

بررسی و مروری بر افزایش مقیاس در برج‌های تقطیر دیوار میانی

مرتضی زیودار*^۱، رهبر رحیمی^۱، محمود همتی^۲

^۱ استاد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

نوع مقاله: مروری

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶

چکیده

ستون‌های تقطیر دیوار میانی یا DWC یک فناوری جداسازی جدید در زمینه افزایش بهره‌وری است که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری می‌شود. این نوع برج‌ها برای جداسازی ترکیبات سه‌جزئی و بیش‌تر، مانند هیدروکربن‌ها، الکل‌ها، آلدهیدها، کتون‌ها، استون‌ها و آمین‌ها کاربرد دارد. به‌علاوه این نوع ستون‌ها در فرآیندهای تقطیر واکنشی، استخراج و آزنوتروپیک استفاده می‌شود. افزایش مقیاس، راه‌اندازی و بهره‌برداری موفق یک واحد تجاری، همچنین امکان‌پذیری، طراحی، بهینه‌سازی و کاهش ریسک مستلزم وجود پایلوت است. مرور و بررسی انجام شده نشان داد که ستون‌های دیوار میانی در مقایسه با برج‌های سری، می‌توانند ۲۰٪ در هزینه‌های سرمایه‌گذاری تجهیزات و ۳۰٪ در انرژی صرفه‌جویی کنند. اغلب پایلوت‌های مورد مطالعه دارای قطر بین ۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر و حداکثر ارتفاع ۱۲ متر هستند. مهم‌ترین نکات در طراحی و ساخت DWC تقسیم بخار، موقعیت دیوار، تعداد مراحل تعادلی، ارتفاع و قطر برج است.

کلمات کلیدی: برج تقطیر دیوار میانی، افزایش مقیاس، طراحی و بهینه‌سازی، کنترل

۱- مقدمه

در قرن حاضر آگاهی نسبت به محیط‌زیست و همچنین فشار قانون‌گذاران در جهت بهبود بهره‌وری انرژی با اتخاذ فناوری‌های سبز افزایش یافته است. لذا توسعه و بهبود فرآیندهای شیمیایی به‌طوری‌که کارآمدتر و پایدارتر و سازگار با محیط‌زیست باشد، امری ضروری است. برای ارائه یک مدل اساسی موفقیت‌آمیز به‌منظور افزایش بهره‌وری فرآیند و همچنین فناوری شیمیایی سبز و پایدار، ناگزیر به توسعه نوآورانه در مهندسی نیاز است. طراحی تجهیزات جهت افزایش کارایی و همچنین کاهش چشم‌گیر حجم کارخانه بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر توسط جایگزین کردن واحد جدید به‌جای واحدهای متداول و قدیمی یا ترکیب دو یا چند واحد در یک واحد از اهداف افزایش بهره‌وری فرآیند است [۱]. تقطیر به‌طور گسترده‌ای برای جداسازی مخلوط‌ها در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیندی با مصرف انرژی بالا است، به‌طوری‌که تقریباً ۴۰٪ کل انرژی مصرفی در صنایع مربوط به این عملیات است. همچنین تقطیر بازده کم ترمودینامیکی بین ۵٪ تا ۱۰٪ را دارد [۲]. برای حل این مشکلات، انتگراسیون حرارتی^۱ یا کوپل حرارتی^۲ به‌عنوان یک روش مؤثر که هدف آن بهبود بازده ترمودینامیکی است ارائه شده است. به‌طورمعمول انتگراسیون گرمایی به دو دسته انتگراسیون حرارتی داخلی و خارجی طبقه‌بندی می‌شود. نوع اول شامل انتگراسیون حرارتی ستون تقطیر و برج تقطیر دیوار میانی^۳ (زوج گرمایی) و نوع دوم شامل متراکم سازی مجدد بخار، سیکل بسته تراکم و پمپ گرمایی جذبی است [۳]. این نوع برج متشکل از یک پوسته لوله‌ای بوده که توسط یک دیواره از درون به دو قسمت تقسیم شده، که قادر به جداسازی مخلوط‌های سه یا چند جزئی به محصولاتی با خلوص بالا است. در مقایسه با ستون‌های معمولی، برج تقطیر دیوار میانی به انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری و فضای بسیار کم‌تری نیاز دارد. این امر باعث شده که ستون‌های تقطیر دیوار میانی مطابق با ایده امروزی در زمره فرآیندهای فناوری‌های پایدار قرار گیرد [۳]. این نوع برج‌ها برای جداسازی ترکیبات سه‌جزئی و بیش‌تر، مانند هیدروکربن‌ها، الکل‌ها، آلدهیدها، کتون‌ها، استون‌ها و آمین‌ها کاربرد داشته، به‌علاوه این نوع ستون‌ها در فرآیندهای تقطیر واکنشی، استخراج و آزن‌تروپیک استفاده می‌شود [۴]؛ بنابراین DWC برای جداسازی مایعات گاز طبیعی، صنایع پتروشیمی، مخصوصاً صنایع شیمیایی و بیوشیمیایی کاربرد دارد [۵]. ایده طراحی و ساخت برج دیوار میانی توسط رایت^۴ در سال ۱۹۴۹ منتشر شد. پیچیدگی طراحی، شاید ارزان بودن انرژی باعث شد که ۳۵ سال بعد در سال ۱۹۸۵ شرکت BASF اولین برج تقطیر دیوار میانی را به بهره‌برداری برساند. بیست سال بعد حدود ۸۰٪ در صد DWC در سراسر دنیا توسط این شرکت راه‌اندازی شد [۶ و ۷]. گزارش شده در سال ۲۰۱۰ تعداد ۱۲۵ برج دیوار میانی در سطح دنیا فعال بوده که از این تعداد ۱۱۰ مورد مربوط به جداسازی مخلوط سه‌جزئی و دیگر موارد مربوط به جداسازی ترکیبات بیش‌تر از سه‌جزئی بوده و بیش‌تر آن‌ها توسط شرکت مذکور طراحی و ساخته شده است. در سال ۲۰۱۵ تعداد این نوع برج‌ها به بیش از ۳۵۰ عدد افزایش یافت. مراحل تعادلی این نوع ستون‌ها از نوع سینی‌دار و یا آکنه‌دار بوده است. قطر ستون‌های طراحی شده توسط این شرکت بین ۰/۶ تا ۴ متر بوده و بزرگ‌ترین برج در مقیاس صنعتی به ارتفاع ۱۰۷ متر و قطر ۵ متر مربوط به شرکت ساسول^۵ در آفریقای جنوبی است [۸ و ۹]. با توجه به این‌که در حال حاضر بیش از ۴۰۰۰۰۰ برج

