس می‌باشد. دستگاه دارای چهار مخزن مشابه می‌باشد که دو تای آنها جهت نگهداری خوراک و حلال و دو تای دیگر جهت جمع آوری محصولات بالا و پایین برج می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



شکل(۱): نمودار شماتیک دستگاه

مواد و روش آزمایش

سیستم‌های توصیه شده توسط فدراسیون مهندسی شیمی اروپا (European Federation for Chemical Engineering) عبارتند از تولوئن-استن-آب ، بوتیل استات-استن-آب و ان‌بوتانول-اسیدساکسینیک-آب که به ترتیب برای برای کشش بین فازی بالا، متوسط و پایین بکار می‌روند.[۷] معمولاً سیستم کشش بین فازی کم، مورد آزمایش قرار نمی‌گیرد. قبل از این سیستم‌ها، دستگاه بوسیله سیستم آب-نفت سفید(kerosene) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در جدول(۲) مشخصات سیستم‌های مورد استفاده در این کار آمده است.جهت اندازه‌گیری موجودی در طول ستون از روش نمونه‌گیری موضعی و با استفاده از یک استوانه مدرج هر بار ۲۰ سی‌سی از محتویات برج را از طریق شیرهای نمونه‌گیری تخلیه شد. سپس به آن زمان داده شد تا دو فاز از هم جدا شوند. از تقسیم حجم فاز پراکنده به کل حجم، موجودی فاز پراکنده بدست می‌آید. با توجه به اینکه اگر بطور کامل تمام شرایط بررسی می‌شد نیاز آزمایشات زیادی بود (چندین سطح برای دبی فاز پراکنده دبی فاز پیوسته، فرکانس دامنه، کشش بین فازی و اثر انتقال جرم) لذا در طرح ریزی آزمایشات (Design of Experience(DOE)) تعداد آزمایشات کم گردید یعنی با تغییر دادن تنها یک متغیر و ثابت نگاه داشتن

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

بقیه متغیرها، به بررسی اثر آنها پرداخته شد. این مقاله تنها به بررسی اثر انتقال جرم، با ثابت نگاه داشتن سایر شرایط عملیاتی پرداخته است.

در طول آزمایشات دامنه ۲ سانتی‌متر , فرکانس (1/min) ۴۸، دبی فاز پیوسته (cc/s) ۵/۴ و دبی فاز پراکنده (cc/s) ۴/۴ بود. همچنین در طول آزمایشات دما ثابت فرض شد.

آزمایشات در دو حالت بدون انتقال جرم و با انتقال جرم (از فاز پیوسته به فاز پراکنده و بلعکس) در دو غلظت ۳٪ و ۵٪ وزنی استن انجام گردید.

برای راه‌اندازی اولیه ستون به شرح زیر عمل می‌شد:

ستون را به وسیله سیال سنگین (فاز پیوسته) پر شده و اجازه داده می‌شد تا سیال سنگین تا محل تقریبی جدایش فازها پیش رود.

با تنظیم دامنه و فرکانس، سیستم ضربه راه‌اندازی می‌شد. چون ایجاد ضربه بوسیله پالس هوا است با تنظیم فرکانس باز و بسته شدن شیرهای مربوط به هوا، فرکانس و با تنظیم فشار ورودی هوا، دامنه تنظیم می‌شد.

پمپ فاز سبک (پراکنده) و فاز سنگین را راه‌اندازی کرده و دبی آنها تنظیم می‌شد.

پس از گذشت زمان لازم جهت رسیدن به شرایط یکنواخت، سیستم مورد بررسی قرار می‌گرفت.

جدول (۲): مشخصات سیستمهای استفاده شده در آزمایشات

SYSTEM		μ_c	μ_d	ρ_c	ρ_d	γ
Cont.	Disp.	mPa.s	mPa.s	$Kg.m^{-3}$	$Kg.m^{-3}$	$mN.m^{-1}$
Water	Kerosene	۱/۰۰۲	۱/٦۷	۹۹۸	۸۰۰/۸	٤٤
Water	Toluene	۱/۰۰۲	۰/۵۸۷	۹۹۸	۸٦۵/۸	۳۵/٤

