

مدلسازی و بررسی تاثیر جریان برگشتی بر روی راندمان جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن در برج پرشده ناپیوسته

علیرضا فضلعلی*، محسن روشنائی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

در میان روش‌های مختلف جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن، تقطیر آب با وجود پایین بودن فاکتور جداسازی دارای یک سری مزایای ذاتی از جمله عدم وجود جزء سمی و خورنده گاز سولفید هیدروژن، عدم نیاز به استفاده از روش الکترولیز جهت تبدیل گاز هیدروژن به آب و عدم نیاز به کاتالیست می‌باشد. در این تحقیق از تقطیر ناپیوسته در برج آکنده با آکنه‌هایی از نوع حلقه‌های راشیگ از جنس پلی‌آمید و حلقه‌های طرح دیکسون از جنس فولاد ضد زنگ برای تولید آب سنگین استفاده شده و ارتفاع معادل سینی تئوری بدست آمده است. اگرچه این ارتفاع برای آکنه پلی‌آمید کمتر بود ولی به علت بالا بردن مقدار کل کرین آلی در آب، آکنه پلی‌آمید مردود اعلام شد. در ادامه برای آکنه طرح دیکسون در قسمت خطی نمودار، که مطلوب برای طراحی واحد‌های عملیاتی است، مدلی به داده‌های آزمایش برآزش شد که در بازه آزمایش با دقت خوبی می‌تواند برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۷ بهمن ۱۴۰۰

دریافت پس از اصلاح: ۲۴ آبان ۱۴۰۱

پذیرش نهایی: ۸ دی ۱۴۰۱

کلمات کلیدی:

ایزوتوپ‌های پایدار

دوتریوم

تقطیر

ارتفاع معادل سینی تئوری

* عهده دار مکاتبات

a-fazlali@araku.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

تفاوت فیزیکی و شیمیایی میان هیدروژن و دوتریوم به دلیل اختلاف دو برابری در جرم اتمی آن‌ها بیشتر از جفت ایزوتوپ-هایی است که نسبت‌های جرمی پایین‌تری دارند. با توجه به درصد پایین دوتریوم در طبیعت، بازیافت مقادیر بالای آن کاری مشکل و پرهزینه است [۱]. فرآیند تقطیر زمانی از نظر اقتصادی قابل توجه است که غلظت دوتریوم در آب به بیش از ۱۰٪ رسیده باشد [۲] و این بدین دلیل است که در این حالت فاکتور جداسازی (α) افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. به همین علت غلظت 1.1 mol/mol به عنوان خوراک در این تحقیق بکار برده شد.

آند^۹ و همکاران در زمینه جداسازی به روش تقطیر، مدلی را ارائه نمودند که در این مدل سطح خیس شده آکنه، فاکتور مهمی در جداسازی به حساب می‌آید و کشش سطحی مایع و انرژی سطح مواد آکنه هم مورد توجه قرار می‌گیرد [۳]. براوو^۶ و فیر^۷ رابطه‌ای برای انتقال جرم در برج‌های تقطیر پر شده ارائه نمودند [۴]. این مدل بر پایه مدل شولمن^۸ استوار است و ضرایب انتقال جرم در فاز مایع و بخار را بر اساس این مدل حساب می‌کند. آکیرا کابا^۹ و همکاران مطالعاتی در مورد ارتفاع معادل سینی تئوری (HETP) برای آکنه دیکسون و آکنه چینی در برج تقطیر مقیاس کوچک برای جداسازی ایزوتوپ $\text{H}_2\text{O} - \text{HTO}$ داشتند [۵]. یاماموتو^{۱۰} و همکاران بر روی جداسازی ایزوتوپ $\text{H}_2\text{O} - \text{HTO}$ با استفاده از تقطیر آب با توجه به دینامیک HETP آکنه دیکسون SUS در یک برج پر شده کوچک کار کردند [۶]. شریعت^{۱۱} و کانش^{۱۲} راندمان آکنه‌ها را در مقیاس تجاری با استفاده از توزیع مایع خوب و توزیع مایع نامناسب مورد بررسی قرار دادند که در این تحقیق چهار آکنه با اندازه‌های مختلف، با دو نوع توزیع کننده مورد آزمایش قرار گرفت [۷]. دا^{۱۳} و همکاران یک کار آزمایشگاهی برای جداسازی هیدروژن و دوتریوم به وسیله‌ی فرآیند جذب دوره‌ای حرارتی انجام دادند [۸]. زاکرزسکا ترزنادل^{۱۴} و همکاران مطالعاتی در زمینه‌ی جداسازی پروتیوم/دوتریوم و اکسیژن-۱۶/اکسیژن-۱۸ با استفاده از تقطیر غشائی داشتند. آن‌ها تلاش کردند تا ایزوتوپ-های دوتریوم و اکسیژن سنگین (اکسیژن-۱۸) مشاهده شده در فرآیند تقطیر غشائی (MD)^{۱۵} را توجیه کنند [۹]. اوکی^{۱۶} و

ایزوتوپ پایدار به ایزوتویی گفته می‌شود که تاکنون هیچ شکلی از واپاشی آن مشاهده نشده است. اگر نسبت نوترون به پروتون عنصر کمتر از ۱/۵ باشد عنصر بدون واپاشی و پرتوزایی است. پروتیوم^۱ نخستین ایزوتوپ هیدروژن می‌باشد که حاوی یک پروتون و یک الکترون است و جرمی معادل یک واحد جرم اتمی (amu)^۲ دارد. دوتریوم^۳ دومین ایزوتوپ پایدار هیدروژن حاوی یک پروتون و یک نوترون است. خواص شیمیایی دوتریوم تقریباً مشابه پروتیوم است اما جرمی معادل ۲ amu دارد. تریتیوم^۴ سومین ایزوتوپ طبیعی هیدروژن می‌باشد که دارای یک پروتون و دو نوترون در هسته خود بوده و بنابراین جرم آن معادل ۳ amu است. در حالی که پروتیوم و دوتریوم هر دو ایزوتوپ پایدار هیدروژن هستند، نوترون اضافی در تریتیوم موجب عدم پایداری هسته آن می‌گردد. به طوری که تریتیوم عنصری رادیو اکتیو با نیمه عمر ۱۲/۲ سال می‌باشد. این در حالی است که پروتیوم و دوتریوم هیچ یک دچار تخریب خود به خودی رادیو اکتیوی نمی‌شوند.

هر هسته‌ای می‌تواند تحت واپاشی خود به خودی قرار گیرد، اما احتمال چنین پدیده‌ای برای ایزوتوپ‌های پایدار قابل اغماض است. هر سه ایزوتوپ هیدروژن دارای خواص شیمیایی بسیار مشابه، اما دارای جرم‌های متفاوتی هستند و این تفاوت‌های کوچک جرمی، منجر به قدرت‌های پیوندی متفاوت در هنگام تشکیل پیوند با عناصر دیگر می‌شود. تفاوت‌های جزئی در قدرت پیوند، عامل جداسازی ایزوتوپ‌هایی می‌باشد که در معرض واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی قرار گرفته‌اند.

میزان دوتریوم موجود در آب طبیعی تقریباً ۱ قسمت در ۷۰۰۰ قسمت است. به عبارت دیگر حدود ۰/۰۱۴۸ درصد مولی از هیدروژن موجود در آب طبیعی، دوتریوم می‌باشد که در غلظت پایین به صورت HDO در آب موجود است.

