

شناختی از برج‌های دیوار میانی و تاثیر آن بر کاهش انرژی مورد نیاز در فرایندهای تقطیر

رهبر رحیمی^{۱*}، اشکان البرزی^۲، محمد حسن سودمند^۳، مرتضی زیودار^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، گرایش فرایند جداسازی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شیمی

دریافت: ۹۱/۰۴/۰۷ پذیرش: ۹۱/۰۶/۲۷

چکیده

فرایند تقطیر همچنان رایجترین روش جداسازی در فرایندهای شیمیایی است که حدود ۳٪ از کل انرژی مصرفی جهان را در بر میگیرد. از این رو روش‌های متعددی برای کاهش انرژی در فرایندهای تقطیر مورد توجه صنعت بوده است که نهایتاً به طراحی سیستم کوپل گرمایی^۱ منجر شده است. یکی از انواع چنین سیستم‌ها، برج‌های دیوار میانی^۲ نامگذاری شده است که برای جداسازی مخلوط‌های چند جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس طراحی برج‌های دیوار میانی بر مبنای سیستم‌های کوپل گرمایی بوده که با حذف برخی از تجهیزات عملیاتی، سبب کاهش ۲۰-۳۰٪ سرمایه اولیه و حدود ۲۵٪ هزینه عملیاتی می‌گردد. بنابراین می‌توان استفاده از برج‌های دیوار میانی را به عنوان یکی از بهترین روش‌ها در بهبود سازی فرایندهای شیمیایی دانست. این مقاله به معرفی برج‌های دیوار میانی، پیکربندی و انواع روش‌های طراحی و شبیه سازی این برج‌ها می‌پردازد و همچنین مثالهایی از چند کاربرد مهم آن در صنعت و مقایسه آن با دو برج معمولی را بیان میکند.

واژگان کلیدی: تقطیر، کوپل گرمایی، برج دیوار میانی، انرژی، روش طراحی میانبر

مقدمه

کاهش مصرف انرژی، بهبود در تجهیزات و فرایندهای تقطیر

اهمیت فراوان دارد.

یکی از راه‌های انتگراسیون فرایندها، کوپل گرمایی کردن ستون‌های تقطیر است. در کوپل گرمایی، اغلب یک چگالنده یا جوش آور از سیستم حذف می‌شود مانند فرایند لینده در

تقطیر در صنایع شیمیایی و پتروشیمی برای جداسازی

کاربرد وسیعی دارد. برآورد شده است که ۹۵٪ از جداسازی مایعات توسط تقطیر انجام می‌شود و حدود ۳٪ از کل انرژی‌های مصرفی در جهان مربوط به تقطیر است [۱]. از این رو در جهت

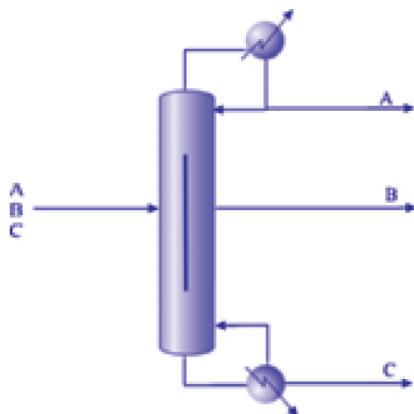
* Rahimi@hamoon.usb.ac.ir

2. Dividing-Wall Columns

1. Thermally Coupled

اصلی شده که اجزا را با خلوص بالا جدا می‌کند. میتوان با قرار دادن هر دو قسمت پیش جداساز و اصلی در یک پوسته و نصب دیواره در داخل آن، برج‌های دیوار میانی را معرفی نمود (شکل ۲).

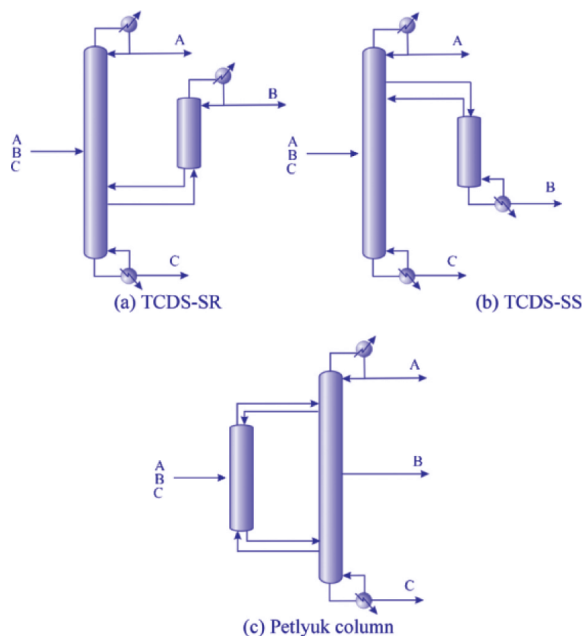
برج‌های تقطیر دیوار میانی برای نخستین بار در سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ به عنوان یک اختراع مطرح شد. از میان مخترعین، مونورو، بروگما نقش بسزائی را ایفا کردند. در جماهیر شوروی سابق، فردی بنام پتلیوک و همکارانش اقدامات بزرگی را در جهت بررسی خواص ترمودینامیکی ستون‌های کوپل گرمای انجام دادند [۴]. ایده طراحی و ساخت برج دیوار میانی توسط Wright در سال ۱۹۴۹ منتشر شد. کمبود در روش طراحی، آنالیز عملیاتی و شاید ارزیابی انرژی باعث شد که حدود ۳۶ سال بعد اولین کاربرد صنعتی این نمونه برج در سال ۱۹۸۵ در شرکت BASF انجام شود [۱]. دو سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۷ کی بل دوباره توجه همگان را به این برج‌ها معطوف کرد. در سال ۱۹۹۸ عبدالمطلب و اسمیت بر روی شبیه سازی دینامیکی و کنترل آن کارهای زیادی انجام دادند [۵]. در سال ۲۰۰۲ مورال کریشنا و همکارانش بر روی طراحی آن به نتایج زیادی دست یافتند [۶]. ویژگی منحصر به فرد این برج وجود دیواری است که فضای داخلی برج را به دو قسمت خوراک و جریان جانبی تقسیم میکند. این دیواره از اختلاط طرف خوراک و جریان جانبی جلوگیری می‌کند که این امر سبب می‌شود پدیده اختلاط در سینی خوراک و همچنین پدیده Remixing در محصول میانی از بین