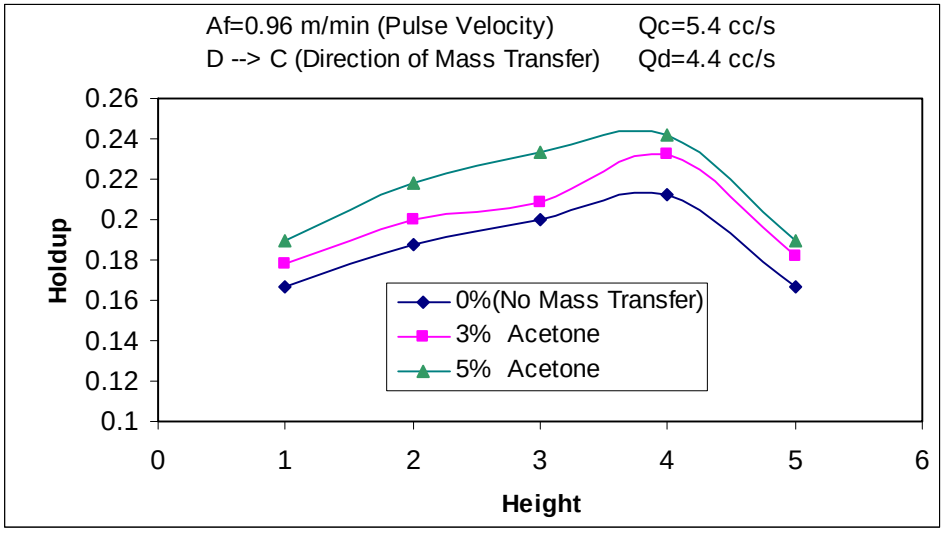
نتایج و بحث

همانطور که از شکل‌ها مشخص است به عنوان یک روند کلی، با افزایش ارتفاع موجودی فاز پراکنده زیاد می‌شود. در پایین برج قطر قطرات بزرگ است. همینکه قطرات در ستون بخاطر نیروی شناوری(Buoyancy) بالا می‌روند، شکستن قطرات رخ می دهد و قطر قطرات کاهش می یابد[۵]. انتقال جرم تاثیری بر روند کلی سیستم (افزایش موجودی فاز پراکنده در طول ستون) تاثیری ندارد. البته موجودی فاز پراکنده در نقطه آخر نمونه‌گیری (نقطه ۵ در اشکال) کاهش

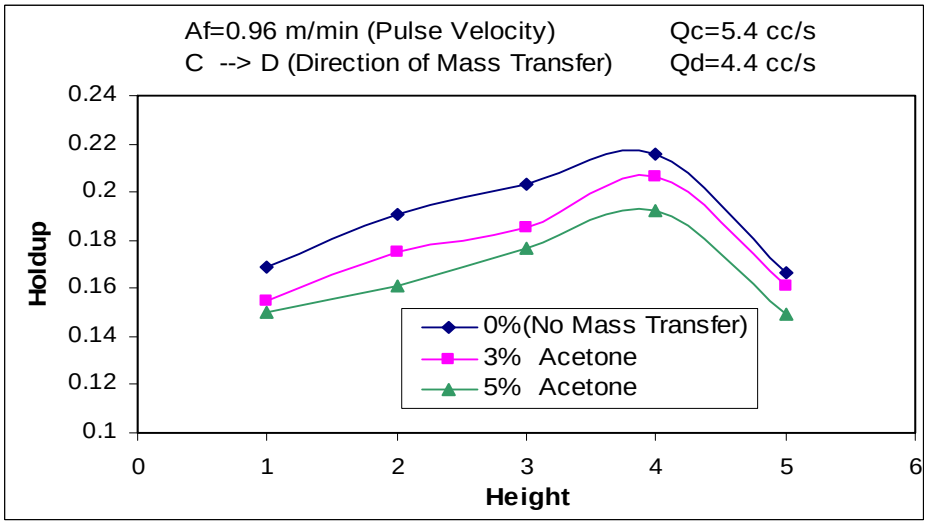
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

می‌یابد. علت این امر این است که در بالای برج فضایی وجود دارد که خالی از آکنه است لذا در بالای برج قطرات به راحتی صعود می‌کنند و در نتیجه موجودی کاهش می‌یابد.

هنگامی که انتقال جرم از فاز پیوسته به فاز پراکنده(شکل۲) باشد، به علت شکستن بیشتر قطرات(Breakage) ، قطرات کوچکتری بوجود می آیند.



شکل (۲): تاثیر غلظت بر موجودی هنگامی که انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده باشد



شکل (۳): تاثیر غلظت بر موجودی هنگامی که انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته باشد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

قطرات کوچکتر زمان ماند (Residence Time) بزرگتری دارند لذا موجودی فاز پراکنده افزایش می یابد. بلعکس هنگامی جهت انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز پیوسته باشد، نرخ به هم پیوستن قطرات(Coalescence) افزایش و لذا قطرات بزرگتری بوجود می آید و موجودی کمتر می شود.[۹،۸]