¹ Heat integration

² Thermal coupling

³ Dividing wall column

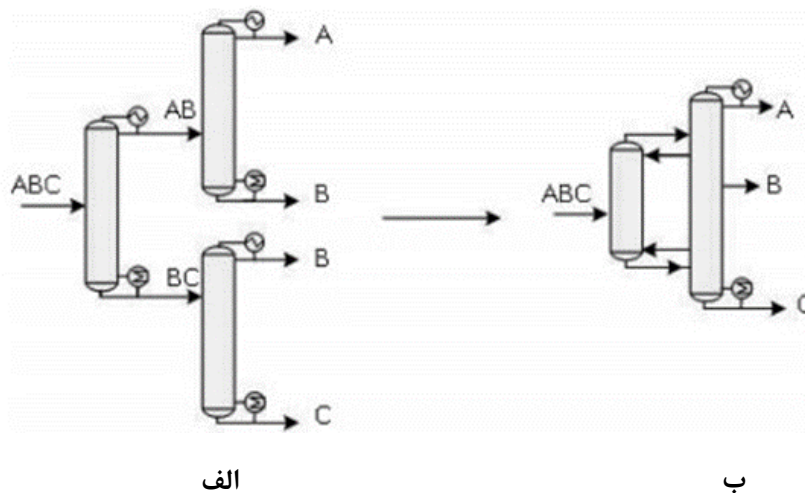
⁴ Wright

⁵ Sasol

تقطیر در دنیا ساخته شده است، اما سهم این فناوری خیلی پایین است. علت اصلی این امر پیچیدگی در کنترل، تقسیم بخار و مایع در این نوع برج‌ها است. در این پژوهش به مروری در زمینه طراحی، کنترل و بهینه‌سازی برج‌های دیوار میانی در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت، همچنین پارامترهای کلیدی در زمینه افزایش مقیاس پرداخته شده است.

۱-۱ مبانی عملکرد برج‌های DWC

اصطلاح DWC به‌عنوان ستون دیوار میانی معرفی شده زیرا قسمت میانی ستون توسط دیوار به دو قسمت تقسیم می‌شود. به‌طور معمول خوراک به یک سمت دیواره پمپ می‌شود. در شکل (۱-الف) برج اول سازنده A و C را به‌طور کامل از هم جدا می‌کند و سازنده B بین محصول بالایی و پایینی توزیع می‌شود. محصول بالایی وارد برج دوم می‌شود تا A و B از هم جدا شوند و محصول پایینی برج اول، وارد برج سوم می‌شود تا B و C از هم جدا شوند. در شکل ۱-ب در ستون‌های تقطیر زوج گرمایی، دو ارتباط متقابل میان مایع و بخار بین دو برج وجود دارد. برای مثال، برج‌های پتلیوک^۶ این‌گونه عمل می‌کنند که مخلوط سه‌جزئی ABC در ستون اول (پیش جداساز) به دو محصول دوجزئی AB در بالا و BC در پایین برج تقسیم می‌شود. بخار بالایی AB به‌عنوان خوراک به قسمت بالای برج تقطیر دوم وارد می‌شود و از این محل در ستون اصلی، مایع AB به برج اول به‌عنوان مایع برگشتی وارد می‌شود. به همین شکل مایع پایینی BC از برج اول به‌عنوان خوراک به قسمت پایین برج دوم فرستاده می‌شود و از همین مرحله برج اصلی، بخار BC به سمت برج اول به‌عنوان بخار برگشتی از جوش‌آور فرستاده می‌شود. جریان‌های رفت و برگشتی نیاز به یک جوش‌آور و یک چگالنده برای پیش جداساز را برطرف می‌سازد. در شکل ۱-الف در برج اول سبک‌ترین و سنگین‌ترین ترکیبات به‌عنوان اجزا کلیدی در ستون اول انتخاب شده‌اند. دو ستون دیگر نیز برای تولید محصول خالص مورد نیاز است. در این چینش از سه برج استفاده شده که ستون دوم و سوم هر دو وظیفه خالص‌سازی B را دارند. این آرایش به‌عنوان تقطیر توزیع شده شناخته شده است [۱۰]. شکل ۱-ب یک برج پتلیوک است که به‌جای استفاده از دو ری‌بویلر و دو کندانسور در چینش توزیع شده فقط تنها از یک کندانسور و جوش‌آور استفاده شده است. برج پتلیوک شامل دو بخش پیش جداساز و بخش اصلی است. در بخش پیش جداساز دو جریان برگشتی مایع و بخار به ترتیب از بالا و پایین وارد این ستون شده که باعث کاهش مصرف انرژی ۲۰٪ تا ۳۰٪ می‌شود.