شکل ۲. برج دیوار میانی

جداسازی اکسیژن و ازت از هوا. در این فرایند، چگالنده برج فشار بالا به عنوان جوش آور برج فشار پایین نیز عمل می‌کند که در نتیجه برای تولید مایع خنک‌کننده به منظور کندانس کردن بخار در چگالنده برج فشار بالا، به یک منبع خارجی نیاز نیست [۲]. در قسمت‌های کوپل گرمایی انتقال حرارتی که برای جداسازی لازم است بوسیله تماس مستقیم بین جریان‌های مایع و بخار اجزا تأمین می‌گردد مانند تقطیر آب و متانول. در این فرایند که آب به عنوان پسماند از برج خارج می‌شود، گرمای مورد نیاز در پایین برج از بخار مستقیم حاصل می‌شود که منجر به حذف جوش آور از سیستم می‌گردد [۳].

چینش برج‌های کوپل گرمایی برای جداسازی ترکیبات سه جزئی در شکل ۱ نمایش داده شده است که از میان آن‌ها برج‌های پتلیوک^۱ کاربرد بیشتری دارند. با توجه به شکل ۱-۳، خوراک سه جزئی برای یک جداسازی سریع بین جزء A و C، ابتدا وارد قسمت پیش جدا ساز می‌شود و جزء B در بالا و پایین این برج توزیع می‌شود و جریان‌های خروجی وارد برج



شکل ۱. الگوهای برج‌های تقطیر کوپل گرمایی برای جداسازی سه جزئی: (a) چینش مستقیم کوپل گرمایی، (b) چینش غیر مستقیم کوپل گرمایی، (c) برج‌های تقطیر پتلیوک

گذاری اولیه می‌شود و همچنین نشر گازهای گلخانه‌ای کاهش میابد و در نتیجه کاهش دما نیاز به آب خنک‌کننده در چگالنده را کاهش می‌دهد.

امروزه برج دیوار میانی به یک تکنولوژی پذیرفته شده تبدیل شده است که تا کنون تعدادی بالغ بر ۱۰۰ نمونه از آن در سراسر دنیا نصب شده است و در آینده ای نزدیک برج دیوار میانی در صنایع فرایند شیمیایی (CPI) به عنوان یک تقطیر استاندارد معرفی خواهد شد [۸].

مطالعات تئوری نشان داده است که به طور متوسط حدود ۳۰ الی ۵۰٪ کاهش هزینه انرژی در مقایسه با چینش‌های معمولی داریم [۹].

پیکربندی

انتخاب مناسب اجزا داخلی یک ستون عامل ضروری و مهمی برای رسیدن به بازدهی بیشتر انتقال جرم و انتقال حرارت و همچنین دستیابی به محصول خالص تر است [۸]. تفاوت عمده این نوع برج‌ها علاوه بر وجود دیوار میانی، تقسیم کننده مایع و بخار است که در پیکربندی برج نقش مهمی ایفا می‌کند.

برای جداسازی سه جزئی می‌توان دو پیکر بندی متفاوت از برج دیوار میانی را به کار برد. اولین نوع توسط Wright ارائه شد که دیوار دقیقاً در وسط برج قرار می‌گیرد که معمولاً از این نمونه استفاده می‌شود. در پیکر بندی دوم، دیواره در پایین یا بالای برج قرار می‌گیرد که این نمونه توسط Monoro در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است که هدف از آن پایداری بیشتر برج و ائتلاف انرژی کمتر برای خوراک‌های هیدروکربنی می‌باشد [۱۰] (شکل ۴).

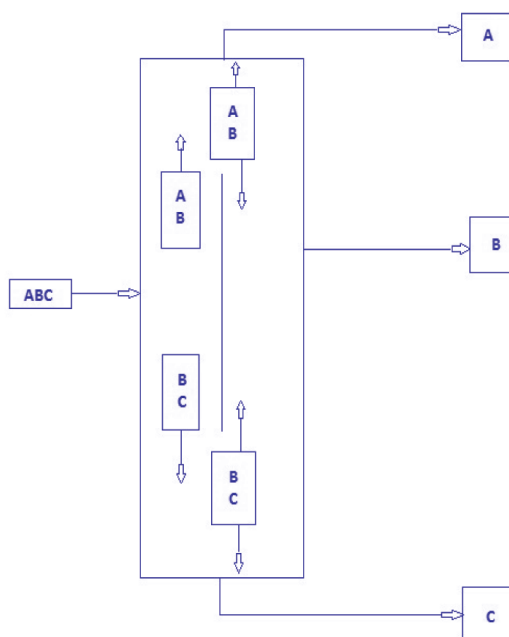
پس از بررسی‌های صورت گرفته، موقعیت دیواره بهتر است طوری باشد که تعداد مراحل بالا و پایین با هم برابر شود چون در این حالت بار حرارتی جوش آور به کمترین مقدار خود می‌رسد و عدم تقارن، انرژی مصرفی را افزایش می‌دهد [۱].