وقتی دو قطره در مجاور هم و انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز پیوسته باشد، غلظت فیلم مایع بین دو قطره سریعاً با قطرات به تعادل می رسد. این پدیده گرادیان کشش سطحی بوجود می آورد که جریان سطحی بوجود می آورد. افزایش امکان جابجایی فصل مشترک به علت جریان سطحی، فاز پیوسته بین دو قطره را به هم می چسباند و به هم پیوستگی افزایش می‌یابد اگر چه به علت کشش سطحی کم شکستن قطرات وجود دارد ولی به هم پیوستن قطرات غالب است و باعث می‌شود قطر قطرات زیاد شود تا زمانی که به هم بچسبند؛ لذا قطرات بزرگتری با سرعت صعود بیشتر بوجود آمده ودر نتیجه نسبت به حالت بدون انتقال جرم موجودی فاز پراکنده کمتر می‌شود. بلعکس هنگامی که جهت انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده باشد (شکل ۲)، موجودی فاز پراکنده بیشتر می‌شود. این مورد به دلیل غلبه میزان شکستن قطرات بر بهم‌پیوستن قطرات می‌باشد، لذا قطرات کوچکتری با سرعت صعود کمتر بوجود آمده ودر نتیجه نسبت به حالت بدون انتقال جرم موجودی فاز پراکنده بیشتر می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

۱) به عنوان یک روند کلی موجودی فاز پراکنده با افزایش ارتفاع زیاد می‌شود.

۲) هنگامی که جهت انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده باشد، موجودی فاز پراکنده بزرگتر خواهد شد.

۳) هنگامی که جهت انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته باشد، موجودی(Holdup) فاز پراکنده، کوچکتر خواهد شد.

۴) با افزایش غلظت جزء منتقل شونده در فاز پراکنده, موجودی زیاد و بلعکس با افزایش غلظت جزء منتقل شونده در فاز پیوسته موجودی کم می‌گردد.

منابع

[1] C. Tsouris, V. I. Kirou, and L. L. Tavlarides, "Drop Size Distribution and Holdup Profiles in a Multistage Extraction Column", AICHE J. vol. 40, No. 3, 407 (1994).

[2] G. V. Potnis, H. C. Bijawat, and L. K. Doraiswamy, "Upping Column Extraction Efficiency by Pulse Application – Packed column" , Ind. Eng. Che. Vol. 51, No.5, 645 (1959).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

[3] A. J. Simons, "Pulsed Packed Columns" Handbook of Solvent Extraction", Chap.11.1, 343 (1983).

[4] Ph. A. Schweitzer, "Pulsed Packed Columns", Handbook of Separation Technology for Chemical Engineering, sec.1.10.

[5] J. C. Godfery, and M. J. Slater, "Pulsed Packed Columns", Liquid-Liquid Extraction Equipment, chap.8, 241 (1994).

[6] A. Kumar, and S. Hartland, "A Unified Correlation for the Prediction of Dispersed Phase Holdup in Liquid-Liquid Extraction Columns", Ind. Eng. Chem. Res. Vol.34, No.11, 3925 (1995).

[7] M. H. I. Baird, and Z. J. Shen "Holdup and Flooding in Reciprocating Plate Extraction Columns", Can. J.Chm. Eng., Vol.62, 218 (1984).

[8] Wolfgang Pietzsch, Eckhart Blass, Chem. Eng. Tech., No.10,78 (1987).

[9] J. C. Bonnet, and L. L. Tavlarides, "Ultrasonic Technique for Dispersed Phase Holdup Measurements", Ind. Eng. Chem. Res. Vol.26, 811 (1987).

[10] J. Yi, and L. L. Tavlarides, "Model for Holdup Measurement in Liquid Dispersion Using an Ultrasonic Technique", Ind. Eng. Chem. Res., Vol.29, No.3, 475 (1990).

[11] N. I. Gel'perin, V. L. Pebalk, T. G. Chicherina, "Investigation of a pulsating packed extraction column", Int. Chem. Eng., Vol.3, No.3, 365 (1963).

[12] V. Khemangkorn J. Molinier and H. Angelino," Influence of mass transfer direction on efficiency of a pulsed perforated plate column", Chem. Eng. Sci., Vol.33, 501 (1978).

[13] D. Venkatanarasaiah, Y. B. G. Varma, "Dispersed Phase Holdup and Mass Transfer in Liquid Pulsed Column", Bioprocess Eng., Vol.18, 119 (1998) 16.

[14] M. N. Spaay, A. J. F. Simons, and G. P. Ten Brink, "Design and Operation of a Pulsed Packed Column for Liquid-Liquid Extraction", Proce. Int. L-L Ext., Vol.44, 281 (1955).

[15] Y. Jie, and F. Weiyang, "Hydrodynamics and Mass Transfer in a Pulsed Packed Column", Can. J. Chem. Eng., Vol.78, December 2000.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]