

پیش بینی ضخامت فیلم مایع و ضرایب انتقال جرم در برج های SCC به کمک آنالیز CFD

مرتضی زیوار*؛ شیروان شیردل

دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

برج های تقطیر سینی دار از نوع مخروط چرخان (SCC) یکی از انواع برجهای تقطیر می باشند که کاربرد آنها در فرایندهای جداسازی به خصوص در صنایع غذایی بسیار رو به افزایش است. پیچیدگی هندسی، رژیم های جریان متفاوت و مکانیزم های مختلف انتقال جرم در آنها باعث شده که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به دنبال توسعه هر چه بیشتر و بهینه سازی اینگونه برج ها باشیم. اکثر تحقیقات گذشته مربوط به آنالیز CFD برجهای SCC برای سیستم آب / هوا بوده است. به همین دلیل کاربرد این نتایج برای سیستم های واقعی با اشکال مواجهه است. در این تحقیق پارامتر ضخامت فیلم مایع، ضرایب انتقال جرم و HETP برای یک سیستم دفع توسط بخار شامل محلول آب / اتانول در مقیاس پایلوت در برجی با قطر داخلی ($D_c = 0.347 \text{ m}$) بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می دهد که با افزایش فاصله شعاعی از محور به تدریج از میزان ضخامت فیلم مایع کاسته می شود. این یافته با نتایج تجربی نیز مطابقت می کند. بیشترین مقدار ضخامت فیلم مایع کمتر از ۱ میلیمتر و در نزدیکی محور می باشد. ضرایب انتقال جرم در فاز مایع و در فاز گاز با افزایش سرعت جریان به میزان اندکی افزایش می یابند و تقریباً بدون تغییر باقی می مانند. مقدار متوسط این ضرایب در فاز مایع و گاز به ترتیب 0.19 و $1/42 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ می باشند. ، HETP با افزایش سرعت گاز افزایش یافت، که محدوده ی تغییرات آن بین 0.072 تا 0.246 (m) می باشد.

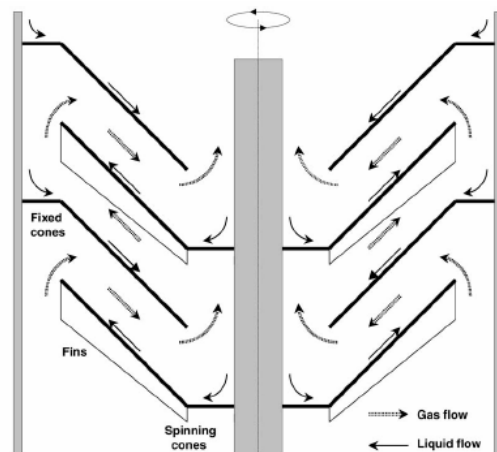
مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :
دریافت ۱۳ مهر ۱۳۸۷
دریافت پس از اصلاحات ۲۵ آبان ۱۳۸۷
پذیرش نهایی ۱۴ آذر ۱۳۸۷
کلمات کلیدی :
برج سینی دارمخروطی چرخان (SCC)
CFD
ضخامت فیلم مایع
ضرایب انتقال جرم

۱- مقدمه

بخار در برج SCC از طریق سطح وسیعی از لایه (که ممکن است کمتر از یک میلی متر ضخامت داشته باشد) و از طریق پراکندگی مایع در نواحی بین سینی های چرخان و ثابت رخ می دهد [۸]. ضخامت لایه مایع و شکل سطح آن از پارامترهای کلیدی موثر بر انتقال جرم و انتقال منتوم می باشد [۹]. مزایای SCC در مقایسه با برج های سنتی عبارتند از: کاهش ماندگی مایع (زمان اقامت مایع)، کاهش افت فشار، قابلیت چند مرحله ای خوب و قابلیت ورود خوراک با ذرات جامد معلق با نسبت بالا [۱۰]. روابطی که برای افت فشار و محدوده ی طغیان برای برج های سنتی آکنده و سینی دار توسعه یافته است، در اینجا کاملاً غیر کاربردی است که این به دلیل طراحی خاص و روابط چرخشی برای اینگونه برج می باشد [۱۱]. از سال ۱۹۹۵ برای درک اساسی فرایندهای فیزیکی در برج های SCC و بدست آوردن یک مدل کاربردی، تحقیقات متعددی انجام شده است. این تحقیقات منجر به توسعه یک مدل برای جریان فیلم مایع روی سطح سینی چرخان و بوجود آمدن اولین مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD³) برای این نوع برج ها شده است [۱۲]. در سال ۲۰۰۲، ما کاریف^۴ به همراه همکارانش در دانشگاه سیدنی استرالیا شبیه سازی CFD روی الگوهای جریان و توزیع فشار در یک برج SCC در مقیاس آزمایشگاهی (قطر ۰/۱۵ m) و در غیاب جریان مایع را انجام دادند [۵]. در سال ۲۰۰۳، لانگریش^۵ به کمک همکارانش در دانشگاه سیدنی دینامیک جریان گاز در غیاب مایع در برج SCC را با آنالیز CFD مورد مطالعه قرار دادند [۱۳]. در سال ۱۳۸۲ زیودار و هدایتی از دانشگاه سیستان و بلوچستان هیدرو دینامیک جریان گاز در غیاب جریان مایع در برجی در مقیاس آزمایشگاهی را مطالعه کردند [۴]؛ [۱۴]. در سال ۲۰۰۴ ماکاریف و همکارانش مکانیزم انتقال جرم گاز-مایع در SCC در مقیاس آزمایشگاهی با قطر داخلی پوسته (۰/۱۴۸m) و سرعت چرخش ۵۰۰ rpm برای یک سیستم آب-بخار را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵]. در سال ۲۰۰۵، ماکاریف و همکارانش تأثیرات تغییر در هندسه ی SCC (تغییر در اندازه ی گلوگاه های داخلی و خارجی) روی ظرفیت و انتقال جرم را با آنالیز CFD تحقیق کردند [۱۶]. سر انجام در سال ۲۰۰۵ ماکاریف و همکارانش مکانیزمهای انتقال جرم و رژیم عملکرد ستون را برای سه برج SCC در