برج‌های دیوار میانی به دو صورت سینی دار و آکنه موجود است که استفاده از نمونه آکنه دار آن متداول تر است. شرکت BASF منحصر از برج‌های آکنه استفاده می‌کند دیگر شرکت‌ها مانند Koch Glitsch و CEPSA از برج‌های سینی دار استفاده

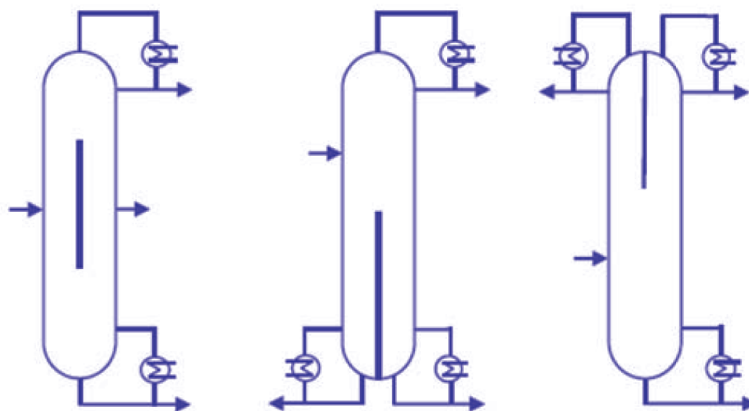
رود. با حذف این دو پدیده در برج، راندمان سینی‌ها افزایش و در نتیجه خلوص بالاتر جریان‌های خروجی را در برج‌های دیوار میانی سبب می‌شود [۷].

جداسازی مخلوط سه جزئی در ستون‌های دیوار میانی مانند برج پتلیوک است. در جریان پایین سینی خوراک مقدار سازنده A خیلی اندک است، همین طور در جریان بالای سینی خوراک مقدار سازنده C خیلی کم می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، انتقال جرم میان سازنده‌های A و B به سمت بالای برج و B و C به سمت پایین برج می‌باشد. در قسمت پایین برج بعد از اینکه 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. بطور 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 مرحله ای از برج که غلظت سازنده میانی بیشینه است، سازنده B به عنوان محصول میانی از برج خارج می‌شود.

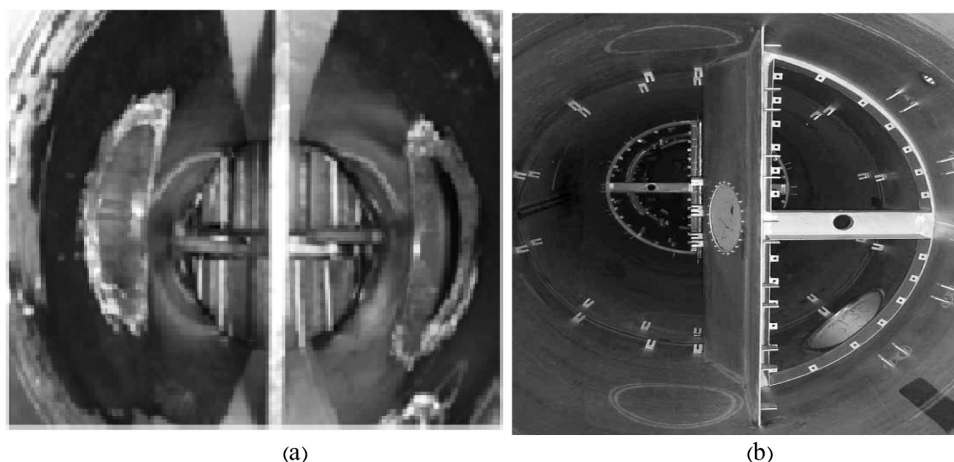
برج دیوار میانی باعث کاهش هزینه‌ی عملیاتی و سرمایه



شکل ۳. جداسازی اجزا در برج دیوار میانی



شکل ۴. انواع پیکربندی‌های برج دیوار میانی



شکل ۵. دیواره‌ی جوش داده شده (a) [۱۲]، دیواره بدون جوش (b) [۱۳]

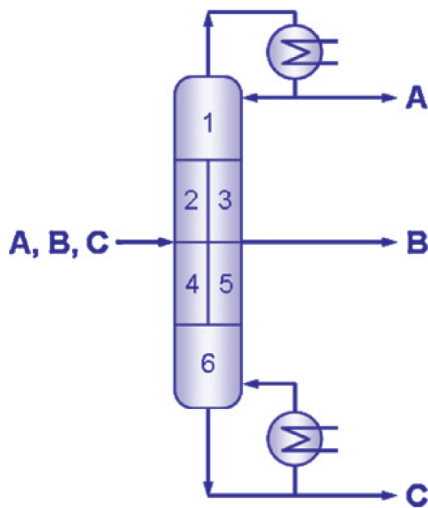
در روش دوم که تکنولوژی آن اخیراً در صنعت بکار رفته، دیواره‌های بدون جوش کاری است که توسط شرکت BASF و Montz ارائه گردیده است که مزیت آن، این است که تنش‌های مکانیکی کاهش پیدا می‌کند و به همین دلیل است که نصب این نمونه دیواره توصیه می‌شود [۱۰]. ساخت برج دیوار میانی با دیواره غیر ثابت در اواسط سال ۱۹۹۰ افزایش پیدا کرد و تا کنون به ۸۵ عدد رسیده است. با استفاده از این دیواره‌ها طراحی برج، آسانتر، سریعتر و دقیقتر می‌گردد.

از دیگر اجزا کلیدی برج‌های دیوار میانی همانطور که گفته شد، تقسیم کننده‌های مایع و بخار می‌باشد.

بکار بردن تقسیم کننده مایع در بالای دیوار میانی برج به معنای جریان برگشتی برای هر دو طرف دیوار است [۱۴].