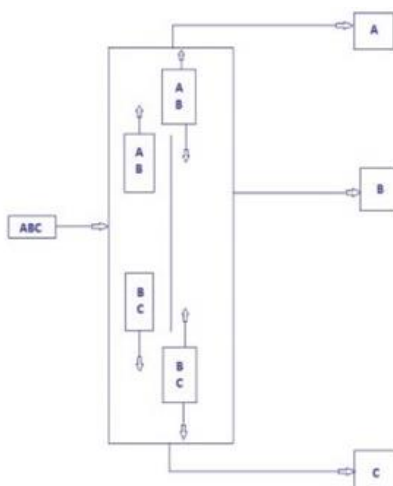


شکل ۱- شمای برج‌های تقطیر؛ الف- چینش توزیع شده ب- برج تقطیر زوج گرمایی، پتلیوک [۱۰]

⁶ Petlyuk

باین حال طراحی و عملکرد برج پتلیوک به دلیل فعل و انفعالات گرمایی قوی بین دو ستون دشوار بوده، لذا به جای داشتن یک بخش جداساز خارجی یک دیواره داخلی بین پوسته اصلی نصب شده و برج را به دو قسمت تقسیم کرده است، این نوع طراحی برج تقطیر دیوار میانی نامیده می‌شود. جداسازی مخلوط سه جزئی در ستون‌های دیوار میانی مانند برج پتلیوک است. در جریان پایین سینی خوراک مقدار سازنده A خیلی اندک است، همین‌طور در جریان بالای سینی خوراک مقدار سازنده C خیلی کم است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، انتقال جرم میان سازنده‌های A و B به سمت بالای برج و B و C به سمت پایین برج است. در قسمت پایین برج بعد از این که دیوار جداکننده به پایان رسید، B اجازه می‌یابد در طرف دیگر جداره به سمت بالا حرکت کند. بعد از جدا شدن B، سازنده C از پایین ستون خارج می‌شود. به‌طور مشابه در بالای سینی خوراک، نبودن دیواره به سازنده B این اجازه را می‌دهد که به سمت پایین حرکت کند و بعد از جداسازی، سازنده A از بالای برج خارج شود. در مرحله‌ای از برج که غلظت سازنده میانی بیشینه است، سازنده B به‌عنوان محصول میانی از برج خارج می‌شود [۱۱].

ستون‌های تقطیر دیوار میانی کاملاً از نظر ترمودینامیکی با پیکربندی پتلیوک برابر هستند. علت کارایی این ستون‌ها بازده بالای ترمودینامیکی، کاهش مصرف انرژی و از همه مهم‌تر جلوگیری از اختلاط دوباره محصول با خوراک است.



شکل ۲- عملکرد جداسازی اجزا در برج تقطیر دیوار میانی [۱۱]

۲- طراحی و مدل‌سازی ستون‌های تقطیر دیوار میانی

اولین کاربرد صنعتی DWC توسط BASF در سال ۱۹۸۵ به ثبت رسید. پیش‌بینی می‌شود تا ۵۰ سال آینده ستون‌های تقطیر دیوار میانی یکی از ابزارهای محبوب تقطیر شوند [۱۲]. بهینه‌سازی طراحی ستون‌های تقطیر دیوار میانی نیازمند مدل‌سازی و شبیه‌سازی رایانه‌ای است. باین حال، هیچ بسته‌ای برای شبیه‌سازی این ستون‌ها در شبیه‌سازهای تجاری وجود ندارد. در یک روش طراحی اولیه برج دیوار میانی بر اساس معادله فنسک^۷، آندروود^۸، گلیند^۹ و کرکبری^{۱۰} ارائه شده که معادله فنسک حداقل تعداد مراحل، معادله آندروود حداقل نسبت جریان برگشتی و معادله گلیند مراحل مورد نیاز در نسبت جریان برگشتی انتخاب شده را مشخص می‌کند و در نهایت معادله کرکبری

⁷ Fenske

⁸ Underwood

⁹ Gilland

¹⁰ Kirkbride

سینی خوراک را تعیین می‌کند. در این مدل، فراریت نسبی و جریان مولی را ثابت فرض می‌کنند. این روش، محاسبات را نسبتاً ساده کرده و برای مخلوط‌هایی با هر تعداد از اجزا قابل استفاده است [۱۳]. دیاگرام V_{min} یک روش گرافیکی ساده است که توسط هالورسن^{۱۱} و اسکوجستاد^{۱۲} پیشنهاد شده است. این روش به وسیله نرم‌الیزه کردن جریان بخار، حداقل انرژی به دست می‌آید. که؛ کهالیزه کردن جریان بخار تابع توزیع خوراک است. پایه این روش نیز بر اساس معادله آندروود است. پارامترهای مورد نیاز برای این روش عبارت‌اند از ترکیب خوراک، k -value و خلوص محصولات مورد نیاز یا بازیابی است، که س از استفاده از معادله آندروود می‌توان V_{min} را مشخص کرد [۱۴ و ۱۰]. اگر انتقال حرارت دیواره در DWC نادیده گرفته شود معادل با برج پتلیوک است [۱۵].

۳- ساختار پایلوت پلنت

هنگام توسعه فرآیند شیمیایی، باید برخی عملیات افزایش مقیاس^{۱۳} بر روی یک پایلوت انجام شود تا امکان تجاری کردن آن مورد تأیید قرار گیرد. پایلوت پلنت یک مرحله در فازهای متوالی توسعه فرآیند است که طی آن، اطلاعات آزمایشگاهی حاصله، به پارامترهای طراحی برای واحد صنعتی تبدیل می‌شوند. بر این مبنا پایلوت مجموعه‌ای خواهد بود از تجهیزات آزمایشگاهی دارای اندازه‌های میانی که هر چند پیچیدگی، اندازه و زمان عملیات آن‌ها متفاوت است، ولی روشی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر برای مدل‌سازی فرآیند و کسب اطلاعات بیشتر است. بدین ترتیب پایلوت موجب به حداقل رساندن ریسک و زیان‌های اقتصادی در واحد تجاری اصلی می‌گردد.