برج های تقطیر از نوع سینی دار با مخروط چرخان (SCC^۱) یکی از انواع برج های تقطیر سینی دار است [۱]. کاربرد این برج ها به علت افت فشار پایین و زمان ماند کوتاه در صنایع غذایی در خصوص جداسازی و بازیافت طعم دهنده های غذایی رو به افزایش است [۲]. این برج از مخروط های چرخان و ثابت تشکیل شده است. مایع از مخروط های ثابت تحت تاثیر جاذبه پایین می آید و بوسیله نیروی گریز از مرکز از مخروط های چرخنده بالا می رود. بالای سطح سینی ها بوسیله یک لایه نازک از فیلم مایع خیس می شود [۳]. بخار از فاصله بین مخروط های ثابت و چرخنده عبور کرده و به صورت نا همسو نسبت به مایع بالا می رود [۴]. شکل (۱) بخشی از نمای داخلی برجهای SCC به همراه مسیر جریان مایع و گاز را نشان می دهد. [۵]



شکل (۱): بخشی از مسیر جریان در SCC [۵]

در روند توسعه برجهای SCC برای عملیات بازیافت اسانس، کاسمیر^۲ طراحی اولیه را با قرار دادن فین های شعاعی در قسمت زیر مخروط چرخان اصلاح کرد [۶]؛ [۷]. فین ها تا حدی به عنوان پمپ های چرخشی عمل می کنند و افت فشار گاز را در طول برج کاهش و کنترل بیشتری از فشار در برج را ایجاد می کنند. تعداد و طراحی فین ها بر توزیع فشار درون برج تاثیر می گذارند و در جداسازی موثر گاز و مایع مهم می باشند. انتقال جرم از فاز مایع به

³ Computational Fluid Dynamics

⁴ S.V. Makarytchev

⁵ T.A.G. Langrish

¹ Spinning Cone Column

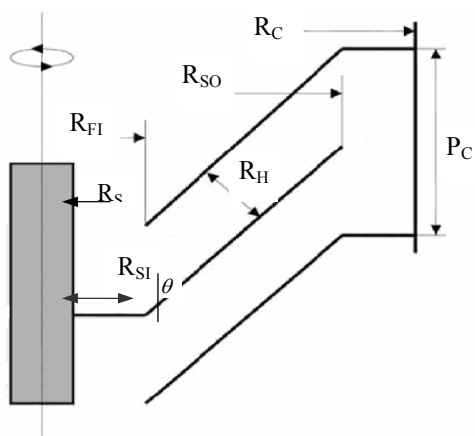
² Casimir

برج شامل ۳۰ مرحله است که در جدول (۱) و شکل (۳) اطلاعات مربوط به آن مشاهده می شود. قبل از بررسی انتقال جرم لازم است که هیدرودینامیک مدل و پارامترهای وابسته به آن بررسی شود، تا پس از اطمینان از صحت نتایج به دست آمده به تحقیق در زمینه انتقال جرم پرداخت. پارامترهای هیدرودینامیکی برج شامل افت فشار خشک و دو فاز برای سیستم آب و هوا بررسی شده اند [۱۸]. پارامترهای انتقال جرم برای سیستم آب/الکل شامل ۲/۲۵٪ مولی اتانول با چگالی (kg/m^3) ۹۵۲/۸ و فاز گاز شامل بخار آب و ۹٪ مولی بخار اتانول با چگالی (kg/m^3) ۰/۸۰۰۳۴ محاسبه شده است. با توجه به اینکه هدف از این تحقیق تخمین پارامترهای انتقال جرم در حالت پایا می باشد پس نیاز به ارزیابی پارامترهای وابسته به زمان نمی باشد.

مقیاس آزمایشگاهی (قطر داخلی ستون $D_c = 0/148$ ، پایلوت $D_c = 0/346 \text{ m}$) و تجاری ($D_c = 0/810 \text{ m}$) و برای سیستم آب / هوا بررسی کردند [۱۷]. همانگونه که از بررسی کارهای قبلی بر می آید سیستم مورد بررسی در تمام تحقیقات قبلی آب و هوا بوده که باعث می شود کاربرد نتایج آن برای سیستم های تقطیر واقعی با اشکال مواجه شود. هدف این تحقیق بررسی ضخامت فیلم مایع، پیش بینی ضرایب انتقال جرم و محاسبه HETP^6 در سیستم دفع توسط بخار^۷ فاز مایع شامل آب و اتانول در برجی در مقیاس پایلوت با قطر داخلی $(D_c = 0/347 \text{ m})$ می باشد. داده ی تجربی برای این سیستم موجود است [۱] ولی تا کنون شبیه سازی این سیستم توسط دینامیک سیالات محاسباتی گزارش نشده است.

جدول (۱): پارامترهای هندسی برج scc در مقیاس پایلوت [۱]

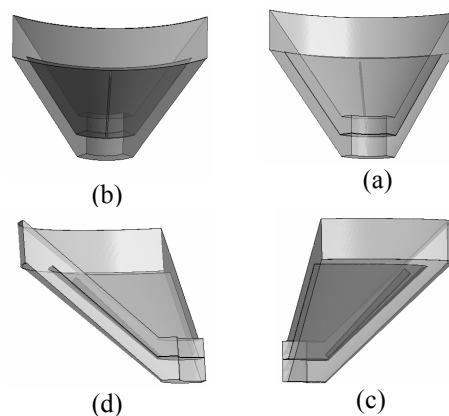
۰/۰۵۲۵	شعاع داخلی سینی چرخان، R_{SI} (متر)
۰/۱۴۵	شعاع خارجی سینی چرخان، R_{SO} (متر)
۰/۰۵	شعاع داخلی سینی ثابت، R_{FI} (متر)
۱/۲	ارتفاع برج (متر)
۰/۱۷۳۵	شعاع داخلی برج، R_C (متر)
۰/۰۳۲۵	شعاع محور چرخان (شفت)، R_S (متر)
۰/۰۴	ارتفاع سینی، Pitch (متر)
۰/۰۱۴۵	فاصله بین سینی متحرک و ثابت، R_H (متر)
۴۵	زاویه سینی (θ)
۳۰	تعداد مراحل برج (تعداد جفت سینی ها)