می‌کنند. ساخت برج‌های آکنه پیچیده تر و جوش دادن دیوار میانی مشکل تر است. در طول نصب برج آکنه باید اطمینان داشت که اجزا آکنه با دیواره میانی برج برخورد نداشته باشد زیرا با توجه به نتایج Kaible این کار ممکن است جریان مایع را بیش از اندازه افزایش دهد و به طور برعکس بازده جداسازی را پایین بیاورد [۸]. قطر برج دیوار میانی‌های صنعتی مجهز به آکنه‌های ساختار یافته از ۰/۳ تا بالای ۴ متر است که قطر برج‌های سینی دار بیشتر است و به بالای ۶ متر نیز ممکن است برسد [۱۱].

همانطور که اشاره شد، یکی از عوامل مؤثر در برج، وجود دیواره میانی است که به دو صورت درون برج نصب می‌شود. در روش اول دیواره به برج جوش داده می‌شود که این امر باعث افزایش پایداری پوسته برج می‌شود.



شکل ۷. پارامترهای طراحی برج دیوار میانی [۱۷]

روش اول: طراحی اولیه برج دیوار میانی بر اساس معادله فنسک-آندروود-گلیلند^۱ و کرکبیرد^۲ است که معادلات فنسک حداقل تعداد مراحل، آندروود حداقل نسبت برگشتی و گلیلند مراحل مورد نیاز در نسبت برگشتی انتخاب شده را مشخص می‌کند و کرکبیرد سینی خوراک را تعیین می‌نماید. در این مدل، فراریت نسبی و جریان مولی را ثابت فرض می‌کنند [۱۵].

روش دوم: روش دیاگرام V_{min}

این روش یک روش گرافیکی است که بوسیله نرمالیزه کردن جریان بخار، حداقل انرژی بدست می‌آید که نرمالیزه کردن جریان بخار تابع توزیع خوراک است. پایه این روش بر اساس معادله آندروود است. پارامترهای مورد نیاز برای این روش عبارتند از: ترکیب خوراک، کیفیت خوراک، K -value و خلوص محصولات مورد نظر یا بازبایی است که پس از استفاده از معادله آندروود می‌توان V_{min} را مشخص کرد [۱۶].

یکی از پارامترهای مهم در طراحی، درجه آزادی می‌باشد. برای یک برج تقطیر معمولی، درجه آزادی برابر ۴ می‌باشد ولی برای برج‌های دیوار میانی مطابق شکل ۷ درجه آزادی برابر ۱۱ می‌باشد که نشان دهنده پیچیدگی طراحی این نوع برج‌هاست. ۱۱ درجه آزادی عبارتند از [۱۷]:

- بار حرارتی یا نسبت برگشتی



شکل ۶. تقسیم کننده مایع [۱۱]

مطالعات و آزمایش‌های تجربی تأثیر پارامتر تقسیم‌کننده مایع (L) بر دو جزء سبک و میانی در محصول میانی را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن این تأثیر، (L) را در مقادیر مختلف تغییر می‌دهند، این در حالی است که (V) در مقدار اولیه خود ثابت باقی می‌ماند و نیز شرایط خوراک و بار حرارتی جوش آور در طول آزمایش ثابت است و همچنین پارامتر تقسیم کننده بخار بر روی جز میانی و سنگین در محصول میانی تأثیر می‌گذارد. تقسیم شدن بخار درون برج به صورت طبیعی در دو طرف دیوار جریان پیدا می‌کند اما برای ایجاد تعادل افت فشار در دو طرف دیواره نیاز به دستگاه تقسیم کننده بخار داریم [۱۴].

با افزایش مقدار جریان مایع برگشتی در قسمت محصول (برج اصلی)، بار حرارتی چگالنده افزایش می‌یابد، این در حالی است که خلوص ترکیب میانی در محصول میانی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین تنها افزایش میزان جریان برگشتی برای دست یابی به خلوص بالاتر بدون توجه به میزان بار حرارتی و صرف انرژی نمی‌تواند الگوی مناسبی در جهت کارایی بهتر برج ارائه دهد.

طراحی و شبیه‌سازی برج دیوار میانی

در این مقاله برای طراحی برج‌های دیوار میانی دو روش معرفی شده است.

1. Feneske-Underwood-Gilliland equation

2. Kirkbirde

تجزیه میشود. چندین چینش دو ستون موجود است که از نظر ترمودینامیکی با برج دیوار میانی برابر است. که دو نمونه از آن در شکل ۹ نشان داده شده است. این دو پیکر بندی از نظر زمان همگرایی و نتایج تفاوتی با هم ندارند اما برای راه اندازی، این مدل نسبت به مدل پمپ جانبی آسان تر و از نظر انعطاف پذیری بهتر است [۱۰].

مدل سه ستون:

در این مدل قسمت پیش جداساز و قسمت‌های بالا و پایین برج اصلی به صورت مجزا به سه برج ساده تجزیه میشوند و محصول پایین برج دوم و محصول بالای برج سوم با هم مخلوط شده و محصول میانی برج را تشکیل می‌دهد [۱۸] (شکل ۱۰).