از آنجایی که تمام ایزوتوپ‌های یک عنصر دارای ویژگی-های شیمیایی یکسانی هستند، روش‌های شیمیایی مرسوم جداسازی، عموماً برای آن‌ها قابل استفاده نیست. با این وجود، ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر و ترکیبات مربوط به آن‌ها تفاوت‌هایی را در خصوصیات فیزیکی از خود نشان می‌دهند.

9 Akira Kaba
10 Ichiro Yamamoto
11 Ahmad Shariat
12 John G. Kunesh
13 Lu Guangda
14 G. Zakrzewska-Trznadel
15 Membrane Distillation
16 Kanna Aoki

1 Protium
2 atomic mass unit
3 Deuterium
4 Tritium
5 Kakusaburo Onda
6 Jose L.Bravo
7 James R.Fair
8 Shulman.H.L

همکاران بر روی قابلیت کاربرد غشائی پالادیوم برای جداسازی پروتیوم و دوتریوم دوتریوم تحقیقاتی انجام دادند. در این تحقیقات جداسازی پروتیوم و دوتریوم با استفاده از غشای پالادیوم با تغییرات دما و فشار مورد بررسی قرار گرفت. [۱۰]. هانلی^۱ و چن^۲، روابط انتقال جرم جدیدی برای برج‌های پرشده ارائه کردند. آن‌ها با مطالعه مدل سازی دو آکنه نامنظم و دو آکنه منظم به بررسی روابط انتقال جرم در آن‌ها پرداختند. این مدل سازی در ناحیه خطی ارتفاع معادل متوسط انجام شد، چرا که این ناحیه، ناحیه مطلوب برای طراحی برج است [۱۱]. اوها^۳ و همکاران تحقیقاتی راجع به تقطیر ایزوتوپ‌های هیدروژن برای مقاصد HD قطبی شده داشتند. آن‌ها یک سیستم تقطیر برودتی جدید را ارتقاء دادند تا گاز هیدروژن - دوتراید (HD) را برای مقاصد HD قطبی شده خالص سازی کنند [۱۲]. ژوانگ^۴ و همکاران یک کار آزمایشگاهی برای احیای دوباره و کاهش بار حرارتی برای دفع CO₂ از محلول دی اتیلن آمین (DETA) در برج جریان ساز پرشده با آکنه‌های نامنظم حلقه دیکسون انجام دادند [۱۳]. باتاکارایا^۵ و همکاران مطالعات شبیه‌سازی مشخصات یک برج تقطیر برودتی برای جداسازی ایزوتوپ هیدروژن را به انجام رساندند. در این کار یک مدل دینامیکی ساده برای تخمین مشخصات اصلی کارکرد یک برج تقطیر برودتی برای جداسازی ایزوتوپ هیدروژن ارائه شد [۱۴]. دولان^۶ و همکاران بر روی تغلیظ دوتریوم با استفاده از غشاهای وانادیوم کار کردند [۱۵]. آنها طبق آزمایش‌هایی که با هدف محاسبه تراوش پذیری هیدروژن و دوتریوم در غشای پالادیوم با پوشش وانادیوم در دمای ۳۰۰°C^۷ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که هیدروژن با سرعت ۱/۵ برابر سریع‌تر از دوتریوم تراوش می‌کند. دلخوشی، در یک کار عملی به تعیین HETP مربوط به یک نوع آکنه جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن و اکسیژن پرداخت. ایشان در حالت جریان برگشتی کامل، تعداد مراحل کمینه برای حصول اکسیژن سنگین به غلظت ۹۵٪ و آب سنگین به غلظت ۹۹٪/۸ را بدست آوردند [۱۶]. یونته^۷ و همکاران دفع پروتیوم و دوتریوم از بسترهای تیتانیوم متفاوت را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. در این کار تحقیقاتی راجع به بازیابی ایزوتوپ‌های مختلف هیدروژن از دو نوع بستر تیتانیوم شامل بسترهای پودری و اسفنجی تیتانیوم انجام شد. اوگاوا^۸ و همکاران جداسازی

8 Ryota Ogawa
9 Combined Electrolysis Fuel Cell
10 M. Christenson
11 C. Moynihan
12 D.N. Ruzic
13 Dynamic hold up
14 Pseudo Dixon

1 Brian Hanley
2 Chau Chyun Chen
3 T. Ohta
4 Xu Zhang
5 Rupsha Bhattacharyya
6 Michael D. Dolan
7 Eusebiu Ilarian Ionete

آزمایش اثر داشته باشد وجود داشت. لذا ساختار و رفتار این آکنه مورد بررسی قرار گرفت.

قطر برج مورد استفاده ۶ in و ارتفاع بستر ۲ m است. یک جوش‌آور^۳ در پایین برج تعبیه شده است. انرژی لازم جهت تبخیر آب موجود در پایین برج از بخار آب تامین می‌شود. جوش‌آور یک مبدل پوسته-لوله^۴ است و بخار در قسمت پوسته جریان دارد. این جوش‌آور از نوع ترموسیفون^۵ است و بر طبق مراجع موجود، یک مرحله تعادلی محسوب نمی‌شود [۵] که این نکته در استفاده از معادله فنسک^۶ مهم است. دو عدد چگالنده^۷ در بالای برج قرار دارد که جهت مایع سازی بخار رسیده به بالای برج از آن استفاده می‌شود. تمام بخار ورودی به چگالنده مایع شده و به داخل برج برمی‌گردد. برج تحت خلأ کار می‌کند و این خلأ از خطی که از بالای برج به منبع خلأ متصل است تامین می‌شود.

یک حسگر فشار^۸ در پایین بستر تعبیه شده که فشار آن نقطه را نشان می‌دهد. همچنین یک حسگر سطح^۹ در برج قرار گرفته که سطح مایع در پایین برج را نشان می‌دهد. این دو حسگر معیاری از رسیدن برج به حالات پایا از لحاظ هیدرودینامیکی است. به این معنا که وقتی این دو مقدار ثابت شوند می‌توان گفت برج از لحاظ هیدرودینامیکی به حالت پایا رسیده است. رسیدن برج به حالت پایا از لحاظ غلظتی، با نمونه گیری از بالا و پایین برج و آنالیز نمونه‌ها مشخص می‌شود.

در اینجا منظور از حالت پایا این است که تغییرات نسبت به زمان صفر است. باید به این نکته توجه داشت که پس از راه اندازی، خوراکی به برج اضافه نمی‌شود و یا محصولی گرفته نمی‌شود و مقادیر نمونه گیری نسبت به انباشت^{۱۰} برج خیلی کم است. پس از چند ساعت فعالیت برج با توجه به حسگر سطح و فشار، مشاهده شد که تغییری در شرایط هیدرودینامیکی برج رخ نمی‌دهد (در صورت تغییر باید سطح برج یا فشار پایین بستر دستخوش تغییراتی شود) و برج به حالت پایا رسیده است.

همچنین در ابتدای آزمایش‌ها، برج پنج شبانه روز به طور پیوسته در سرویس قرار گرفت و با نمونه گیری و آنالیز نمونه‌ها مشاهده شد که پس از سه شبانه روز غلظت‌های بالا و پایین برج تغییر محسوسی ندارند و ثابت شده‌اند. لذا معیار زمانی برای حالت پایا از لحاظ غلظتی سه شبانه روز در نظر گرفته شد.