شکل (۳): شمای هندسی یک مرحله از برج

۲- مراحل مدل سازی

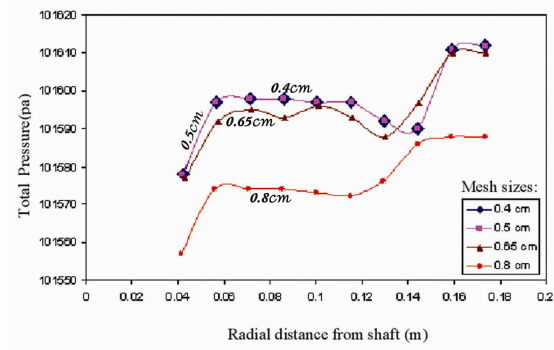
در این تحقیق یک مرحله از برج شامل دو سینی ثابت و یک سینی متحرک متصل به شفت که در زیر آن فینی قرار دارد در یک برش ۹۰ درجه به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. شمای مدل پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل مدل مورد بررسی را در ۴ نمای مختلف نشان می دهد که سینی های ثابت و متحرک و فین در آنها به وضوح دیده می شوند.



شکل (۲): مدل پیشنهادی برای انجام محاسبات: (a) نما از روبرو، (b) نما از پشت، (c) نما از چپ، (d) نما از راست

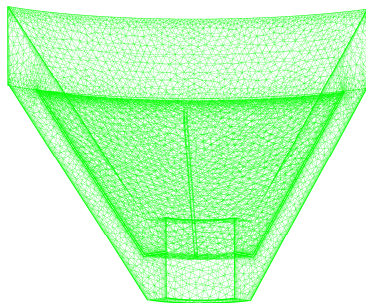
⁶ Height Equivalent to Theoretical Plate

⁷ Steam Stripping



شکل (۴): بررسی استقلال از مش توسط پارامتر فشار برای سیستم آب / هوا و سرعت چرخش ۵۰۰ rpm

نمونه ای از مدل مش بندی شده در شکل (۵) نشان داده شده است. تعداد کل مش های استفاده شده برابر ۳۲۴۷۳۹ می باشد که این تعداد برابر مجموع مش های چهار وجهی، هرمی و منشوری می باشد. تعداد مش های چهار وجهی برابر ۱۵۲۹۵۱، تعداد مش های هرمی برابر ۲۹۴۰ و تعداد مش های منشوری برابر ۱۶۸۸۴۸ می باشد.



شکل (۵): مدل مش بندی شده

۴- شرایط مرزی

با توجه به مشخص بودن سرعت، جزء حجمی و ترکیب هر فاز در بالای برج، استفاده از شرط مرزی "سرعت ورودی" در بالای برج و شرط مرزی "سرعت خروجی" در پایین برج مناسب به نظر می رسد. بدین ترتیب در یک طرف برج غلظت جزء فرارتر مشخص می باشد و غلظت در طرف دیگر برج توسط نرم افزار محاسبه خواهد شد. در شرط مرزی "سرعت ورودی"

برای مدل سازی این سیستم ابتدا تولید هندسه مدل و شبکه بندی آن توسط نرم افزار Ansys Workbench انجام، سپس هندسه شبکه بندی شده به بخش پیش پردازنده نرم افزار CFX (Ansys CFX Pre) منتقل می شود. شیوه مدل سازی، فرمول بندی حل و معادلات اساسی حاکم بر مدل انتخاب، مواد و خواص سیستم، شرایط مرزی و مقادیر اولیه مشخص شده و مدل به بخش محاسبه گر (Ansys CFX Solver) ارسال می شود. پس از شروع محاسبات و ارزیابی همگرایی، داده ها به بخش پردازش نهایی (Ansys CFX Post) ارسال می شوند.

۳- شبکه بندی مدل

ایجاد شبکه بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر مدل یکی از مهمترین بخشهای مدل سازی می باشد. با ایجاد یک شبکه بندی مناسب می توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت. بالعکس انتخاب نامناسب شبکه می تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی مناسب در محاسبات گردد. [۱۹].

در این تحقیق به علت پیچیدگی هندسه از ساختار مش نا منظم (unstructured) با شبکه های هرمی، چهار وجهی و منشوری استفاده شده است. برای انتخاب اندازه مناسب المانها، باید جوابهایی مستقل از اندازه المان به دست آیند. بدین مفهوم که با تغییر در سایز المانها، تغییری در جواب مشاهده نگردد. به همین منظور مدل مورد نظر توسط المانهایی با اندازه های مختلف ۰/۸، ۰/۶۵، ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۳ سانتی متر شبکه بندی شدند. پس از آن تغییرات پارامتر فشار در مدل مورد نظر و در فضای بین سینی ثابت بالا و سینی چرخان با فاصله شعاعی در هر یک از مدلها مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل (۴)) و مشخص شد که جوابهای حاصل از شبیه سازی در حالیکه اندازه سلولها برابر ۰/۵ و ۰/۴ سانتی متر می باشد، تقریباً یکسان می باشد. پس مش هایی با اندازه ۰/۵ سانتی متر به عنوان مش مناسب برای مدل انتخاب گردید.

۵- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

در این قسمت نتایج به دست آمده برای ضخامت فیلم مایع، ضرایب انتقال جرم و HETP به ترتیب آرایه می شوند.