مدل چهار ستون:

همانطور که در شکل ۱۱ می‌بینید در این مدل برج دیوار میانی به چهار برج ساده تجزیه می‌شود که عبارتند از قسمت خوراک، قسمت محصول، قسمت بالا و پایین. این مدل بهترین موقعیت قسمت‌های برج را نشان می‌دهد اما سخت ترین مدل برای مقدار دهی اولیه است و نیز به آرامی هم گرا میشود. بیشترین انعطاف پذیری این مدل به خاطر ویژگی قسمت‌های مختلف برج و جداکننده‌های مایع و بخار است. بنابراین این پیکربندی برای

- تعداد مراحل تئوری (قسمت ۱ تا ۶)
- توزیع بخار روی قسمت ۴ و ۵
- توزیع مایع روی قسمت ۲ و ۳
- مشخصات دو جریان محصول

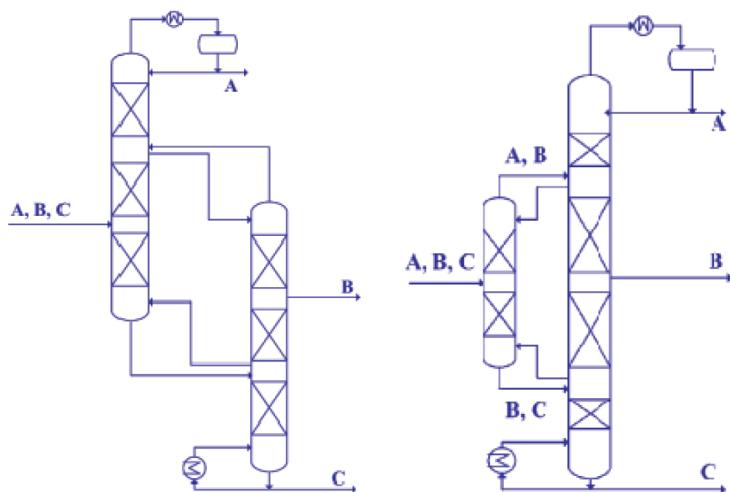
تا به حال مدل استاندارد برج دیوار میانی به عنوان یک بسته نرم افزاری ارائه نشده است، بنابراین این برج‌ها را به برج‌های معمولی تجزیه میکنند. برای شبیه سازی برج دیوار میانی چندین مدل معرفی شده است که هر کدام مزیت‌ها و معایبی دارد که عبارتند از:

مدل پمپ جانبی:

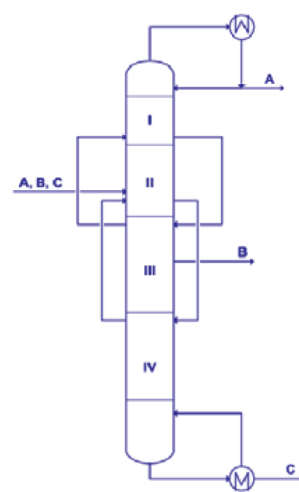
در این مدل قسمت‌های مختلف برج دیوار میانی به طور عمودی در بالای یکدیگر قرار می‌گیرند و تماس مایع و بخار با استفاده از پمپ‌های جانبی تنظیم می‌شود. این مدل از نظر محاسباتی ساده تر و آسان تر در مقایسه با مدل‌های دیگر است زیرا شامل تنها یک برج برای شبیه سازی می‌باشد. اما در همگرایی شبیه سازی این مدل مشکلاتی به وجود می‌آید زیرا در دو نقطه برج کل بخار و مایع از برج بیرون کشیده می‌شود که در شکل ۸ نمایش داده شده است [۱۰].

مدل دو ستون:

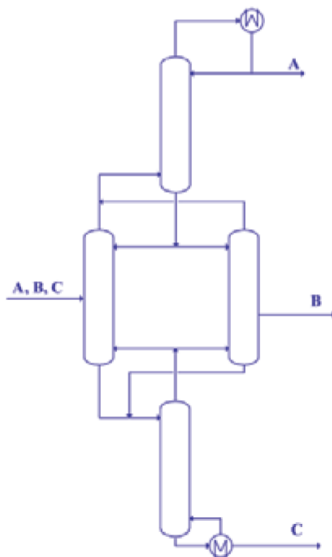
در این مدل قسمت پیش جدا ساز و اصلی به دو برج ساده



شکل ۹. دو نمونه از مدل دو ستون برای برج دیوار میانی [۱۰]



شکل ۸. مدل پمپ جانبی برج دیوار میانی [۱۰]

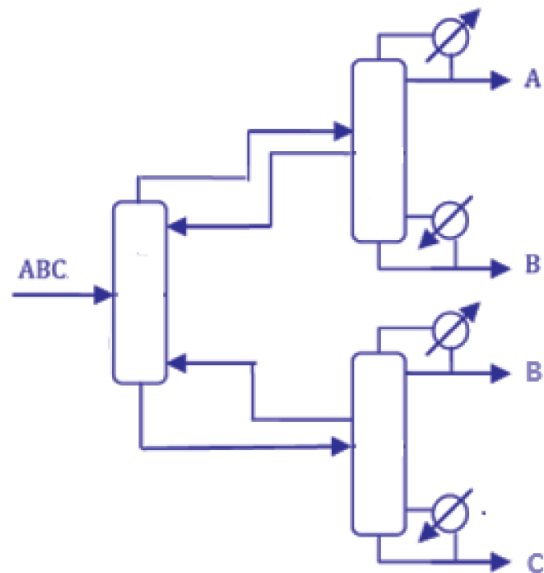


شکل ۱۱. مدل چهار ستون [۱۰]

برای جایگزینی برج‌های معمولی با یک برج دیوار میانی ابتدا پارامترهای طراحی و نیز نسبت سرعت جریان بخار به حداکثر سرعت آن اندازه‌گیری می‌شود که اگر این نسبت در محدوده قابل قبولی باشد [۱۹] به عنوان یک پارامتر تصمیم‌گیری برای جایگزینی بکار می‌رود.

جداسازی بنزن-تولوئن-زایلن:

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، برای این ترکیب خوراک، برج‌های معمولی که از دو برج با قطرهای ۰/۹ و ۰/۸ متر



شکل ۱۰. مدل ستون‌های سه گانه

شبیه‌سازی دینامیک مناسب‌ترین روش است [۱۰].