استفاده می‌شود مورد توجه قرار دهد. آکنه دوم از جنس پلی آمید است که از مزایای آن وزن پایین آن است.

زمان بر بودن آزمایش‌ها در مقیاس نیمه صنعتی و از طرفی ارزشمند بودن ماده مورد استفاده، مواردی است که لزوم ارائه مدل برای کاهش زمان و هزینه را بیشتر نمایان می‌سازد. در این پژوهش پس از انجام آزمایش‌های مورد نظر، رفتار آکنه شبه دیکسون با یکی از مدل‌های موجود در منابع مطابقت داده شد و ضرائب مدل به گونه‌ای اصلاح شد تا در شرایط کاری این پژوهش بتواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش و مراحل تحقیق

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این کار از فرایند تقطیر و برج پرشده استفاده شد. از آنجا که هدف، جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن است از آب سنگین با غنای ۱۱٪ استفاده شد.

آکنه حلقه راشیگ^۱ از جنس پلی آمید با توجه به سبکی و استحکام آن و آکنه طرح حلقه دیکسون از جنس فولاد زنگ نزن، بخاطر مقاومت آن در برابر خوردگی برای آزمایش‌ها استفاده شد.

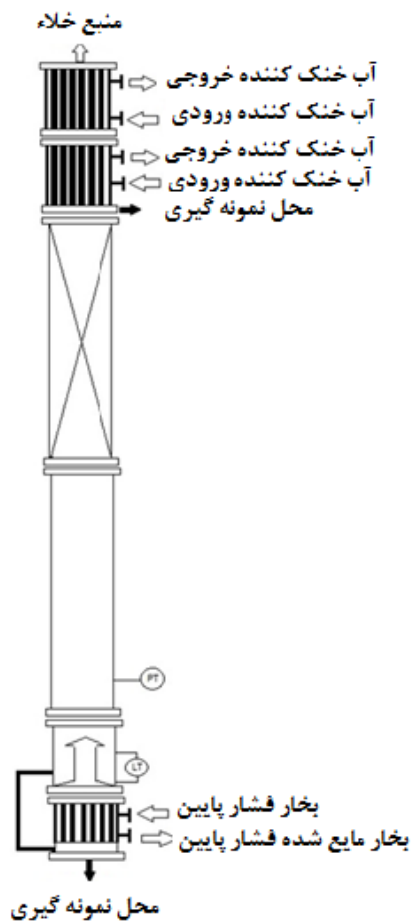
آکنه طرح دیکسون با الگو برداری از آکنه دیکسون ساخته شده و لذا به آن طرح دیکسون گفته می‌شود و ساختاری مانند حلقه لسینگ^۲ دارد و با توجه به اینکه آکنه‌های دیکسون ارتفاع معادل کمی دارند، این آکنه برای آزمایش انتخاب شد. نکته دیگری که در انتخاب این آکنه مد نظر بود جنس آن بود، چون فولاد زنگ نزن در برابر خوردگی در سیستم‌های مشابه مقاومت خوبی دارد. داده‌های ساختاری آکنه دیکسون که توسط این شرکت ارائه شده است در فضای شبکه اینترنت قابل جستجو است.

ارتفاع و قطر خارجی آکنه پلی آمیدی ۵ mm و قطر داخلی آن ۴ mm است. زاویه تماس آب در این آکنه ۵۶ درجه گزارش شده که خیلی کمتر از زاویه تماس فولاد است و لذا این آکنه آب دوست تر از آکنه فولادی است. با توجه به پلیمری بودن این آکنه، احتمال اینکه بر روی مشخصات شیمیایی آب مورد

6 Fenske Equation
7 Condenser
8 Pressure Transmeter
9 Level Transmeter
10 Hold Up

1 Raschig Ring
2 Lessing Ring
3 Reboiler
4 Shell & tube
5 Thermosiphon

اما از تغییرات فشار چشم پوشی می‌شود. دلیل آن این است که در محدوده‌ی کاری این آزمایش، ضریب فراریت نسبی، تغییرات بسیار کمی با تغییرات فشار دارد. در مجموع در این پژوهش با تغییر جریان جوش‌آور (برگشتی) تغییرات ارتفاع معادل بررسی شد.



شکل ۱ - نمایی از برج پایلوت

برای نمونه گیری، یک نقطه در بالای برج در زیر چگالنده و یک نقطه پایین برج در قسمت پایین جوش‌آور، تعیین شده است. نمونه‌ها هر روز صبح گرفته و با استفاده از دستگاه FTIR^۱ آنالیز شد. با توجه به اینکه برج تحت خلأ کار می‌کند نقطه نمونه گیری دارای دو شیر است که ابتدا شیر نزدیک به برج باز می‌شود و مقداری مایع وارد خط نمونه گیری می‌شود و پس از آن شیر نزدیک به برج بسته و شیر دوم باز می‌شود و نمونه گیری انجام می‌شود.

برج به خوبی عایق شده است تا از اتلاف گرما ممانعت به عمل آید. شکل (۱) نمایی از برج مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این تحقیق میزان مایع خروجی از جوش‌آور و بعد از تله بخار اندازه گیری شد، این مایع معیاری از جریان برگشتی در برج است. با توجه به عایق کاری بسیار خوب برج، بخار در حالت فوق اشباع وارد جوش‌آور شده و تمام گرمای خود را به مایع پایین برج می‌دهد (با توجه به تله بخار نصب شده در خروجی مسیر بخار، مشاهده شد که فقط آب به حالت مایع اشباع خارج می‌شود). با داشتن دما و فشار، انرژی بخار مورد استفاده در جوش‌آور قابل محاسبه است. همچنین با داشتن فشار پایین برج مقدار بخار تولیدی در پایین برج محاسبه می‌شود. از آنجایی که برج در حالت جریان برگشتی کامل^۲ کار می‌کند، تمام بخار در چگالنده تبدیل به مایع شده و به سمت پایین حرکت می‌کند. با توجه به محاسبات انجام شده می‌توان گفت که تفاوت جریان جوش‌آور و جریان برگشتی در محدوده مورد آزمایش ۱۰٪ تا ۱۱٪ است. پس هر جا صحبت از جریان جوش‌آور می‌شود در واقع منظور همان جریان برگشتی با اختلاف ذکر شده است. برای توضیحات بیشتر در مورد دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها به کار قبلی نویسندگان مراجعه شود [۲۱].