۵-۱- ضخامت فیلم مایع

مکانیزم انتقال جرم در برج های SCC از نوع فیلمی است. به همین جهت تخمین ضخامت فیلم مایع که برای تعیین ضرایب انتقال جرم در فاز مایع نیز از آن استفاده می شود، از اهمیت خاصی برخوردار است. روابط مربوطه به شرح زیر است [۹]، [۲۰].

$$u_{av}(r) = \frac{Q_0}{2\pi r \sin \theta \delta(r)} \quad (1)$$

$$k_{Lav} = \left(\frac{6D_L \Gamma}{\pi \rho \delta L} \right)^{1/2} \quad (2)$$

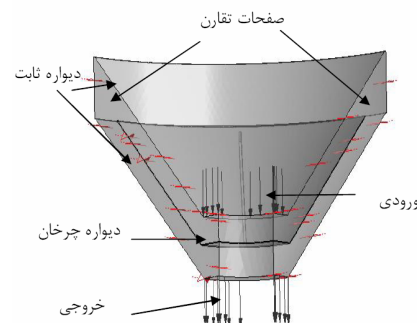
در معادلات بالا Q_0 دبی حجمی مایع، r فاصله شعاعی در طول سطح سینی مخروطی، θ زاویه سینی، u_{av} متوسط سرعت در شعاع مورد نظر، δ ضخامت فیلم مایع، D_L ضریب نفوذ در فاز مایع، L طول سینی، ρ چگالی مایع، Γ دبی جرمی مایع (kg/ms) و k_{Lav} ضریب انتقال جرم فاز مایع می باشد.

با استفاده از کد نویسی و وارد کردن روابط فوق در نرم افزار، ضخامت فیلم و سپس ضرایب انتقال جرم در فاز مایع محاسبه می شوند. در واقع سرعت متوسط کمیتی است که توسط نرم افزار محاسبه شده و سپس سایر پارامترها طبق کدهای نوشته شده برای نرم افزار محاسبه می شوند.

شکل های (۷)، (۸) و (۹) کانتورهای حاصل از سه کمیت سرعت مایع، ضخامت فیلم مایع و ضریب انتقال جرم را برای سیستم دفع توسط بخار شامل محلول آب/ اتانول در سرعت چرخش ۱۱۸۰ rpm و سرعت ورودی مایع برابر با ۰/۰۶۷ متر بر ثانیه نشان می دهد. همانگونه که در شکل ۷ دیده می شود سرعت مایع روی سینی با افزایش شعاع بیشتر می شود و از آنجاییکه ضخامت فیلم با سرعت رابطه عکس دارد مقدار آن در جهت افزایش

باید پارامترهای سرعت حقیقی فاز بخار و فاز مایع، جزء حجمی اشغال شده توسط هر فاز، غلظت جسم فرارتر در فاز بخار و مایع و وضعیت آشفستگی در هر فاز مشخص شود. این اطلاعات را می توان از مدلها و مقادیر تجربی موجود معین کرد. فاز گاز در حالت آشفته که برای آن از مدل $k - \varepsilon$ استفاده می شود و فاز مایع در حالت آرام در نظر گرفته شده است. در حالت واقعی سیستم جریان از سه فاز مایع پیوسته، مایع پراکنده و گاز تشکیل شده است. در مدل سازی بوسیله CFD بر پایه دیدگاه اوپلر سیستم جریان را به صورت دو فاز در نظر می گیریم که عبارتند از جریان گاز پیوسته (Continuous) و جریان مایع پراکنده (Dispersed) [۱۵]. برای تخمین نیروی پسا از مدل Schiller Neumann که یک مدل عام می باشد استفاده شده است. این مدل معمولاً زمانی استفاده می شود که ذرات به اندازه ای کوچک باشند که بتوان آن ها را کروی فرض کرد.

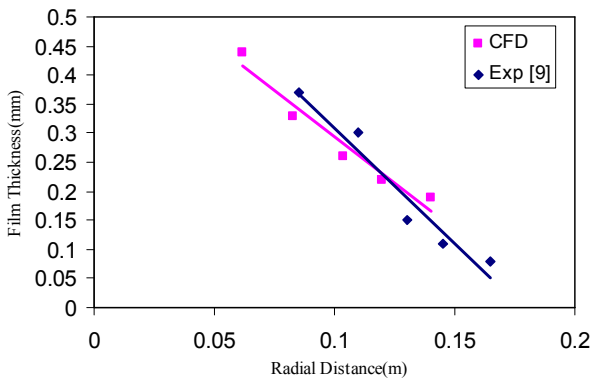
برای مشخص کردن شرط مرزی "سرعت خروجی" پارامترهای لازم سرعت حقیقی فاز گاز و مایع می باشند. شرط مرزی "دیواره" که به طور کلی برای محدود کردن نواحی تماس سیال با جامد به کار می رود، به دو صورت در نظر گرفته شده است. برای دیواره ها و سینی های مخروطی ثابت شرط مرزی "دیواره جامد" در حالت سرعت صفر برای ذرات در دیواره، و برای سینی های مخروطی چرخان و شفت از شرط مرزی "دیواره چرخان" استفاده شد. همچنین از دو صفحه ی تقارن در دو طرف مدل استفاده شده است. شرایط مرزی استفاده شده برای شبیه سازی در شکل (۶) مشاهده می شود.



شکل (۶): شرایط مرزی استفاده شده برای مدل

افزایش فاصله شعاعی

در شکل (۱۰) مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از CFD و مقادیر تجربی موجود برای سیستم آب / هوا در سرعت ورودی مایع برابر با ۰/۰۶۷ متر بر ثانیه و سرعت چرخش ۱۱۸۰ rpm، انجام شده است. تطابق نسبتاً خوبی بین مقادیر تجربی و محاسباتی وجود دارد و نتایج از روند یکسانی برخوردار می باشند. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش فاصله شعاعی از محور، ضخامت فیلم مایع کاهش می یابد. ضخامت فیلم تشکیل شده در بیشترین حالت، نزدیک به محور کمتر از یک میلیمتر می باشد.