کاربرد برج دیوار میانی در صنعت

برای جایگزین کردن برج‌های معمولی با برج دیوار میانی دو روش موجود است. روش اول، ساخت یک برج دیوار میانی جدید است و روش دوم، برج دیوار میانی را با دوباره بکار بردن بعضی از تجهیزات و اجزا داخلی برج‌های معمولی، ساخته و راه‌اندازی می‌شود که به برج دیوار میانی جایگزین شده^۱ معروفند که این روش از نظر هزینه ساخت مقرون به صرفه‌تر است.

جدول ۱. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی بنزن-تولوئن-زایلن

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحدها در پرانتز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۶۸	۶۸		۴۰	۳۱	تعداد سینی‌ها
۱۷،۳۵،۱۶	۱۷،۳۵،۱۶				تعداد سینی‌ها(بالا، میانیو کف)
۰/۹	۰/۹		۰/۸	۰/۹	قطر ستون (متر)
۵۱	۵۱		۳۰	۲۴	ارتفاع ستون(متر)
۱۳۰۶	۱۳۰۶	۲۳۵۲	۸۷۶	۱۴۷۶	بارحرارتی کندانسور(کیلووات)
۱۳۵۵	۱۳۵۵	۲۳۹۵	۸۹۰	۱۵۰۸	بارحرارتی ریپویلر (کیلو وات)
۰/۸	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

ترکیب خوراک ۳۵٪ و کاهش سرمایه اولیه در حدود ۳۶٪ برآورد شده است میزان زمان بازگشت سرمایه ۲۵ ماه برای برج دیوار میانی است [۲۰] (جدول ۲).

جداسازی دی پروپانایزر- دی بوتانایزر

برج‌های معمولی در این فرایند هرکدام با قطر ۲/۳ متر و ۳۲ مرحله ساخته می‌شوند که می‌توان آن را با یک برج دیوار میانی با قطر ۲/۴ متر و ۶۸ مرحله جایگزین کرد. برای جایگزینی برج دیوار میانی در این فرایند می‌توان از ریبویلر برج‌های معمولی دوباره استفاده کرد اما به کندانسور جدید نیاز است. هزینه عملیاتی حدود ۳۹٪ کاهش می‌یابد و نیز زمان بازگشت سرمایه در این فرایند ۳۲ ماه است [۲۰] (جدول ۳).

و به ترتیب ۳۱ و ۴۱ سینی می‌باشند، با یک برج دیوار میانی به قطر ۰/۹ متر و ۶۸ سینی جایگزین می‌شود و همچنین ریبویلر و کندانسور برج‌های معمولی قابل استفاده برای برج دیوار میانی است. با این جایگزینی حدود ۴۳٪ در هزینه عملیاتی و حدود ۱۴٪ در هزینه اولیه نسبت به برج‌های معمولی صرفه‌جویی می‌شود و میزان زمان بازگشت سرمایه حدود ۲۰ ماه است [۲۰].

جداسازی بنزن- تولوئن- اتیل بنزن

سیستم‌های معمولی برای این فرایند متشکل از دو برج به قطرهای ۱/۱ و ۱/۵ متر می‌باشند. که با یک برج دیوار میانی به قطر ۱/۲ متر می‌توان جایگزین کرد. تعداد مراحل برج‌های معمولی به ترتیب ۵۱ و ۳۵ می‌باشد در حالی که برج دیوار میانی با ۶۵ سینی راه اندازی می‌شود. کاهش هزینه عملیاتی برای این

جدول ۲. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی بنزن-تولوئن- اتیل بنزن

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحدها در پرانتز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۶۵	۶۵		۳۵	۵۱	تعداد سینی‌ها
۱۵،۳۷،۱۳	۱۵،۳۷،۱۳				تعداد سینی‌ها(بالا، میانیو کف)
۱/۱	۱/۲		۱/۵	۱/۱	قطر ستون (متر)
۵۲	۵۲		۳۱	۴۱	ارتفاع ستون(متر)
۱۲۹۳	۱۲۹۳	۲۰۱۵	۷۵۳	۱۲۶۲	بارحرارتی کندانسور(کیلووات)
۱۳۳۵	۱۳۳۵	۲۰۵۸	۷۷۶	۱۲۸۲	بارحرارتی ریبویلر (کیلو وات)
۰/۹	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

جدول ۳. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی دی پروپانایزر- دی بوتانایزر

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحدها در پرانتز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۶۸	۶۸		۳۲	۳۲	تعداد سینی‌ها
۱۰،۴۰،۱۸	۱۰،۴۰،۱۸				تعداد سینی‌ها (بالا، میانی و کف)
۲/۳	۲/۴		۲/۳	۲/۳	قطر ستون (متر)
۶۷	۶۷		۳۳	۳۳	ارتفاع ستون(متر)
۹۶۸۵	۹۶۸۵	۱۵۸۱۴	۷۷۵۶	۸۰۵۸	بارحرارتی کندانسور(کیلووات)
۹۴۰۹	۹۴۰۹	۱۵۴۴۰	۸۰۶۴	۷۳۷۶	بارحرارتی ریبویلر(کیلو وات)
۰/۹	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

جداسازی اتانول-آب- اتیل گلیکول

برای برج دیوار میانی می‌باشند. ۴۳٪ کاهش هزینه عملیاتی و ۳۰٪ کاهش سرمایه اولیه برای این جایگزینی برآورد شده است. و زمان بازگشت سرمایه حدود ۱۸ ماه است [۲۰] (جدول ۵).

برج‌های معمولی در این فرایند به قطرهای ۰/۹ و ۰/۵ متر ساخته می‌شوند که دارای به ترتیب ۳۰ و ۷ سینی است اما مطابق جدول شماره ۴ برج دیوار میانی با قطر ۱/۱ متر و تعداد ۳۵ مرحله جایگزین می‌شود. در این جایگزینی ۳۱٪ در هزینه عملیاتی صرفه جویی می‌شود اما زمان بازگشت سرمایه ۴۹ ماه است که مناسب به نظر نمی‌آید [۲۰].