۲-۲- روش تحقیق

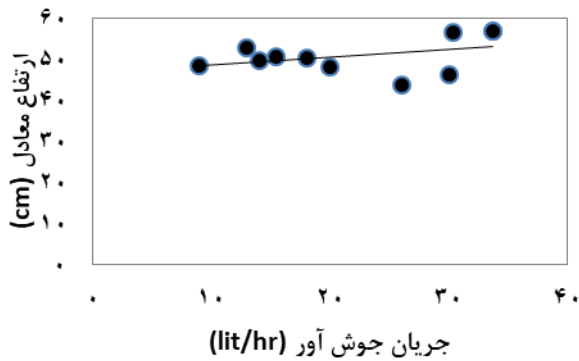
آزمایش‌ها به روش یک متغیر در زمان^۳ انجام شد، بدین صورت که میزان جریان برگشتی برج از مقادیر نزدیک به ۱۰ lit/hr تا نزدیک به ۴۴ lit/hr تغییر داده شد. با تغییر جریان برگشتی، فشار نیز مقداری تغییر خواهد کرد. علت انتخاب این شرایط برای آزمایش این است که در برج‌های واقعی نیز با تغییر مقدار جریان برگشتی، فشارها تغییر خواهد کرد. لذا در این آزمایش دو متغیر میزان جریان جوش‌آور و فشار تغییر می‌کند

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آکنه طرح حلقه دیکسون

در مورد آکنه‌ی طرح حلقه دیکسون در یک فشار تقریباً ثابت، جریان جوش‌آور افزایش داده شد، همان‌طور که اشاره شد جریان جوش‌آور معیاری از جریان برگشتی است. در این آزمایش‌ها، جریان جوش‌آور در بازه ذکر شده تغییر داده شد و نمودار (۱) به دست آمد. نمودار (۲) ناحیه خطی از نمودار (۱)

(۱) که برای مدلسازی انتخاب شد، معادل فاصله A تا B در نمودار مذکور است. فاصله نقطه B تا F گرچه معیاری برای طراحی قرار نمی‌گیرد اما از نظر عملیاتی دست یافتنی است [۲۳].



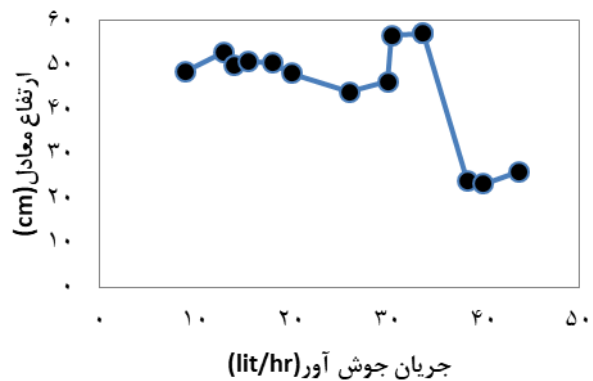
نمودار ۲- قسمت خطی نمودار (۲) که برای مدلسازی انتخاب شد.

۲-۳- مدل سازی

مدل‌های ارائه شده برای پدیده‌های واقع شده در یک دستگاه، از داده‌های زیادی در آن زمینه بدست آمده است. اشکال این مدل‌ها این است که بعضاً با وجود اینکه در آنها از اعداد بدون بعد استفاده شده، در مواردی که مواد و دستگاه مورد استفاده با مواد و دستگاهی که برای بدست آوردن مدل استفاده شده متفاوت باشد، از دقت خوبی برخوردار نیستند. این مطلب در مورد برج‌های پر شده هم صدق می‌کند. لذا ایده اصلاح مدل مورد بررسی قرار گرفت.

در مدل هانلی - چن، که در قسمت مرور سوابق تحقیق به آن اشاره شد، در ابتدا رابطه‌ای برای ارتفاع معادل مرحله‌ای ارائه شده و سپس رابطه (۱) برای برآورد ارتفاع معادل پیشنهاد شده است که در این رابطه $\langle HETP \rangle$ ارتفاع معادل متوسط است. در ادامه با استفاده از آنالیز ابعادی فرض می‌شود ضرائب انتقال جرم در فاز مایع و بخار به سرعت، دانسیته، ویسکوزیته، غلظت مولی (مول بر لیتر)، ضریب نفوذ و قطر معادل وابسته‌اند. این وابستگی برای ضرائب انتقال جرم در فاز بخار و مایع به ترتیب با معادلات (۲) و (۳) نشان داده شده است.

است که این ناحیه، مناسب برای طراحی است و برای مدل‌سازی انتخاب شد. در این ناحیه یک خط رسم شد که معادله آن می‌تواند فرمولی برای محاسبه ارتفاع معادل در حالت یک متغیر در زمان باشد.



نمودار ۱- تغییر ارتفاع معادل بر حسب جریان جوش آور برای آکنه طرح دیکسون.

در توجه رفتار ارتفاع معادل با افزایش جریان برگشتی، باید گفت که با افزایش جریان بخار، جریان مایع افزایش می‌یابد و تجمع روی آکنه‌ها را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه این آکنه به خوبی آب دوست نیست، افزایش مایع (تجمع مایع در بستر) کمتر مفید واقع می‌شود. به عبارت دیگر این تجمع در سطوح آکنه به خوبی صورت نمی‌گیرد و لذا سطح تماس افزایش نمی‌یابد و منجر به افزایش راندمان نمی‌شود، پس راندمان مقداری کاهش می‌یابد. در ادامه با افزایش جریان برگشتی تجمع مایع در بستر آنقدر زیاد می‌شود که به ناچار این تجمع روی سطوح آکنه‌ها هم اتفاق می‌افتد و لذا ارتفاع معادل کاهش و یا راندمان افزایش می‌یابد. این کاهش ارتفاع معادل در حالت جریان جوش آور نزدیک به ۴۰ lit/hr در نمودار (۱) اتفاق می‌افتد.

نمودار (۱) که در این پژوهش بدست آمده، معادل نمودار تغییر ارتفاع معادل (بازده برج) نسبت به شدت جریان گاز و مایع است که در منبع ۲۲ آمده است (نمودار مربوط به آکنه های نامنظم از نقطه A تا نقطه F) [۲۲]. قسمت خطی نمودار

(HETP)

$$= \frac{Gd_e}{\left(\dot{A}_M \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^A \left(\frac{\mu_V}{\mu_L} \right)^B (Re_L^X)(Fr_L^\Delta)(We_L^E)(Re_V^\Phi) a_d \right)} \quad (7)$$

$$\times \left(\frac{C_y}{\dot{A}_V Re_V^m Sc_V^n c_V D_V} + \frac{C_x}{Re_L^b Re_L^c c_L D_L} \right)$$

$$\langle HETP \rangle = \frac{Z}{N} = \frac{G}{a_m} \left(\frac{C_y}{k_y} + \frac{C_x}{k_x} \right) \quad (1)$$

$$k_y = K_y(v_V, \rho_V, \mu_V, c_V, D_V, d_e) \quad (2)$$

$$k_x = K_x(v_L, \rho_L, \mu_L, c_L, D_L, d_e) \quad (3)$$

در این مرحله با بررسی کارهای گذشته و با استفاده از رابطه بین شروود، رینولدز و اشمیت فرض می‌شود که رابطه بین سه عدد بدون بعد به صورت روابط (۸) و (۹) باشد :

$$sh_V \propto Re_V^{1/2} Sc_V^{1/3} \quad (8)$$

$$sh_L \propto Re_L^{1/3} Sc_L^{1/2} \quad (9)$$

در این مدل‌سازی رفتار HETP بر حسب C_S نشان داده شده است. C_S یک نوع سرعت ظاهری اصلاح شده با جرم ویژه است که از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$C_S = \sqrt{\rho_V / (\rho_L - \rho_V)} \quad (m/sec) \quad (10)$$

هانلی و چن پس از انجام محاسبات با استفاده از روش حداقل مربعات خطا، برای آکنه حلقه پال فلزی در جداسازی نرمال هپتان و سیکلوهگزان، ضرائب معادلات را بدست آوردند.