۳-۱- طراحی و ساخت پایلوت پلنت

ساخت پایلوت در مقیاس آزمایشگاهی یا صنعتی وابسته به میزان جداسازی ترکیبات است؛ بنابراین هرچه سطح تماس بخار-مایع و زمان بیش‌تر جهت انتقال جرم وجود داشته باشد، جداسازی با خلوص بالاتری انجام می‌گیرد. لذا در این خصوص مهم‌ترین پارامتر در طراحی ستون تقطیر قطر برج و تعداد مراحل تعادلی است. با افزایش قطر برج و تعداد مراحل تعادلی نتایج دقیق‌تر و به‌طور قطع هزینه سرمایه‌گذاری نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق نشان داده خواهد شد که پژوهشگران به‌منظور طراحی، بهینه‌سازی و امکان‌سنجی فرآیند DWC علاوه بر شبیه‌سازی و مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار از پایلوت پلنت نیز استفاده نموده‌اند. بیش‌تر این پایلوت‌ها از نوع آکنه‌دار بوده و قطر این نوع ستون‌ها بین ۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر گزارش شده است.

بهینه‌سازی، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و انرژی مصرفی از اهداف اصلی به‌کارگیری برج تقطیر دیوار میانی است. در این خصوص چانلی^{۱۴} و همکاران به بررسی جداسازی یک مخلوط سه‌جزئی شامل اتانول (A)، n-پروپانول (B) و n-بوتانول (C) پرداخته‌اند. در این کار ابتدا به‌منظور دستیابی به تعداد مراحل واقعی، شرایط ترمودینامیکی و عملیاتی این فرآیند جداسازی از بسته نرم‌افزار شبیه‌ساز Aspen Plus برای انجام یک شبیه‌سازی حالت پایا و بهینه استفاده کرده‌اند. معادله ترمودینامیکی مورد استفاده در این شبیه‌سازی مدل ویلسون^{۱۵} در نظر گرفته شده است. همچنین در این پژوهش ابتدا با روش میانبر و با استفاده از سه برج تقطیر از نوع DSTWU، ساختار و شرایط عملیاتی اولیه به

¹¹ Halvorsen

¹² Skogestad

¹³ Scale-up

¹⁴ Chunli

¹⁵ Wilson model

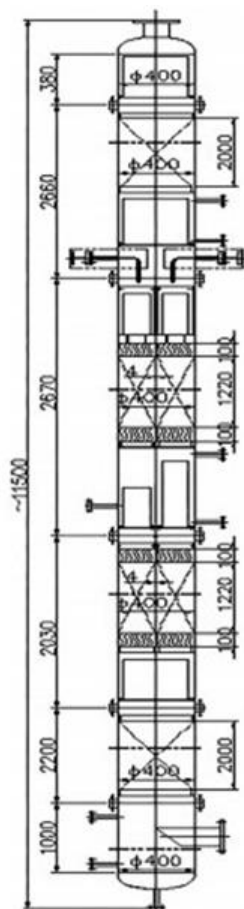
دست آورده شده و سپس با کمک داده‌های به‌دست آمده برج پتلیوک که معادل با برج تقطیر دیوار میانی است، شبیه‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی و امکان‌سنجی فرآیند از یک مدل آزمایشگاهی DWC استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده این برج دارای ارتفاع ۱۱۵۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۰۰ میلی‌متر بوده و از این دستگاه DWC پیشرفته، برای انجام آزمون‌های پایلوت استفاده شده است. سپس شبیه‌سازی بر اساس تعداد مراحل واقعی این دستگاه DWC مطابقت داده شده و درنهایت، داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردیده است. در ادامه روش پاسخ سطح^{۱۶} برای به‌دست آوردن پارامترهای بهینه انتخاب کرده‌اند. نتایج نشان داده است که DWC نسبت به CDS^{۱۷} می‌تواند ۲۵/۴۳٪ بازده ترمودینامیکی و ۳۳/۳۹٪ ذخیره در مصرف انرژی را تضمین کند. همچنین موجب کاهش ۲۸/۷۳٪ در کل هزینه سالانه می‌گردد [۱۶].

در سال ۱۳۹۷ اولین برج تقطیر دیوار میانی ایران در دانشگاه سیستان و بلوچستان توسط رحیمی و همکاران به ثبت رسید. این برج از نوع سینی‌دار بوده و دارای قطر ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ متر است. لواسانی و همکاران با استفاده از این برج به‌صورت آزمایشگاهی و دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۸} انواع ناودان‌های سینی برج تقطیر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی از نظر افت فشار و پیش‌بینی تلاطم بخار-مایع روی سینی مطابقت خوبی وجود دارد. علاوه بر این مشخص کردند طراحی ناودان نقش کلیدی در هیدرو دینامیک سینی ایفا می‌کند [۱۷].

¹⁶ RSM

¹⁷ Conventional distillation sequence

¹⁸ Computational fluid dynamics



شکل ۳- جزئیات پایلوت پلنت DWC [۱۶]

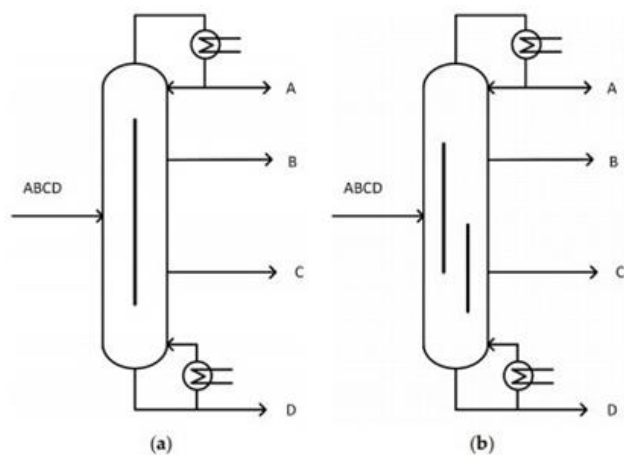
در جدول ۱ خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در ستون‌های تقطیر دیوار میانی در مقیاس پایلوت با جزئیات قطر و ارتفاع و آکنه‌های مورد استفاده و برخی نکات کلیدی نشان داده شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مهم‌ترین مقالات ستون‌های پایلوت تقطیر دیوار میانی