جداسازی آلکان‌ها (پنتان- هگزان- هپتان)

برای این فرایند، جداسازی بوسیله دو برج معمولی با قطرهای ۰/۸ متر که دارای ۳۸ و ۲۱ سینی است، انجام می‌شود در حالی که می‌توان از یک برج دیوار میانی به قطر ۰/۹ متر و تعداد ۴۸ سینی بهره‌مند شد که در این حالت ریویلر و کندانسور برج‌های معمولی می‌تواند جایگزین شود. از نقطه نظر فرایندی، ۳۷٪ در هزینه عملیاتی و ۲۰٪ در سرمایه اولیه نسبت به برج‌های معمولی صرفه جویی می‌شود و زمان بازگشت سرمایه حدود ۳۲ ماه است [۲۰] (جدول ۶). کاهش سرمایه اولیه و هزینه عملیاتی برج‌های دیوار میانی

جداسازی اتانول- پروپانول- بوتانول

برای جداسازی اتانول- پروپانول- بوتانول از دو برج معمولی به قطرهای ۲/۶ و ۱/۵ متر با ۵۲ و ۳۲ مرحله استفاده می‌شود که می‌توان با یک برج دیوار میانی به قطر ۲/۳ متر و ۶۰ سینی جایگزین کرد که در این فرآیند هم ریویلر و هم کندانسور قابل جایگزینی

جدول ۴. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی اتانول- آب- اتیل گلیکول

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحد در پرانتز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۳۵	۳۵		۷	۳۰	تعداد سینی‌ها
۱۷،۹۰۹	۱۷،۹۰۹				تعداد سینی‌ها (بالا، میانی و کف)
۱/۱	۱/۱		۰/۵	۰/۹	قطر ستون (متر)
۲۹	۲۹		۷	۲۴	ارتفاع ستون (متر)
۱۰۳۳	۱۰۳۳	۱۴۶۱	۲۰۲	۱۲۵۹	بارحرارتی کندانسور (کیلووات)
۹۷۳	۹۷۳	۱۴۳۰	۱۴۱	۱۲۸۹	بارحرارتی ریویلر (کیلو وات)
۰/۹	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

جدول ۵. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی اتانول- پروپانول- بوتانول

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحد در پرانتز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۶۰	۶۰		۳۲	۵۲	تعداد سینی‌ها
۱۰،۴۰،۱۸	۱۰،۴۰،۱۸				تعداد سینی‌ها (بالا، میانی و کف)
۲/۶	۲/۳		۱/۵	۲/۶	قطر ستون (متر)
۵۹	۵۹		۲۹	۵۲	ارتفاع ستون (متر)
۵۱۸۷	۵۱۸۷	۹۷۷۰	۲۸۸۹	۶۸۸۱	بارحرارتی کندانسور (کیلووات)
۶۳۱۶	۶۳۱۶	۱۰۹۹۶	۲۹۸۴	۸۰۱۲	بارحرارتی ریویلر (کیلو وات)
۰/۹	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

معمولی نتیجه می‌شود که بیشتر از ۳۰٪ در هزینه عملیاتی صرفه جویی می‌شود و زمان بازگشت سرمایه نیز کاهش می‌یابد. این برج‌ها از نظر قطر اندکی از برج‌های معمولی بزرگتر هستند اما هزینه ساخت یا سرمایه اولیه به علت داشتن تنها یک جوش آور و چگالنده کاهش یافته و یا این که تغییری نمی‌کند.

از محدودیت‌های استفاده از برج‌های دیوار میانی این است که برای ترکیبات غیر ایده‌آل و تقطیر همراه با واکنش شیمیایی خوب عمل نمی‌کنند و طراحی آن در مقایسه با برج‌های معمولی پیچیده و در اختیار شرکت‌های سازنده می‌باشد. در تماسهایی که با بعضی از واحدهای صنعتی گرفته شده است به نظر می‌رسد که چنین برج‌هایی در صنایع پتروشیمی کشور وجود ندارد و به عهده دانشگاه‌هاست که با ایجاد پایلوت برج‌های آزمایشگاهی به تکنولوژی برج‌های دیوار میانی دست یابند.

تشکر و قدردانی

لازم است از همکاری صمیمانه واحد تحقیق و توسعه پتروشیمی امیرکبیر که امکان بازدید از واحدهای عملیاتی را فراهم نمودند تشکر شود.

جایگزین شده در مقایسه با برج‌های معمولی در جدول ۷ به طور کلی نشان داده شده است.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله برج‌های دیوار میانی و کاربرد آن در صنعت معرفی شدند. برج‌های دیوار میانی یک نمونه از برج‌های کوپل گرمایی است که در آن حجم و سایر تجهیزات مانند جوش آور و چگالنده از سیستم حذف می‌شود این برج‌ها برای جدا سازی خوراک‌های سه جزئی بیشترین کاربرد را دارند. مواردی از جداسازی ۴ جزئی نیز گزارش شده است که جنبه صنعتی یا اقتصادی آن هنوز به طور جامع گزارش نشده است. جدا سازی در این برج‌ها با درجه خلوص بالا صورت می‌گیرد. با وجود این که خلوص هر سه محصول بالاست اما مصرف انرژی کاهش و به تبع آن، صرفه جویی در هزینه می‌شود. استفاده از برج‌های دیوار میانی برای محصولات حساس به دما بسیار مفید است زیرا وجود تنها یک جوش آور، استرس دمایی روی محصول را کم می‌کند و محصولی با کیفیت بالاتر به بازار عرضه می‌نماید. با مطالعه بر روی جایگزینی برج دیوار میانی با برج‌های

جدول ۶. مقایسه برج‌های معمولی با برج دیوار میانی در جدا سازی آلکانها (پنتان - هگزان - هپتان)