با توجه به تفاوت‌های موجود در بین آزمایش‌های حلقه-های طرح دیکسون و حلقه‌های پال فلزی و تفاوت در مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها، لازم است تا این ضرائب برای آزمایش آکنه‌های طرح حلقه دیکسون تعیین شود.

برای اینکار یک سری پارامترها لازم است، از جمله خواص فیزیکی آب با حضور دوتریوم در غلظت مورد آزمایش، که برای بدست آوردن این خواص از نرم افزار ASPEN HYSYS 10 استفاده شد. خواص فیزیکی استخراج شده از نرم افزار، دانسیته، ویسکوزیته فاز مایع و بخار و کشش سطحی فاز مایع هستند. با داشتن شدت جریان جرمی جوش‌آور، همان طور که قبلاً بدان اشاره شد، می‌توان شدت جریان جرمی جریان برگشتی و سرعت مایع و بخار را محاسبه نمود. برای تبدیل غلظت از درصد مولی

که C_y و C_x فاکتورهای تصحیح، G فلاکس مولی ظاهری بخار، k_y و k_x ضرائب انتقال جرم در فاز مایع و بخار، Z ارتفاع بستر، N تعداد مراحل کمینه و a_m سطح ویژه آکنه که در انتقال جرم شرکت می‌کند، می‌باشند.

با استفاده از تئوری π -باکینگهام، ارتباط بین سه گروه بدون بعد بدست می‌آید که نشان می‌دهد عدد شروود وابسته به دو عدد رینولدز و اشمیت است. این روابط برای دو فاز مایع و بخار نوشته می‌شوند که روابط (۴) و (۵) هستند. در واقع این عبارات، ضرائب انتقال جرم در فاز مایع و بخار را درون خود دارند. بعد از آن تعریفی برای کسر سطح انتقال جرم $\frac{a_m}{a_d}$ آمده است. فرض می‌شود که کسر سطح انتقال جرم تابعی از دانسیته، ویسکوزیته، سرعت در فاز مایع و بخار، قطر معادل و ثابت گرانش است. ، رابطه (۶) صورت ریاضی این تعریف را نشان می‌دهد.

$$sh_v = \frac{k_y d_e}{c_v D_v} = A_v Re_V^m Sc_V^n \quad (4)$$

$$sh_L = \frac{k_x d_e}{c_L D_L} = A_L Re_L^b Sc_L^c \quad (5)$$

$$\frac{a_m}{a_d} \quad (6)$$

$$= A_M \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^A \left(\frac{\mu_V}{\mu_L} \right)^B (Re_L^X)(Fr_L^\Delta)(We_L^E)(Re_V^\Phi)$$

a_d سطح ویژه خشک آکنه یا همان سطح ویژه‌ای است که توسط سازنده ارائه می‌شود. در آخر، رابطه ارتفاع معادل متوسط بصورت رابطه (۷) در می‌آید :

$$D_{12} = N_1 D_2 + N_2 D_1 \quad (14)$$

به مولار (مول بر لیتر) از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$(11) \quad \frac{11 \text{ mol } D_2O}{100 \text{ mol}(D_2O + H_2O)} \times \frac{1 \text{ mol } (D_2O + H_2O)}{M(18.33)gr} \times \frac{1000gr}{1kg} \times \frac{\rho kg}{m^3} \times \frac{m^3}{1000 \text{ lit}}$$

که در این رابطه، D_{12} ضریب نفوذ متقابل اجزا ۱ و ۲ و N_1 و N_2 کسر مولی جزء ۱ و ۲ (جزء ۱ آب معمولی و جزء ۲ آب سنگین) می‌باشند.

در نهایت با استفاده از درون‌یابی، ضرائب نفوذ برای دماهای مورد آزمایش محاسبه شد (نتایج حاصل از محاسبات نیز نتایج درون‌یابی را تایید کرد).

با داشتن اطلاعات لازم مربوط به مدل که در بالا ذکر شد و استفاده از نرم افزار و استفاده از روش حداقل مربعات خطا، ضرائب و توان‌های مربوط به معادلات برای آکنه طرح حلقه دیکسون در آزمایش جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن بدست آمد. نمودار (۳) نقاط آزمایشگاهی و مدل برازش شده با روش حداقل مربعات خطا را نشان می‌دهد.

لذا می‌توان غلظت C_L برای فاز مایع را از درصد مولی به mol/lit تبدیل نمود. برای فاز بخار با استفاده از رابطه (۱۲) می‌توان درصد دوتریوم فاز بخار را تعیین و سپس از رابطه (۱۱) برای بدست آوردن غلظت (C_V) برحسب mol/lit استفاده نمود. y^* معرف کسر مولی فاز بخار در حالت تعادل است.

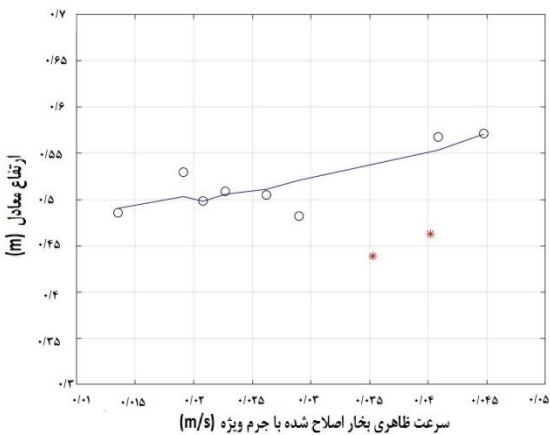
$$(12) \quad y^* = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

برای بدست آوردن ضریب نفوذ در فاز بخار از رابطه (۱۳) استفاده شد [۲۴].

$$(13) \quad D_{AB} = \frac{1.00 \times 10^{-8} T^{1.75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P[(\sum_A v_i)^{1/3} + (\sum_B v_i)^{1/3}]^2}$$

که در این رابطه P فشار بر حسب atm، T دما برحسب K و M_A و M_B جرم مولکولی آب معمولی و آب سنگین است و برای بدست آوردن $\sum_A v_i$ و $\sum_B v_i$ از جدول ارائه شده در منبع ۲۴ استفاده شد.

در مورد ضریب نفوذ در فاز مایع، D_L ، از داده‌های داهال^۱ و آدھیکاری^۲ [۲۵] استفاده شد. داده‌های مربوط به نفوذ خود به خودی^۳ مربوط به آب سنگین و آب معمولی برحسب دما در جداول موجود در منبع ۲۵ آمده است. با استفاده از معادله (۱۴) که به معادله دارکن^۴ معروف است می‌توان ضریب نفوذ متقابل را بدست آورد [۲۵].



نمودار ۳- داده‌های آزمایشگاهی و مدل برازش شده با روش حداقل مربعات خطا.