نویسنده	نوع پایلوت	ترکیب شیمیایی	قطر میلی‌متر	ارتفاع متر	نوع پکینگ
Chunli [۱۶]	DWC	Ethanol, n-propanol, n-butanol	۴۰۰ میلی‌متر	۱۱/۵۰ متر	Sulzer DX
Melisa [۱۸]	DWC	2-methylpentane (2MP), cyclohexane (C6), toluene (Tol), m-xylene (mX)	۱۵۲/۴ میلی‌متر	۱۰/۶۶ متر	Mellapak 500Y
Ulrich Preißinger [۱۹]	DWC	Methyl acetate, Butanal, Propanol, Isobutanol	۵۰ میلی‌متر	۹/۸ متر	Montz-Pak A3-1000
Gerit Niggemann [۲۰]	DWC		۶۸ میلی‌متر	۳/۹۲ متر	Montz B1-500
Rouzineau [۲۱]	DWC	methanol, 1-propanol and 1-butanol	۸۰ میلی‌متر	۵/۵۳ متر	Sulzer
Mutalib [۲۲][۲۳][۲۴]	DWC	Methanol, Iso-Propanol, Butanol	۳۶۵۷ میلی‌متر	۱۰/۹۷ متر	Gempak 4A
Fieg [۲۵][۲۶][۲۷][۲۸]	DWC	n-hexanol, n-octanol, n-decanol	۷۹۲ میلی‌متر	۱۱/۸۸ متر	Montz B1-500

از آنجا که مهم‌ترین موضوع در برج‌های دیوار میانی تقسیم بخار است، ملیسا^{۱۹} و همکاران به منظور جداسازی چهار ترکیب و امکان‌سنجی کنترل فرآیند و بررسی خلوص جداسازی از یک پایلوت DWC به قطر ۱۵۲/۴ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰/۶۶ متر به‌عنوان یک برج جداساز برای ترکیبات چندجزئی به‌عنوان یک فناوری جایگزین برج‌های تقطیر متداول استفاده نموده‌اند. نویسندگان پس از بهینه‌سازی پیشنهاد کرده‌اند که اگر ۵۰٪ از جریان بخار به سمت پیش جداساز و ۵۰٪ دیگر به سمت قسمت اصلی برج هدایت شود، باعث می‌شود که برخی از ترکیبات با نقطه‌جوش میانی اطراف دیواره دور زده که باعث کاهش مصرف انرژی می‌گردد [۱۸].

در مطالعه‌ای دیگر اولریچ^{۲۰} و همکاران برای جداسازی چهار ترکیب از یک مدل ساده از ستون چند دیواری به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹/۸ متر در دانشگاه اولم^{۲۱} استفاده کردند. برج‌های تقطیر با چند دیوار^{۲۲} که بیش‌تر از یک دیوار دارند، یک نوع تکامل یافته برج دیوار میانی است که امکان جداسازی چندین محصول را فراهم می‌کند. هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX)^{۲۳} و هزینه‌های عملیاتی (OPEX)^{۲۴} نسبت به برج‌های تقطیر به‌صورت متوالی به‌شدت کاهش می‌یابد. پیچیدگی برج‌های تقطیر با چند دیوار در مقایسه با DWC به دلیل وجود دیواره‌های زیاد و افزایش درجه آزادی از ۱۲ به ۲۳ بیشتر می‌شود. در این بررسی نشان داده شده که یک منحنی NQ^{۲۵} می‌تواند بر روی ستون‌های دیواره میانی چندگانه ساده شده اعمال شود. بر اساس نقاط عملیاتی تعیین شده، ترمودینامیک و طراحی دینامیکی جریان سیال این پایلوت پلنت نشان داده شده است که می‌توان ستون طراحی شده را به کار انداخت و تمام محصولات را با خلوص حداقل ۹۸ درصد مولی به‌دست آورد [۱۹].



شکل ۴- برج تقطیر با چند دیواره [۱۹]

گریت^{۲۶} و همکاران رفتار فرآیند برج‌های تقطیر دیوار میانی در حالت پایا با استفاده از یک پایلوت پلنت به قطر ۶۸ میلی‌متر مورد مطالعه دقیق قرار دادند. در این کار، مخلوط سه‌جزئی از الکل‌های چرب با مشخصات محصول ۹۹

¹⁹ Melisa

²⁰ Ulrich

²¹ Ulm

²² Multiple dividing wall column

²³ Capital expenditures

²⁴ Operational expenditures

²⁵ NQ curve

²⁶ Gerit

درصد وزنی در شرایط پایا مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مطابقت بسیار خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای افت فشار، ترکیبات محصول و پروفایل دما وجود داشته است [۲۰].

در سال ۲۰۱۶ روزنیو^{۲۷} و همکاران به‌منظور جداسازی یک مخلوط سه‌جزئی متانول، پروپانول و بوتانول از یک پایلوت به قطر ۸۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵/۵۳ متر استفاده کردند. بین داده‌های تجربی به‌دست آمده از برج و شبیه‌سازی، تطابق قابل قبولی گزارش شده است. در این مطالعه پارامترهای ساختاری DWC، موقعیت دیواره، تعداد مراحل تعادلی، ارتفاع و قطر برج در نظر گرفته است [۲۱].