برج دیوار میانی جایگزین شده	برج دیوار میانی جدید	دو برج معمولی			سایز/جزئیات هزینه (واحدها در پراتنز)
		کل	برج دوم	برج اول	
۴۸	۴۸		۲۱	۳۸	تعداد سینی‌ها
۱۴،۲۳،۱۱	۱۴،۲۳،۱۱				تعداد سینی‌ها (بالا، میانی، کف)
۰/۹	۰/۹		۰/۸	۰/۸	قطر ستون (متر)
۳۷	۳۷		۱۷	۲۸	ارتفاع ستون (متر)
۸۵۸	۸۵۸	۱۴۱۹	۶۶۶	۷۵۳	بارحرارتی کندانسور (کیلووات)
۹۳۴	۹۳۴	۱۴۸۹	۶۷۲	۸۱۷	بارحرارتی ریبولر (کیلو وات)
۰/۹	۰/۸		۰/۸	۰/۸	نسبت $\frac{V_{act}}{V_{max}}$

فهرست علائم:

C	جز سنگین در خواک	V_{act}	سرعت واقعی بخار	L	پارامتر تقسیم کننده مایع
X	کسر مولی مایع	V_{max}	سرعت طغیان بخار	v	پارامتر تقسیم کننده بخار
y	کسر مولی بخار	A	جز سبک در خوراک	K-value	مقدار K
C	تعداد اجزاء	B	جز میانی در خوراک	V_{min}	حداقل مقدار بخار

γ ضریب اکتویته	S نسبت برگشتی ریویولر	F دبی خوراک
\emptyset ضریب فوگاسیته	r نسبت برگشتی کندانسور	D دبی محصولات خروجی از بالای برج
P^{sat} فشار بخار	q شرایط گرمایی خوراک	W دبی محصولات خروجی از پایین برج
n تعداد مراحل	ضریب فراریت نسبی	Z جزء مولی خوراک

منابع

1. Laszlo ,Szabo ,Miklos Balaton , Sandor Nemeth , " Analysing Divided Wall Column" , Springer-Verlag, 2011.
2. Shreve, Randolph Norris, "Chemical Process Industries", McGraw-Hill, 1977.
3. Trybal,R E ."mass transfer operation 3rd ed.", McGraw-Hill, 1980.
4. Petlyuk F.B, "Distillation Theory and Its Application to Optimal Design of Separation Units"-Cambridge series in chemical engineering, 1978.
5. M. I. Abdul Mutalib and R. Smith- "Operating and Control of Dividing Wall Distillation Columns"- Trans IChemE, Vol 76, Part B,Simulation and pilot plant study, March, 1998.
6. Muralikrishna, K. V. Madhavan K.P and Shah,S.S."Development of Dividing Wall Distillation Column Design Space for Specified Separation"-Trans IChemE,80, pp. 155-166, 2002.
7. Young Han Kim "Structural design and operation of a fully thermally coupled distillation column", Chemical Engineering Journal 85 , 2002, 289-301.
8. Omer Yildirim, Anton A. Kiss, Eugeny Y. Kenig-"Dividing Wall Column in Chemical Process Industry"- Separation and Purification Technology (2011)
9. Fabricio Omar Barroso-Munoza, Salvador Hernandez , Hector Hernandez-Escotoa, Juan Gabriel Segovia-Hernandez, Vicente Rico-Ramirez, Rosa-Hilda Chavezc, "Experimental Study on Pressure Drop in a Dividing Wall Distillation Column", Chemical Engineering and Processing 49 (2010) 177-182
10. Dejanovic, Lj. Matijasevic, Z. Olujić -" review Dividing Wall Column-A breakthrough towards sustainable distilling" - Chemical Engineering and Processing, 2010, 559-580
11. H. Becker, S. Godorr, H. Kreis, J. Vaughan, "Partitioned distillation
12. Columns"-why, when & how, Chem. Eng. 108 (1), 2001, 68-74
13. Fabricio Omar Barroso-Munoza, Salvador Hernandez , Hector Hernandez-Escotoa, Juan Gabriel Segovia-Hernandez, Vicente Rico-Ramirez, Rosa-Hilda Chavezc ,"Implementation and Operation of a Dividing Wall Distillation Column", Chem. Eng. Technol. 34, No. 5, 2011, 746-750
14. B. Kaibel, H. Jansen, T. Rietfort, E. Zich, "Unfixed Wall: The Key to a breakthrough in Dividing Wall Column Technology", EFCE WP on Fluid Separations, Z. Olujić Symposium, Delft, NL May 05th, 2007
15. M. I. Abdul Mutalib and R. Smith- "Operating and Control of Dividing Wall Distillation Columns"- Trans IChemE, Vol 76, Part A, March, 1998
16. C. Triantafyllou, R. Smith," The design and optimization of fully thermally
17. coupled distillation columns", Chem. Eng. Res. Des. 70, 1992, 118-132
18. I.J. Halvorsen, "Minimumenergy requirements in complex distillation arrangements", Thesis, Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2001, Trondheim, 352 pp.
19. Norbert Asprion, Gerd Kaibel, "Dividing wall columns: Fundamentals and recent advances"- Chemical Engineering and Processing 49, 2010,139-146
20. Noori Sotudeh, Bahram Hashemi Shahraki," Extension of a Method for the Design of Divided Wall Columns", Chem. Eng. Technol.31, No. 1, 2008, 83-86
21. Sinnott, R.K Chemical Engineering Design (4th edition).
22. Coulson & Richardson's Chemical Engineering Series (Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford), 2005
23. R. Premkumar, G.P. Rangaiah, "Retrofitting conventional column systems to
24. Dividing-Wall Columns", Chemical Engineering Research and Design 87, 2009, 47-60