شکل (۱۰): مقایسه ضخامت فیلم مایع محاسبه شده با داده های تجربی (سیستم آب- هوا) بر حسب فاصله شعاعی

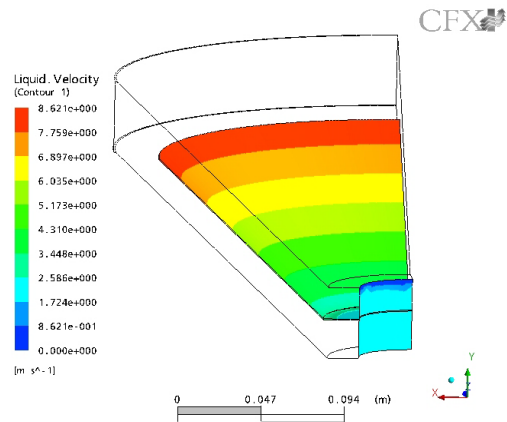
۲-۵- محاسبه ی ضرایب انتقال جرم

در قسمت قبل روابط مربوط به ضرایب انتقال جرم در فاز مایع و چگونگی تغییرات آن با ضخامت فیلم مایع آورده شد. برای محاسبات مربوط به انتقال جرم احتیاج به روابطی است که بصورت کد نویسی برای نرم افزار تعریف می شوند. برای یک مخلوط دو جزئی حاوی اجزاء A, B با این فرض که جزء A از B فرارتر است و هر دو فاز بخار و مایع حاوی دو جزء A, B می باشند، در صورتیکه سیستم به حالت تعادل نرسیده باشد، انتقال جرم بین فاز گاز و مایع انجام خواهد گرفت. با توجه به نظریه دو فیلمی، شدت انتقال جرم جزء A را می توان به صورت روابط زیر بیان کرد [۱۹]:

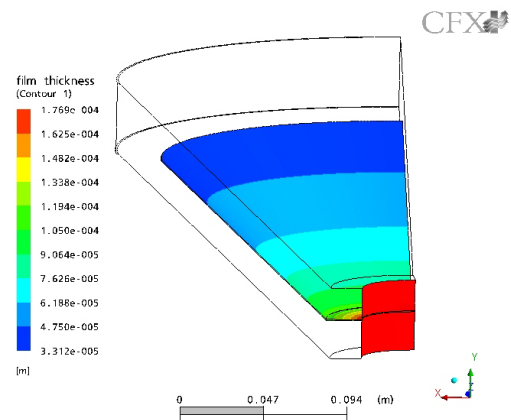
$$\dot{m}_{LG}^A = k_L a_e M_A (x_A - x_A^I) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{LG}^A = k_G a_e M_A (y_A^I - y_A) \quad (4)$$

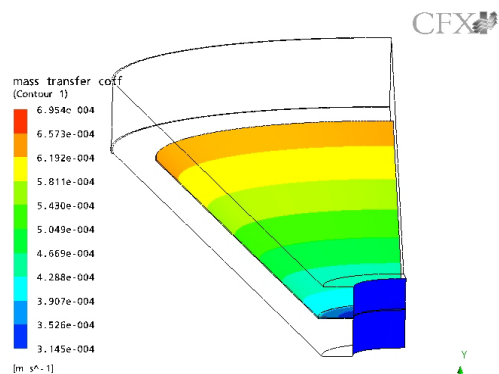
شعاع کاهش می یابد (شکل (۸)). همانگونه که مشاهده می شود در شکل (۹) ضریب انتقال جرم با افزایش فاصله ی شعاعی افزایش می یابد.



شکل (۷): کانتور های تغییرات سرعت مایع با افزایش فاصله شعاعی



شکل (۸): کانتورهای تغییرات ضخامت فیلم با افزایش فاصله شعاعی



شکل (۹): کانتور های تغییرات ضریب انتقال جرم در فاز مایع با

$$y_A^I = \frac{\alpha \left[x_A - \frac{\dot{m}_{LG}^A}{k_L a_e M_A} \right]}{1 + (\alpha - 1) \left(x_A - \frac{\dot{m}_{LG}^A}{k_L a_e M_A} \right)} \quad (10)$$

ترکیب روابط (۴) و (۱۰) منجر به رابطه زیر می گردد:

$$\frac{\alpha - 1}{k_L k_G (a_e M_A)^2} (\dot{m}_{LG}^A)^2 + \left[\frac{(\alpha - 1)y_A - \alpha}{k_L a_e M_A} - \frac{(\alpha - 1)x_A + 1}{k_G a_e M_A} \right] \dot{m}_{LG}^A + \{\alpha x_A - [(\alpha - 1)x_A + 1]y_A\} = 0 \quad (11)$$

اکنون به کمک معادله ی (۱۱) می توان مقدار \dot{m}_{LG}^A را بر حسب ضرایب انتقال جرم و سطح موثر به دست آورد. بنابراین روابط مربوط به ضرایب انتقال جرم فاز گاز و مایع و نیز سطح موثر بین فازها از جمله پارامترهایی است که باید برای نرم افزار کدنویسی شوند.

ضرایب انتقال جرم در فاز مایع با توجه به منابع موجود و اینکه می توان از روابط مربوط به فیلم ریزان استفاده نمود از رابطه (۲) محاسبه می شوند.

a_e سطح مؤثر بین فازها است و از آنجاییکه مکانیزم انتقال جرم فیلمی می باشد می توان گفت که این سطح نسبت بین سطوح تر شده و حجم برج می باشد که برای برجی در مقیاس پایلوت برابر با $55 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ است. برای بدست آوردن ضریب انتقال جرم در فاز گاز از روابط زیر استفاده می شود [۲۰]، [۳].

$$Sh_G = 3.66 + a(\text{Re}_G = 100 \log Sc_G - 1700)^b$$

$$a = [0.0165 + 0.0565(\sqrt{Sc_G} + 2)] Sc_G^{1/3} \quad (12)$$

$$b = 0.88 - 0.012/(Sc_G + 0.043)^{1/4}$$

$$Sh_G = \frac{k_g d}{D_G} \quad (13)$$

$$\text{Re}_G = \frac{u_G d}{\nu_G} \quad (14)$$

$$Sc_G = \frac{\nu_G}{D_G} \quad (15)$$

k_L و k_G به ترتیب ضرایب انتقال جرم در فاز بخار و مایع، a_e سطح مشترک موثر بین فازها، M_A جرم مولکولی جزء فرارتر، x_A و y_A جزء مولی جسم فرارتر در فاز مایع و بخار و x_A^I و y_A^I نیز جزء مولی جسم فرارتر در فصل مشترک فاز مایع و بخار می باشند.