از نقاط قرمز رنگ که به صورت ستاره نشان داده شده‌اند با توجه به نقاط دیگر آزمایش چشم پوشی شد. در نهایت معادلات اصلاح شده به صورت معادلات (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) بدست آمد :

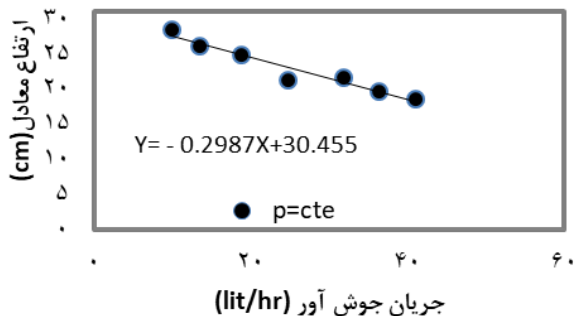
$$(15) \quad k_x = 1.0 Re_L^1 Sc_L^{1/3} \left(\frac{c_L D_L}{d_e} \right)$$

3 Self Diffusion
4 Darken

1 Dahal
2 Adhikari

استفاده از نتایج این آزمایش نمودار (۵) رسم شد.

اگر در بازه نرخ جریان برگشتی یکسان، دو نمودار مقایسه شوند، این نکته استنباط می‌شود که در حالت فشار ثابت و فشار متغیر ارتفاع معادل مشابهی بدست خواهد آمد، که این خود به طور کیفی تاییدی بر بی‌اثر بودن فشار در این بازه است.



نمودار ۴- ارتفاع معادل آکنه پلی‌آمید بر حسب جریان جوش آور در فشار ثابت.

نکته دیگر اینکه در بازه مورد آزمایش، شکل نمودار خطی است. به این معنا که تغییر تندی در ابتدا یا انتهای بازه ندارد. البته به این معنا نیست که در خارج این بازه این حالت اتفاق نمی‌افتد، وقوع یا عدم وقوع این حالت با انجام آزمایش مشخص خواهد شد.

در این آزمایش‌ها در زیر نقاط کمینه جریان برگشتی، تجمع آب در بالای برج وجود نداشت و امکان نمونه‌گیری نبود. به عبارت دیگر آن قدر بخار به بالای برج نمی‌رسید تا پس از مایع شدن در چگالنده بتوان از آنجا نمونه‌گیری کرد. در نقاط بالاتر از نقطه بیشینه جریان برگشتی، چگالنده توان مایع کردن همه بخار ورودی را نداشت. لذا بخاری که حاوی مقادیر زیادی دوتریوم بود از بالای برج وارد منبع خلأ شده و تلف می‌شد. پس میزان جریان برگشتی با توجه به دو محدودیت فوق در این نواحی انتخاب شد.

در توجیه رفتار بازده آکنه پلی‌آمید، این نکته لازم به ذکر است که آب دوستی این آکنه نسبتاً خوب است و افزایش جریان برگشتی، باعث افزایش سطح تماس روی آکنه‌ها می‌شود و

$$k_y = 0.0099 Re_V^{-1} Sc_V^{1/3} \left(\frac{c_V D_V}{d_e} \right) \quad (16)$$

$$\frac{a_m}{a_d} = 0.4204 Re_V^{0.0954} Re_L^{-0.0288} We_L^{-0.0121} \quad (17)$$

$$Fr_L^{-0.009} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{-0.0531} \left(\frac{\mu_V}{\mu_L} \right)^{-0.049}$$

۳-۳- ارزیابی مدل

مدل ارائه شده با دو نقطه مورد ارزیابی قرار گرفت و با ارتفاع معادل بدست آمده از طریق آزمایش مقایسه شد که نتایج مقایسه، مطلوب ارزیابی شد. جدول (۱) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل ارائه شده بر اساس خط برازش شده بر نقاط را نشان می‌دهد.

جدول (۱) ارزیابی مدل

خطا %	جریان برگشتی (Lit/hr)	ارتفاع معادل محاسبه شده با مدل (cm)	ارتفاع معادل بدست آمده از آزمایش (cm)
۱۴	۲۳	۵۱/۲۱	۴۴/۹۳
۰/۵	۳۳/۰۶۶	۵۳/۱۸	۵۲/۹۷

۳-۴- آکنه پلی‌آمید

در مورد آکنه پلی‌آمید با توجه به تجربه آزمایش‌های آکنه طرح دیکسون، در دو حالت، آزمایش‌ها انجام شد. آزمایش‌های سری اول در فشار ثابت و جریان‌های برگشتی متغیر انجام شد و نمودار (۴) بدست آمد، که نشان می‌دهد که با افزایش جریان برگشتی، میزان ارتفاع معادل کاهش می‌یابد.

در ادامه، چون در شرایط عملیاتی واقعی با تغییر جریان برگشتی، فشار بالا و پایین برج‌ها متغیر است، آزمایش دیگری انجام شد که در آن فشار نیز همراه با جریان برگشتی تغییر کرد (مانند آزمایش آکنه طرح حلقه دیکسون). به این صورت که در هر آزمایش جریان جوش آور تنظیم شد و با توجه به این جریان و توان منبع خلأ، فشار یک مقدار به خود اختصاص داد. با

با توجه به محدوده مجاز این پارامترها، نتایج بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است، آب پس از آزمایش Tur، TOC و EC بالایی دارد که این نکته، هرگونه استفاده از این آکنه را نامطلوب جلوه می‌دهد و ادامه آزمایش‌ها را غیر قابل توجیه می‌کند. لذا با توجه به موارد ذکر شده با وجود اینکه ارتفاع معادل آن در مقایسه با آکنه طرح دیکسون بهتر می‌باشد، مدلسازی روی آن انجام نشد. به عبارت دیگر آکنه پلی آمید با داشتن مزیت‌هایی چون وزن کم، آب دوستی و ارتفاع معادل بهتر از آکنه طرح دیکسون، به علت افزایش بالای Tur، TOC و EC آب مردود اعلام شد.

۴- شرایط بهینه

۴-۱- معیار ارتفاع معادل

ارتفاع معادل خود معیاری برای بازده آکنه است که کمتر بودن آن نشان دهنده بازده بهتر آکنه است و چون هم زمان غلظت بالا و پایین برج را در نظر می‌گیرد، معیار مناسبی برای مقایسه است. بر اساس این معیار، اگر قسمت خطی نمودارها را در نظر بگیریم، ارتفاع معادل آکنه پلی آمید خیلی کمتر از ارتفاع معادل آکنه طرح دیکسون است. نمودارهای (۲) و (۵) شرایط مناسبی برای مقایسه دارند.

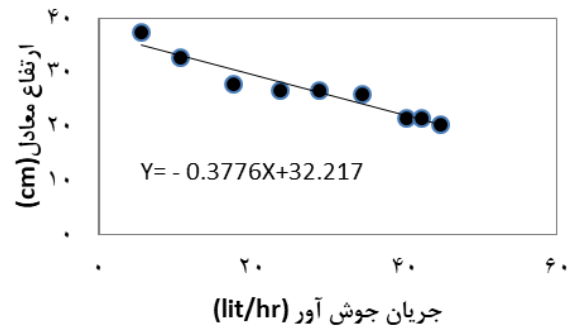
در صورتی که قسمت پایانی نمودار (۱) را در نظر بگیریم ارتفاع معادل آکنه طرح دیکسون به ارتفاع معادل آکنه پلی آمیدی نزدیک می‌شود، که همان‌طور که ذکر شد این قسمت ملاک طراحی قرار نمی‌گیرد.

در قسمت بعد، معیار دیگری با توجه به اختلاف غلظت خوراک و پایین برج تعریف می‌شود که البته به نظر می‌رسد ارتفاع معادل گزینه‌ی مناسب‌تری برای مقایسه بازده باشد.