مطالعه‌ای در مورد مدل دینامیکی این نوع برج‌ها توسط جوگلکار^{۲۸} و همکاران به‌منظور جداسازی یک ترکیب سه‌جزئی جهت تعیین عملکرد بهینه این نوع برج توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده است. [۲۹]. در پژوهش دیگر لواسانی و همکاران جهت بهینه‌سازی فرایند جداسازی یک ترکیب سه‌جزئی الکل و مشخص نمودن پارامترهای عملیاتی مؤثر و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها از روش پاسخ سطح استفاده کرده‌اند [۳۰]. درزمینه هیدرودینامیک این نوع برج‌ها نیز مطالعاتی انجام شده به‌عنوان نمونه رودریگرز^{۲۹} و همکاران مطالعه‌ای بر روی هیدرودینامیک سینی غربالی برج دیوار میانی انجام دادند. رابطه بین قطر برج، تعداد و اندازه قطر سوراخ‌ها و ارتفاع بند و تأثیر این پارامترها بر روی افت فشار خشک، ارتفاع مایع زلال و میزان کف را بررسی کردند [۳۱].

همان‌طور که در این بخش ملاحظه شد هدف پژوهشگران از راه‌اندازی برج DWC کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، انرژی و افزایش بهره‌وری فرآیند است. در این پژوهش‌ها علاوه بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی رایانه‌ای از پایلوت پلنت DWC به‌منظور اعتبارسنجی کار خود استفاده کرده‌اند. اکثر این پایلوت‌ها از نوع آکنه‌دار بوده و قطر این برج‌ها بین ۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر و حداکثر ارتفاع ۱۲ متر گزارش شده است.

۴- کنترل برج تقطیر دیوار میانی

راجارامان^{۳۰} و همکاران یک تکنیک کنترل ساده مبتنی بر ساختار متمرکز و غیرمتمرکز برای درجه حرارت سینی با فشار ایجاد شده در داخل برج برای یک ستون تقطیر دیوار میانی در مقیاس آزمایشگاهی به قطر ۴۰ سانتی‌متر گزارش کرده‌اند. در این کار با استفاده از شدت جریان آب خنک‌کننده کندانسور، برای کنترل فشار ایجاد شده در داخل ستون استفاده شده است. عوامل دیگری که بر فشار ستون تأثیر می‌گذارند شامل شدت جریان برگشتی، شدت جریان خوراک، شدت جریان جوشش و میزان تغییر در ترکیبات خوراک است. همچنین جریان رفلکس داخلی و سرعت بخار تحت تأثیر فشار ایجاد شده در ستون قرار گرفته که یک تعامل قوی بین دو متغیر وابسته دما و فشار به‌وجود آمده است. هدف از این پژوهش تنظیم دما و فشار سینی پایین برج تقطیر دیوار میانی به‌وسیله جریان برگشتی و شدت جریان بخار بوده است. در این تحقیق با کمک شبیه‌سازی و پایلوت پلنت نتیجه گرفته شده که بر اساس کنترل کننده غیرمتمرکز در حوزه فرکانس، حلقه بسته پاسخ دامنه زمانی بهتری ارائه می‌دهد [۳۲].

۴-۱- بهینه‌سازی فرآیند

²⁷ Rouzineau

²⁸ Juglekar

²⁹ Rodriggerz

³⁰ Rajaraman

در مطالعه‌های یانینگ^{۳۱} به کمک نرم‌افزار Aspen Plus و Aspen dynamics در حالت پایا برج DWC و برج CDS را با تعداد مراحل مساوی و ترکیبات شیمیایی برابر شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کرده است. همچنین از روش SQP^{۳۲} جهت بهینه‌سازی و به حداقل رساندن انرژی مورد نیاز ری‌بویلر و کندانسور استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که در مقایسه بین این دو نوع برج، انرژی مورد نیاز و هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه به ترتیب ۴۷/۶۰٪ و ۳۵/۴۰٪ کاهش یافته است [۳۳].

در پژوهشی دیگر چانلی^{۳۳} با استفاده از روش RSM^{۳۴} جهت بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی پایلوت پلنت برج DWC استفاده کرده است. استفاده از این تکنولوژی ضمن افزایش بازدهی ترمودینامیکی باعث کاهش قابل توجه هزینه سرمایه‌گذاری و انرژی شده است [۱۶].

۵- معیارهای افزایش مقیاس در پایلوت برج تقطیر دیوار میانی

پایلوت، یک واحد نمونه کوچک است، به منظور بررسی و مطالعه یک فرآیند ناشناخته و کسب نتایج تجربی بر روی یک فرآیند جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی و ساخت واحدهای صنعتی بزرگ بدون تجربه کافی می‌تواند خسارت زیادی به همراه داشته باشد، پایلوت پلنت‌ها جهت کسب اطلاعات فنی و مهندسی لازم برای به حداقل رساندن ریسک طراحی و ساخت واحد صنعتی به کار می‌روند. در پایلوت‌ها اطلاعات آزمایشگاهی حاصله به پارامترهای طراحی برای ایجاد یک واحد صنعتی تبدیل می‌شوند. به منظور بررسی انتقال جرم در برج دیوار میانی، لواسانی و همکاران در یک مطالعه هیدرودینامیک سینی غربالی با ناودان لوله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. استفاده از ناودان لوله‌ای ضمن جبران کاهش فضای تماس، باعث جلوگیری از چرخش و اختلاط دوباره خوراک می‌شود [۳۴]. از پارامترهای دیگر که در افزایش مقیاس بررسی می‌شود، پدیده ریزش است. برای بررسی این پدیده زارعی و همکاران آزمایش‌های خود را در یک پایلوت با قطر ۱/۲۲ متر، انجام داده و نرخ ریزش و بسیاری از پارامترهای هیدرودینامیکی را اندازه‌گیری کردند. همچنین یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی در چارچوب اوپلری- اوپلری برای بررسی پدیده ریزش ارائه دادند. این مدل می‌تواند افت فشار خشک، افت فشار کل، ارتفاع مایع زلال، ارتفاع سرکف و نرخ ریزش را به‌طور هم‌زمان پیش‌بینی کند [۳۵]. از دیگر پارامترهای ساختاری که در افزایش مقیاس در نظر گرفته می‌شود قطر سوراخ‌ها و فاصله آن‌ها است. در یک مطالعه رحیمی و مزارعی، مدل سه‌بعدی، دوفازی برای پیش‌بینی هیدرودینامیک، انتقال جرم و بازده سینی‌ها ارائه دادند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که سینی با قطر سوراخ‌های کوچک‌تر باعث یکنواختی بیش‌تر فاز مایع و بازده بالاتر می‌شود [۳۶].