بنابر نظریه دو فیلمی هیچ مقاومتی در برابر انتقال جرم در فصل مشترک وجود ندارد. بدین صورت x_A^I و y_A^I در حالت تعادل می باشند و رابطه تعادلی بین آنها به صورت زیر می باشد:

$$y_A^I = \frac{\alpha x_A^I}{1 + (\alpha - 1)x_A^I} \quad (5)$$

در این رابطه α فراریت نسبی می باشد. با توجه به اینکه در یک سیستم دو جزئی روابط زیر صادق می باشند:

$$x_A + x_B = 1 \quad (6)$$

$$y_A + y_B = 1 \quad (7)$$

پس رابطه تعادلی برای جزء B را می توان به صورت زیر نوشت:

$$y_B^I = \frac{\frac{1}{\alpha} x_B^I}{1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) x_B^I} \quad (8)$$

که x_B^I و y_B^I اجزاء مولی جزء B در فصل مشترک فاز مایع و بخار می باشند.

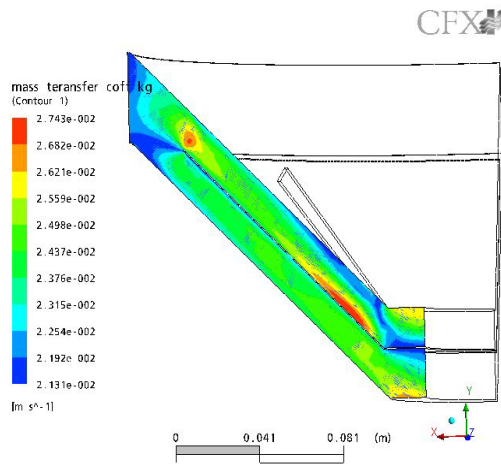
برای تحلیل انتقال جرم توسط آنالیز CFD باید پارامتر \dot{m}_{LG}^A را به صورت یک تابع برای نرم افزار تعریف کرد. برای به دست آوردن این پارامتر می توان از روابط بالا استفاده کرد.

با استفاده از رابطه (۳) داریم:

$$x_A^I = x_A - \frac{\dot{m}_{LG}^A}{k_L a_e M_A} \quad (9)$$

با جایگذاری معادله بالا در رابطه (۵) می توان به رابطه زیر دست یافت:

بر خلاف ضرایب انتقال جرم در فاز مایع که در یک دبی ثابت مایع، با تغییر ضخامت فیلم در قسمت‌های مختلف سینی چرخان تغییر می‌کند (شکل (۹))، در یک دبی ثابت گاز تغییرات ضریب انتقال جرم در فاز گاز بسیار اندک است. شکل (۱۲) کانتور های ضریب انتقال جرم در فاز گاز را در سرعت چرخش ۵۵۰ rpm و برای سرعت ثابت گاز $U_G = 0.27$ (m/s) و سرعت مایع $U_L = 0.00255$ (m/s) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این ضرایب در مدل مورد بررسی تقریباً ثابت می‌ماند. تغییرات آن در کل محدوده محاسباتی بسیار اندک است. بیشترین مقدار ضرایب انتقال جرم در حدود 0.024 (m/s) در محلی است که مایع بصورت فیلم روی سینی جریان دارد و گاز بیشترین تماس را با آن برقرار می‌کند و کمترین مقدار آن 0.021 (m/s) در کنار دیواره برج که فیلم مایع کمتر تشکیل می‌شود، می‌باشد.



شکل (۱۲): کانتور های ضریب انتقال جرم در فاز گاز (m/s)
 $U_L = 0.00255$ (m/s) و $U_G = 0.27$

۳-۵- محاسبات HETP (ارتفاع معادل یک سینی تعادلی)

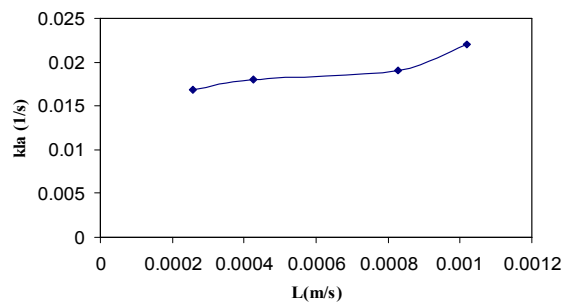
پس از محاسبه ی ضرایب انتقال جرم در فاز مایع و گاز، ارتفاع معادل یک سینی تعادلی را برای برج بدست می‌آوریم. روابط لازم به صورت زیر می‌باشند [۱]:

$$HETP = HTU_{OG} \frac{\ln \lambda}{\lambda - 1} \quad (16)$$

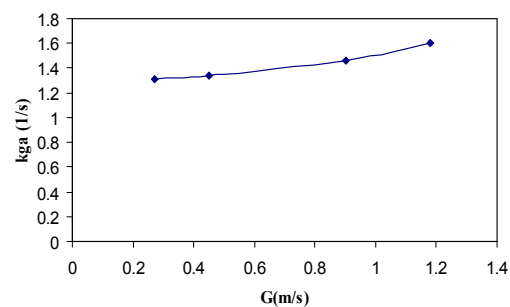
$$\lambda = \frac{mU_{GM}}{U_{LM}} \quad (17)$$

$$HTU_{OG} = HTU_G + \lambda HTU_L \quad (18)$$

در روابط بالا Re ، Sh ، SC به ترتیب اعداد بدون بعد شروود، رینولدز و اشمیت در فاز گاز می‌باشند. k_g ضریب انتقال جرم در فاز گاز، d قطر برج و D_G ضریب نفوذ در فاز گاز، U_G ویسکوزیته سینماتیکی فاز گاز و u_G سرعت در فاز گاز است که این پارامتر توسط نرم افزار محاسبه شده و سپس سایر پارامترها از طریق آن بدست می‌آیند. نتایج بدست آمده برای پیش بینی ضرایب انتقال جرم در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در شکل (۱۱الف) تغییرات ضرایب انتقال جرم در فاز مایع با افزایش سرعت مایع را در سرعت ثابت گاز برابر با 0.7 متر بر ثانیه و در شکل (۱۱ب) تغییرات ضرایب انتقال جرم در فاز گاز در سرعت ثابت مایع برابر با 0.00628 متر بر ثانیه مشاهده می‌شوند. سرعت چرخشی ۵۵۰ rpm می‌باشد. همانگونه که در شکل‌ها مشخص است تغییرات این ضرایب در محدوده ی سرعت های مورد بررسی نسبتاً کم می‌باشند و تقریباً ثابت می‌باشند.