۴-۲- معیار غلظتی

این معیار از تقسیم حاصل تفاضل غلظت پایین برج و خوراک بر غلظت خوراک بدست می‌آید که به صورت رابطه (۱۸) نشان داده می‌شود که در آن C_B و C_F به ترتیب غلظت

ظرفیت بیشتری از آکنه مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا راندمان افزایش می‌یابد [۶].



نمودار ۵- ارتفاع معادل آکنه پلی‌آمید بر حسب جریان جوش آور (فشار مقداری تغییر می‌کند).

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این نوع آکنه محدودیت دمایی دارد که البته بازه دمایی مورد آزمایش در این پژوهش در این محدوده قرار دارد. با این وجود در زمان انجام آزمایش‌ها یک حالت کدوری در نمونه‌ها مشاهده شد که با توجه به ادامه داشتن آزمایش‌ها، بررسی آن به بعد از انجام آزمایش‌ها موکول شد. در پایان، پس از تخلیه آب موجود در برج مشاهده شد که مواد معلق بسیاری در آن وجود دارد که باعث کدر شدن آن شده است. این مواد معلق در واقع لایه‌های کوچکی بود که از آکنه‌ها جدا شده بود. با توجه به این شرایط از آب جهت آنالیز کدورت^۱ (Tur.)، کل کربن عالی^۲ (TOC)، EC، PH نمونه گیری شد که نتایج آن در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) مقادیر نمونه گیری آب در آزمایش آکنه پلی آمید قبل و بعد از آزمایش.

	PH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}^4$)	Tur. (NTU ³)	TOC (ppm)
قبل از آزمایش	خنثی	۱	-	۰
پس از آزمایش	۹/۲	۲۰۲	۱۱۰	۱۵۰۰۰

3 Nephelometric Turbidity Unit (NTU)
4 Microsiemens Per Centimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

1 Turbidity
2 Total Organic Carbon

پایین برج و خوراک و R بازده است.

$$\%R = \frac{C_B - C_F}{C_F} \times 100 \quad (18)$$

هر دو معیار تفاوت چندانی با هم ندارند و شاید بتوان آن دو را تقریباً مشابه هم دانست.

۵- جمع بندی

ارتفاع معادل آکنه پلی‌آمیدی با افزایش جریان برگشتی در فشار ثابت و در حالتی که فشار با جریان برگشتی کمی افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد.

آکنه پلی‌آمیدی با داشتن مزیت‌هایی چون وزن کم، آب دوستی خوب و ارتفاع معادل کمتر، بهتر از آکنه طرح دیکسون است، ولی به علت بالا بردن TOC، Tur. و EC آب مردود اعلام شد.

ارتفاع معادل آکنه طرح دیکسون تا قبل از جریان برگشتی تقریبی ۴۰ lit/hr، با افزایش جریان برگشتی افزایش می‌یابد و بعد از آن با افزایش جریان برگشتی دچار افت ناگهانی می‌شود که در این حالت گرچه شرایط در واحدهای عملیاتی قابل حصول است اما این حالت برای طراحی در نظر گرفته نمی‌شود. مدل ارائه شده برای آکنه طرح دیکسون می‌تواند در محدوده مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد.

با هر دو روش مقایسه، اگر قسمت‌های خطی نمودارهای دو آکنه را مقایسه کنیم، راندمان آکنه پلی‌آمیدی خیلی بهتر و نزدیک به دو برابر است. چنانچه بتوان مشکلات بوجود آمده در زمان استفاده از آکنه پلی‌آمیدی را حل کرد، استفاده از این آکنه بهتر می‌باشد.

برای آکنه طرح دیکسون با توجه به معیار غلظتی، بهترین جداسازی (بازده) در سه نقطه آخر نمودار (۱) اتفاق می‌افتد که در بهترین حالت، جداسازی معادل ۱/۱۴٪ مولی و یا بازده ۱۰/۱٪ است. با این معیار در مجموع بهترین (بیشترین) جداسازی برای آکنه طرح دیکسون اتفاق می‌افتد. البته همان‌طور که قبلاً گفته شد این نقطه برای طراحی انتخاب نمی‌شود لذا تنها قسمت خطی نمودار در نظر گرفته و مقایسه انجام شد. در مجموع بهترین میزان جداسازی با معیار غلظتی در انتهای بازه جوش‌آور در نمودار (۲) است که ۰/۴۳٪ مولی یا راندمان ۳/۸٪ است. این موارد فقط بررسی بهترین نقطه از این منظر است ولی با توجه به اینکه باید روند کلی رفتار دو نوع آکنه مقایسه شود، با معیار غلظتی نیز در ناحیه خطی، راندمان آکنه پلی‌آمیدی تقریباً دو برابر طرح دیکسون است.

در مورد آکنه پلی‌آمیدی با توجه به نمودارهای (۴) و (۵) با افزایش جریان جوش‌آور میزان جداسازی افزایش می‌یابد. بیشترین میزان جداسازی ۰/۸۶٪ مولی و یا بازده ۷/۶٪ است که در انتهای بازه جریان جوش‌آور در نمودار (۵) اتفاق می‌افتد.

بطور خلاصه برای این آکنه با معیار غلظتی، بهترین راندمان در انتهای بازه جریان جوش‌آور، نمودار (۵)، و با معیار ارتفاع معادل در انتهای نمودار (۴) اتفاق می‌افتد. البته ارتفاع معادل معیار مناسب‌تری است، گرچه در مجموع این دو نقطه با

علائم اختصاری و نمادها

نماد	تعریف	نماد	تعریف
a_d	سطح ویژه خشک آکنه (m^2/m^3)	Sc_L	عدد اشمیت فاز مایع
a_m	سطح ویژه آکنه که در انتقال جرم شرکت می‌کند (m^2/m^3)	Sc_V	عدد اشمیت فاز بخار
A_L	ضریب تصحیح انتقال جرم فاز مایع	Sh_L	عدد شروود فاز مایع
A_M	ضریب تصحیح سطح انتقال جرم	Sh_V	عدد شروود فاز بخار
A_V	ضریب تصحیح انتقال جرم فاز بخار	v_V	سرعت ظاهری بخار (m/s)
c_L	غلظت مولی فاز مایع (mol/m^3)	v_L	سرعت ظاهری مایع (m/s)
c_V	غلظت مولی فاز بخار (mol/m^3)	We_L	عدد وبر فاز مایع
D	قطر برج (m)	x	جزء مولی فاز مایع
D_L	نفوذ دوتایی فاز مایع (m^2/s)	y	جزء مولی فاز بخار
D_V	نفوذ دوتایی فاز بخار (m^2/s)	α	فراریت نسبی
C_S	سرعت اصلاح شده بخار بر اساس جرم ویژه (m/sec)	μ_L	لزجت مایع (kg/m s)
C_x	فاکتور تصحیح	μ_V	لزجت بخار (kg/m s)
C_y	فاکتور تصحیح	ρ_L	جرم ویژه مایع (kg/m^3)
De	قطر معادل (m)	ρ_V	جرم ویژه بخار (kg/m^3)
Fr_L	عدد فرود در فاز مایع	Z	ارتفاع بستر (m)
G	شتاب جاذبه (m/s^2)	y^*	کسر مولی بخار در حالت تعادلی
G	فلاکس مولی ظاهری بخار ($mol/m^2 s$)	T	دما (K)
HETP	ارتفاع معادل نقطه‌ای (m)	P	فشار (atm)
(HETP)	ارتفاع معادل متوسط (m)	M_A	جرم مولکولی آب معمولی
K_x	ضریب انتقال جرم فاز مایع ($mol/m^2 s$)	M_B	جرم مولکولی آب سنگین
K_y	ضریب انتقال جرم فاز بخار ($mol/m^2 s$)	D_{12}	ضریب نفوذ متقابل آب در آب سنگین (m^2/s)
L	فلاکس مولی ظاهری مایع ($mol/m^2 s$)	N_1	کسر مولی آب معمولی
N	تعداد مراحل ایده‌آل کمینه	N_2	کسر مولی آب سنگین
Re_L	عدد رینولدز فاز مایع	C_B	غلظت در پایین برج (درصد مولی)
Re_V	عدد رینولدز فاز بخار	C_F	غلظت در خوراک (درصد مولی)
D_{AB}	ضریب نفوذ آب معمولی در آب سنگین در فاز بخار (m^2/s)		