۶- نتیجه‌گیری

برج تقطیر یکی از مطمئن‌ترین روش‌های جداسازی در فرآیندهای شیمیایی است. با این حال با افزایش ترکیبات جهت جداسازی به همان نسبت تعداد ستون‌ها و میزان انرژی لازم افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش هزینه سرمایه‌گذاری شده که به دلیل محدودیت منابع انرژی همچنین بالا بردن بهره‌وری و ایجاد فرآیندی سازگار با محیط‌زیست نیاز به فناوری نوین در ساخت برج تقطیر است. برای حل این مشکل تجمیع ستون‌ها مطرح شده است

³¹ Yanyang

³² Sequential quadratic programming

³³ Chunli

³⁴ Response surface methodology

که برج تقطیر دیوار میانی نامیده می‌شود. این نوع ستون‌ها قادر به جداسازی مخلوط‌های چند جزئی با خلوص بالا و مصرف انرژی بسیار کم‌تر از فرآیندهای متداول است. DWC یک فن‌آوری نوین در سیستم‌های تقطیر با کاهش مصرف انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری است. بسیاری از مطالعات بر روی صرفه‌جویی در مصرف انرژی، طراحی، بهینه‌سازی و کنترل انجام و آزمایش شده است. جایگزین نمودن این تکنولوژی نوین در ابتدا مستلزم ساخت و طراحی یک واحد کوچک در مقیاس آزمایشگاهی است. این مطالعه نشان می‌دهد در ابتدا جهت به‌دست آوردن شرایط اولیه عملیاتی، تعداد مراحل و میزان کارکرد ری‌بویلر و کندانسور استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز لازم بوده، همچنین جهت مطابقت داده‌ها، خلوص محصولات و پروفایل دمایی در طول برج نیازمند به پایلوت است. لذا غالب پژوهشگران به‌منظور اعتبارسنجی تحقیقات خود از پایلوت برج دیوار میانی استفاده کرده‌اند. این برج‌ها بیش‌تر از نوع آکنه‌دار بوده و قطر این نوع ستون‌ها بین ۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر و حداکثر ارتفاع ۱۲ متر گزارش شده است. درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که برج تقطیر دیوار میانی با کاهش هزینه سرمایه‌گذاری ۲۰٪ و انرژی ۳۰٪ با بازدهی ترمودینامیکی ۲۵٪ مناسب‌ترین روش جهت جداسازی مخلوط‌های چند جزئی است. مهم‌ترین نکاتی که باید در طراحی و ساخت برج‌های تقطیر دیوار میانی مدنظر قرار گیرد شامل: تقسیم بخار، موقعیت دیوار، تعداد مراحل تعادلی، ارتفاع و قطر برج است. این مقاله مروری بر طراحی و ساخت پایلوت پلنت دیوار میانی بوده و پارامترهای کلیدی در زمینه افزایش مقیاس را مورد بررسی قرار داده است.

منابع

- [1] K. Boodhoo, A. Harvey, Process Intensification for Green Chemistry, John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [2] F.I. Gomez-Castro, J.G. Segovia-Hernandez, S. Hernandez, C. Gutierrez-Antonio, A. Briones-Ramirez, Dividing wall distillation columns: Optimization and control properties, Chem. Eng. Technol. 31 2008, pp. 1246–1260.
- [3] A.A. Kiss, Novel applications of dividing-wall column technology to biofuel production processes, J. Chem. Technol. Biotechnol. 88 2013, pp. 1387–1404.
- [4] B. Kaibel, H. Jansen, E. Zich, Z. Olujic, Unfixed dividing wall technology for packed and tray distillation columns, Distillation & Absorption 2006, IChemE, London, England, 2006. pp. 252–266.
- [5] Harvianto. G.R, Kim.K.H, Kang.K, Optimal operation of a dividing wall column using an enhanced active vapor distributor, Chemical Engineering Research and Design 1 4 4, 2 0 1 9, pp. 512–519.
- [6] G. Kaibel, C. Miller, M. Stroezel, R. von Watzdorf, H. Jansen, Industrieller Einsatz von Trennwandkolonnen und thermisch gekoppelten Destillationskolonnen, Chem.-Ing.-Technol. 76 2004, pp. 258–263.
- [7] J.A. Brugma, Antoif Johasbr56Ma 2, 1942, 256.
- [8] Parkinson, G. Distillation: New wrinkles for an age-old technology. Chemical Engineering Progress, 101(7), 2005, pp. 10-12.
- [9] Yildirim, Ö, Kiss, A. A., & Kenig, E. Y. Dividing wall columns in chemical process industry: A review on current activities. Separation and Purification Technology, 80(3), 2011, pp. 403-417.