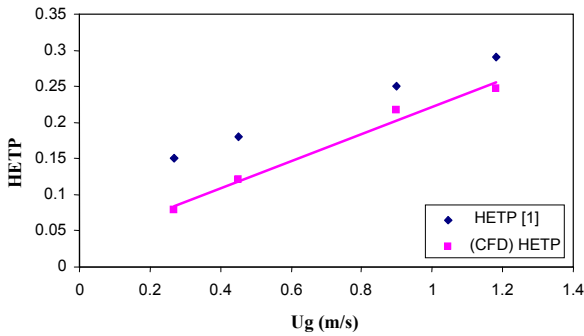


الف) تغییرات ضریب انتقال جرم در فاز مایع با افزایش سرعت جریان مایع در $G = 0.7$ (m/s)



ب) تغییرات ضریب انتقال جرم در فاز گاز با افزایش سرعت جریان گاز در $L = 0.00628$ (m/s)

شکل (۱۱): تغییرات ضرایب انتقال جرم با سرعت جریان برای سیستم دفع توسط بخار شامل آب / اتانول



شکل (۱۲): تغییرات HETP با سرعت گاز در حالت تجربی و برای CFD $U_L = 0.00628$ (m/s)

۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر خلاصه می شود:

۱- بررسی های حاصل از محاسبه ضخامت فیلم مایع نشان می دهد که این پارامتر برعکس سرعت مایع بر روی سینی چرخان تغییر می کند. یعنی در واقع با افزایش فاصله شعاعی از محور به تدریج از میزان ضخامت فیلم مایع کاسته می شود. نکته ی دیگر در مورد ضخامت این فیلم می باشد که در بیشترین حالت در نزدیکی محور مقدار آن کمتر از ۱ میلیمتر می باشد.

۲- پیش بینی های حاصل از ضرایب انتقال جرم نشان می دهد که این ضرایب چه در فاز مایع و چه در فاز گاز با افزایش سرعت جریان به میزان اندکی افزایش یافته و تغییرات این ضرایب در محدوده سرعت های مورد بررسی نسبتاً کم می باشد. محدوده این ضرایب در فاز گاز از $(1/31 s^{-1})$ تا $(1/6 s^{-1})$ می باشد که در مقابل افزایش ۳۳۰٪ سرعت گاز تنها در حدود ۲۰٪ افزایش یافته است. در فاز مایع تغییرات این ضرایب از $(0.0168 s^{-1})$ به $(0.022 s^{-1})$ می باشند که در برابر افزایش ۳۰۰٪ سرعت مایع تنها ۳۰٪ افزایش یافته است. علاوه بر این، در یک سرعت ثابت گاز و مایع ضرایب انتقال جرم در فاز مایع معمولاً روی سینی چرخان بر خلاف ضخامت فیلم با افزایش فاصله ی شعاعی افزایش می یابد، در صورتیکه مقدار این ضریب در فاز گاز تغییرات اندکی داشته و تقریباً ثابت است.

$$HTU_L = \frac{U_L}{k_L a} \quad (19)$$

$$HTU_G = \frac{U_G}{k_g a} \quad (20)$$

که در این روابط HTU^8 ارتفاع واحد انتقال، برای فاز گاز، مایع و کلی می باشد، λ نسبت ضریب زاویه خط تعادل به خط تبادل، m شیب خط تعادل که در اینجا $6/32$ است. U_L و U_G سرعت، U_{LM} و U_{GM} سرعت مولی در فاز گاز و مایع و HETP ارتفاع معادل یک مرحله تعادلی می باشد.

لازم به ذکر است برای محاسبه HETP باید ضرایب انتقال جرم بدست آمده از نرم افزار در حالت جذب را به کمک روابط زیر به ضرایب انتقال جرم در حالت تقطیر تبدیل نمود [۱].

$$\frac{(k_L a)_{dis}}{(k_L a)_{abs}} = \left(\frac{(D_L)_{abs}}{(D_L)_{dis}} \right)^{1/2} \quad (21)$$

$$\frac{(k_G a)_{dis}}{(k_G a)_{abs}} = \left(\frac{(Sc_G)_{dis}}{(Sc_G)_{abs}} \right)^{1/2} \quad (22)$$

در روابط بالا، Sc عدد بدون بعد اشمیت، D_L ضریب نفوذ مولکولی در فاز مایع، $k_L a$ و $k_G a$ ضرایب انتقال جرم در فاز مایع و گاز بر حسب (s^{-1}) برای دو حالت جذب (abs) و تقطیر (dis) می باشند.

پس از تبدیل ضرایب انتقال جرم خروجی از نرم افزار در حالت تقطیر، HETP با استفاده از روابط (۱۶) تا (۲۰) و برای سرعت های مختلف گاز و مایع محاسبه شده و نتایج در جدول (۲) و شکل (۱۳) آمده است. این مقادیر همچنین با مقادیر پیش بینی شده در مراجع مقایسه شده است [۱]. همانطور که از جدول (۲) و شکل (۱۳) مشاهده می شود، با افزایش شدت جریان گاز، HETP از 0.072 به 0.246 متر افزایش می یابد. بین نتایج CFD و مراجع تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. متوسط خطای نسبی ۲۷ درصد می باشد.

⁸ Height of Transfer Unit

۳- محاسبه ی HETP و مقایسه با مقادیر پیش بینی شده در مراجع نشان می دهد که با افزایش سرعت گاز، ارتفاع معادل یک مرحله ی تعادلی از (m) ۰/۰۷۲ به خوبی (خطا ۲۷٪) با داده های گزارش شده در مراجع موجود است.