تعدادی از علائم مربوط به ضرائب و توان‌ها صرفاً به منظور تشخیص موارد بکار رفته در فرمول‌ها استفاده شده‌اند و جهت اختصار در جدول آورده نشدند.

مراجع

- [13] Zhang, X., et al (2014) "Experimental studies of regeneration heat duty for CO₂ desorption from diethylenetriamine (DETA) solution in a stripper column packed with Dixon ring random packing", *Fuel*, 136, 261-267.
- [14] Bhattacharyya, R., K. Bhanja, and S.J.I.J.o.H.E. Mohan (2016) "Simulation studies of the characteristics of a cryogenic distillation column for hydrogen isotope separation", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(9), 5003-5018.
- [15] Dolan, M.D., et al (2017), "Deuterium enrichment using vanadium membranes", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24183-24188.
- [16] قادر دلخوشی (دی ۱۳۹۵) "تعیین HETP پکینگ‌های sulzer جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن"، پایان-نامه کارشناسی ارشد، بروجرده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرده.
- [17] Ionete, E.I., et al (2017) "Desorption of protium and deuterium from different types of titanium beds", *Fusion Engineering and Design*, 116, 61-65.
- [18] Ogawa, R., et al (2018) "Deuterium isotope separation by combined electrolysis fuel cell", *Energy*, 149, 98-104.
- [19] Christenson, M., et al (2018) "A distillation column for hydrogen isotope removal from liquid lithium", *Fusion Engineering and Design*, 135, 81-87.
- [20] Avili, M.G., J.K. Sabet, and S.M.J.P.i.N.E. Ghoreishi (2018) "Experimental characterization of a random packing with high specific surface area in a small diameter cryogenic distillation column", *Progress in Nuclear Energy*, 106, 417-424.
- [21] علیرضا فضلعلی، محسن روشنایی (۱۴۰۰) "جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن با روش تقطیر در برج پرشده"، نشریه علوم و مهندسی جداسازی، دوره سیزدهم، شماره دوم، صفحه ۹۱-۷۹.
- [22] Kister, H.Z., et al (1992) "Distillation design", *McGraw-Hill*, New York, Vol. 1.
- [23] هنری کیستر (۱۳۹۱) "طراحی تقطیر" ترجمه حمید رضا مهدی پور، سهیلا شکیب، تهران، انتشارات اندیشه سرا، چاپ اول.
- [24] Fuller, E.N., et al (1966) "New method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients", *Industrial & Engineering Chemistry*, 58(5), 18-27.
- [25] Dahal, U. and N.P.J.J.o.M.L. Adhikari (2012) "Molecular dynamics study of diffusion of heavy water in normal water at different temperatures", *Journal of Molecular Liquids*, 167, 34-39.
- [1] Bebbington, W.P, V. Thayer, and J. Proctor (1959) "PRODUCTION OF HEAVY WATER SAVANNAH RIVER AND DANA PLANTS", *Technical Manual, Dupont de Nemours (EI) & Co. Savannah River Lab, Aiken, SC.*
- [2] علیرضا فضلعلی، محمد ایل بیگی (۱۳۹۵) "فرآیندهای صنعتی تولید آب سنگین"، اراک، دانشگاه اراک، چاپ اول.
- [3] Onda, K., H. Takeuchi, and Y.J.J.o.c.e.o.J. Okumoto (1968) "Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1(1), 56-62.
- [4] Bravo, J.L., et al (1982) "Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21(1), 162-170.
- [5] Kaba, A., et al (1988) "Measurement of HETP of SUS dixon ring and porcelain packing in small-scale water distillation column for H₂O-HTO isotope separation", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 25(10), 825-830.
- [6] Yamamoto, I., et al (1989) "H₂O-HTO isotope separation by distillation of water a dynamics of HETP of SUS Dixon ring in a small packed column", *Fusion Engineering and Design*, 10, 315-318.
- [7] Shariat, A., J.G.J.I. Kunesh, and e.c. research (1995) "Packing efficiency testing on a commercial scale with good (and not so good) reflux distribution", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(4), 1273-1279.
- [8] Guangda, L., J. Guoqiang, and S.J.F.t. Cansheng (1995) "An experimental investigation for hydrogen and deuterium separation by thermal cycling absorption process", *Fusion Technology*, 28(3P1), 672-675.
- [9] Zakrzewska-Trznadel, G., A. Chmielewski, and N.J.J.o.m.s. Miljević (1996) "Separation of protium/deuterium and oxygen-16/oxygen-18 by membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 113(2), 337-342.
- [10] Aoki, K., et al (1998) "Applicability of palladium membrane for the separation of protium and deuterium", *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(5), 325-332.
- [11] Hanley, B. and C.C.J.A.j. Chen (2012) "New mass-transfer correlations for packed towers", *AIChE Journal*, 58(1), 132-152.
- [12] Ohta, T., et al (2012) "Distillation of hydrogen isotopes for polarized HD targets", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 664(1), 347-352.

Investigation and Modeling of the Effect of Reflux Ratio on the Separation Efficiency of Hydrogen's Stable Isotopes in Batch Packed Tower

Alireza Fazlali *, Mohsen Roshanaei

Department of Chemical Engineering, Arak University, Arak, Iran

ABSTRACT

Among the various methods for the separation of stable hydrogen isotopes, water distillation, despite the low separation factor, has many inherent advantages, including the absence of toxic and corrosive components of hydrogen sulfide gas, no need to use electrolysis to convert hydrogen gas to water and no need to catalyst. In this research, batch distillation in packed tower with polyamide Rashig rings and pseudo Dixon rings were made of stainless steel was used to produce heavy water and Height Equivalent to a Theoretical Plate (HETP) was obtained. Although this height was lower for polyamide packing, it was rejected due to increasing the total organic carbon (TOC) of water. Next, for the pseudo Dixon packing in the linear part of the diagram, which is optimal for designing operational units, a mathematical model was fitted to the test data, that can be used for prediction among the test interval, with very good accuracy.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: February 16, 2022

Received in revised form: November 15, 2022

Accepted: December 29, 2022

Key words:

Stable isotopes

Deuterium

Distillation,

Height equivalent to a theoretical plate.

* Corresponding author
a-fazlali@araku.ac.ir

All right reserved.