- [10] I. Dejanovic, L. Matijasevic, I.J. Halvorsen, S. Skogestad, H. Jansen, B. Kaibel, Z. Olujić, Designing four-product dividing wall columns for separation of a multicomponent aromatics mixture, *Chem. Eng. Res. Des.* 9, 2011, pp. 1155–1167.
- [۱۱] رحیمی ر، البرزی ا، سودمند م، زیودار م، شناختی از برج‌های دیوارمیان‌ی و تأثیر آن بر کاهش انرژی موردنیاز در فرایندهای تقطیر ماهنامه تخصصی، علمی- ترویجی- فرایند نو/ تابستان ۹۱ / شماره ۳۸.
- [12] Yanyang Wu*, Guizhi Zhang, Jianyuan Xu, Xinchuan Qu, Ze Wang, Tianyou Wang, Kui Chen, Lijun Ji. Enhanced separation of mixing diols by distillation in dividing wall column. *Chem. Eng. process: Process Intensification* 149, 2020, pp. 107859.
- [13] C. Triantafyllou, R. Smith, The design and optimization of fully thermally coupled distillation columns, *Chem. Eng. Res. Des.* 70, 1992, pp. 118–132.
- [14] I. Mueller, C. Pech, D. Bhatia, E.Y. Kenig, Rate-based analysis of reactive distillation sequences with different degrees of integration, *Chem. Eng. Sci.* 62, 2007, pp. 7327–7335.
- [15] I. Mueller, E.Y. Kenig, Reactive distillation in a dividing wall column: rate-based modeling and simulation, *Ind. Eng. Chem. Res.* 46, 2007, pp. 3709–3719.
- [16] Chunli Li, Qianlong Zh, Jiangwei X, Jing F, Hao L, Design, optimization, and industrial-scale experimental study of a highefficiency dividing wall column, *Sep. Purif. Technol.* 247, 2020, 116891.
- [17] Lavasani MS, Rahimi R, Zivdar M. Hydrodynamic study of different configurations of sieve trays for a dividing wall column by using experimental and CFD methods. *Chem Eng Process.* 2018; 129: pp. 162-170.
- [18] M.M. Donahue, M. Baldea, R. Bruce Eldridge, Steady state considerations for designing minimum energy control strategies for a dividing wall distillation column with trace components, *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 145, 2019, pp. 107641.
- [19] Ulrich P, Lena-M R, Thomas G, Design Considerations of a Simplified Multiple Dividing Wall Column Pilot Plant. *ChemEngineering*, 2019, 3, 34.
- [20] Gerit N, Christoph H, Georg F, Experimental and Theoretical Studies of a Dividing-Wall Column Used for the Recovery of High-Purity Products. *Eng. Chem. Res.* 2010, 49, pp. 6566–6577.
- [21] Trung Dung Nguyen David Rouzineau Michel Meyer Xuan Meyer. Design and simulation of divided wall column: Experimental validation and sensitivity analysis. *Chem. Eng. Process, CEP* 6764, 2016.
- [22] Mutalib, A.; Zeglam, A.; Smith, R. “Operation and control of dividing wall distillation columns. Part 1.” *Trans IChemE*, 1998, 76.
- [23] Mutalib, A.; Zeglam, A.; Smith, R. “Operation and control of dividing wall distillation columns. Part 2.” *Trans IChemE*, 1998, 76.
- [24] Mutalib, A. “Operation and Control of the Dividing Wall Column” (Doctoral dissertation), 1995
- [25] Niggemann, G.; Hiller, C.; Fieg, G. Experimental and Theoretical Studies of a DividingWall Column Used for the Recovery of High-Purity Products. *Ind. and Chem. Eng. Res.* 2010, 49, pp. 6566–6577.
- [26] Niggemann, G.; Fieg, G. “Validation of Dividing-Wall Columns Based on Experimental Data and Dynamic Simulations: Pilot-Plant and Production-Scale Columns.” *Ind. & Eng. Chem. Res.* 2012, 512, 931–43.
- [27] Niggemann, G.; Hiller, C.; Fieg, G. Modeling and in-depth analysis of the start-up of dividing-wall columns. *Chem. Eng. Sci.* 2011, 66, pp. 5268–5283.

- [28] Ehlers, C.; Egger, T.; Fieg, G. "Experimental operation of a reactive dividing wall column and comparison with simulation results," *AICHE Journal*, 2016.
- [29] G.S. Joglekar, *Dynamic Modeling and Optimization of Thermally Coupled Dividing Wall Column Batch Distillation Processes*, 2009 Spring Natl. Meet, 2009.
- [30] Lavasani.M.S, Rahimi R, Zivdar M. Response surface methodology in optimization of a divided wall column. *Korean J. Chem. Eng.*, 2018.
- [31] Rodríguez.M.A. Mechanical design and hydrodynamic analysis of sieve trays in a dividing wall column for a hydrocarbon mixture. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*.97, 2015, pp. 55-65.
- [32] J Rajaraman, T Indiran, E S Yadav, S P Selvanathan, *Modeling and Control of Tray Temperature Along with Column Pressure in a Pilot Plant Distillation Column*, *SN Computer Science*, 2020, 1:330.
- [33] Anyang W, Guizhi Z, Jianyuan Xu, Xinchuan Qu, Ze Wang, Tianyou Wang, Kui Chen, Lijun Ji *Enhanced separation of mixing diols by distillation in dividing wall column*. *Chem. Eng. Process: PI*.149, 2020, 107859.
- [34] Lavasani.M.S, Rahimi.R, Zivdar.M. Hydrodynamic study of different configurations of sieve trays for a dividing wall column by using experimental and CFD methods. *Chem Eng Process*. 2018; 129, pp. 162-170.
- [35] Hosseini, S. H., Zareia, A., Rahimi, R., *CFD and experimental studies of liquid weeping in the circular sieve tray columns*, *Chemical Engineering Research and Design*, 2013.
- [36] Rahimi, R., Mazarei. M., Bahramifar, E., *The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency*, *Chemical Engineering Science*76, 2012, pp. 90-98.