۳- محاسبه ی HETP و مقایسه با مقادیر پیش بینی شده در مراجع نشان می دهد که با افزایش سرعت گاز، ارتفاع معادل یک مرحله ی تعادلی از (m) ۰/۰۷۲ به

جدول (۲) : مقایسه HETP با مقادیر گزارش شده در مراجع

U_L (m/s)	U_G (m/s)	$k_L a$ (abs)	$k_L a$ (dis)	$k_G a$ (abs)	$k_G a$ (dis)	HETP [1]	HETP (CFD)
0.00102	1.18	0.022	0.032	1.6	2.032	0.29	0.246
0.000828	0.9	0.019	0.0275	1.457	1.85	0.25	0.217
0.000425	0.45	0.018	0.026	1.34	1.7	0.18	0.12
0.000255	0.27	0.0168	0.024	1.31	1.66	0.15	0.072

مراجع

- [10] M. Zivdar, R.G.H. Prince, "Pressure Drop and Mass Transfer in the Spinning Cone Distillation Column", 5th National and 4th International Chemical Engineering Congress, Shiraz, Iran, (2000) 250-259.
- [11] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, "Pressure Drop and Flooding Limit in Spinning Cone Columns", Chem. Eng. Comm, 192 (2005) 445-473.
- [12] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, "Dry Column Approximation for Pressure Drop in Spinning Cone columns", Chem. Eng. Comm, 191 (2004) 641-664.
- [13] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, D.F. Fletcher, R.G.H. Prince "Progress In Understanding The Physical Processes Inside spinning Cone Column", Chemical Engineering Journal, 87 (2002) 301-311.
- [۱۴] مرتضی زیودار، بهنام هدایتی، "تحلیل جریان گاز در برج های SCC با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال سوم، شماره ۱۱، ۱۳۸۳، ۲۶-۳۳.
- [15] S.V. Makarytechev, T.A.G. Langrish, D.F. Fletcher, "Mass Transfer Analysis of Spinning Cone Columns Using CFD", Chemical Engineering Research and Design, 82 (2004) 752-761.
- [16] S.V. Makarytechev, T.A.G. Langrish, D.F. Fletcher, "Exploration of Spinning Cone Column Capacity and Mass Transfer Performance Using CFD", Chemical Engineering Research and Design, 83 (2005) 1372-1380.
- [17] S.V. Makarytechev, T.A.G. Langrish, D.F. Fletcher, "CFD Analysis Of Scale Effects In Spinning Cone Columns", Chemical Engineering Research and Design, 83 (2005) 951-958.
- [۱۸] شیروان شیردل، مرتضی زیودار، ایمان خنشا، جعفر لیلا پور، مسعود حق شناس فرد، "تخمین افت فشار خشک در برج سینی دار مخروطی چرخان SCC با استفاده از آنالیز CFD"، اولین کنفرانس ملی کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در مهندسی
- [1] M. Zivdar, "Distillation for Food Flavour Separation", Ph.D. Thesis, University of Sydney, Australia (1998).
- [۲] سید محمد رضا میر پوریان، "طراحی برج های SCC در مقیاس پایلوت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۲.
- [3] M. Zivdar, T.A.G. Langrish, R.G.H. Prince, "Comparison of Mass Transfer Efficiencies of SCC and Structured Packing", International Journal of Engineering, Vol.14, 1,1-8 (2001).
- [۴] بهنام هدایتی، "آنالیز CFD برج های تقطیر از نوع SCC"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۲.
- [5] T.A.G. Langrish, S.V. Makarytechev, D.F. Fletcher, "CFD Analysis of Spinning Cone Columns: Prediction of Unsteady Gas Flow and Pressure Drop in a Dry Column", Chemical Engineering Journal, 87 (2002) 301-311.
- [6] D.J. Casimir, "Technological Aspects of the Production of Concentrates of Passion fruit" PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, (1974).
- [7] S.J. Sykes, R.G.H. Prince, "The Design of Spinning Cone Distillation Columns", I. Chem. E. Symp. Series, 128 (1992) 167-179.
- [8] S.V. Makarytechev, T.A.G. Langrish, R.G.H. Prince, "Structure and Regimes of Liquid Film Flow in Spinning Cone Columns", Chemical Engineering Science, 53 (1998) 1541-1550
- [9] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, R. G. H. Prince, "Thickness and Velocity of Wavy Liquid Films on Rotating Conical Surfaces", Chemical Engineering Science, 56 (2001) 77-87.

شیمی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۱۳۸۷.

[20] R.G.H. Prince, S. Desho, T.A.G. Langrish, "Spinning Cone Column Capacity and Mass Transfer Performance" I. Chem. E. Symp. Series, Netherlands, 142 (1997) 769-781.

[۱۹] م. حق شناس فرد، "بررسی ویژگی های برج های آکنده دارای آکنه های ساختار یافته به کمک آنالیز CFD"، رساله دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، تیر ۱۳۸۵.

CFD Analysis of Mass Transfer Parameters in SCC Distillation Columns

M. Zivdar, S. Shirdel

Chemical Engineering Department, Sistan & Baluchestan University, Zahedan, 98164, Iran

ARTICLE INFO

Article history :

Received 4 October 2008

Received in revised from 15 November 2008

Accepted 4 December 2008

Keywords:

Spinning Cone Column (SCC)

CFD

Liquid film thickness

Mass transfer coefficients

ABSTRACT

Spinning Cone Column (SCC) is one of the distillation columns with applications in the food processing industries. Modeling and simulation of these columns are very complicated, due to the geometrical complexity, rotational parts, and different flow regimes inside SCC columns. Most of the published works on simulation of SCC columns were related to air/water systems, therefore application of these results to real flavour systems has challenges. In this study the mass transfer parameters including liquid film thickness, gas and liquid-side mass transfer coefficients and HETP are reported for steam stripping of ethanol/ water solution. The pilot scale SCC column has a diameter of 0.347m with 30 cone sets and 1.2m height. The average predicted gas and liquid-side mass transfer coefficients are 1.42 and 0.019 (s⁻¹), respectively. Results show that gas and liquid-side mass transfer coefficients are nearly constant over the operating ranges of gas and liquid flow rates. The predicted HETPs range from 0.072 to 0.246m. HETPs were increased by increasing gas rate. The predicted HETPs are in close agreement with the data reported in literature.

All rights reserved.