بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

اصول طراحی هیدرولیکی و شبیه‌سازی برج‌های تقطیر

تالیف:

مهندس علیرضا پورپروانه – مهندس ساناز عبدالحسین‌پور

می‌توان در سایه آموختن

گنج عشق جاودان اندوختن

اول از استاد، یاد آموختیم

پس، سویدای سواد آموختیم

از پدر گر قالب تن یافتیم

از معلم جان روشن یافتیم

تقدیم به همسرم

که در مسیر پرپیچ و خم زندگی، مشعل امید را در شب‌های زندگیم به ارمغان آورد و یاری سبزش همواره و بی‌منت، امیدبخش و یاری‌دهنده در تمام زندگیم بوده است. باشد که توانسته باشم قطره‌ای از دریای بی‌کران محبت‌هایش را سپاس گفته باشم.

پیشگفتار

برج‌های تقطیر یکی از مهم‌ترین تجهیزات عملیاتی در پالایشگاه‌ها، واحدهای پتروشیمیایی، مجتمع‌های صنایع غذایی و داروی، صنایع بهداشتی و آرایشی محسوب می‌گردند. سال‌ها و دهه‌ها از توسعه دانش طراحی و ساخت این تجهیزات می‌گذرد، اما هنوز آن‌گونه که شایسته قدمت طولانی صنعت نفت در کشورمان است، در این خصوص نتوانسته‌ایم به دانش کافی دست یابیم. شاید یکی از علل این عقب‌ماندگی، کمبود منابع اطلاعاتی و در کنار آن آموزش نامناسب مهندسان جوان باشد. این موضوع باعث شد تا بر آن شویم قدم در راهی دشوار نهیم و با تحمل سختی چندین ساله، به لطف خداوند متعال، کتاب اصول طراحی برج‌های تقطیر را تالیف نماییم. در دنیای امروز با پیشرفت تکنولوژی و همّت محققین، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متفاوتی به بازار عرضه شده، که علیرغم قدمت کم، با توجه به کاربرد وسیع آن در بسیاری از زمینه‌ها در سال‌های اخیر مورد استقبال بسیاری از دانشجویان، اساتید، محققین و صنعت‌گران قرار گرفته است که به کاربران خود جرات ارائه و برآورد ایده‌هایشان را می‌دهند. شبیه‌سازها نمونه‌ای از این نرم‌افزارها هستند که به شما امکان طراحی یک واحد و بررسی تغییر در هر یک از اجزا آن را می‌دهند. نرم‌افزار Aspen Hysys از جمله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است که به سبب کاربری آسان و بانک اطلاعاتی گسترده مورد توجه کاربران زیادی در سراسر دنیا قرار گرفته است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان واحدهای مختلف صنعتی را شبیه‌سازی کرد و یا در راستای بهینه‌سازی واحدهای فرآیندی موجود گام برداشت. همچنین می‌توان محاسبات تئوری صورت گرفته را با خروجی نرم‌افزار مقایسه کرد و صحت آن‌ها را مورد بررسی قرارداد. کتاب حاضر حاصل گردآوری تجربیات آموزشی مولفان در صنعت و دانشگاه‌های کشور و همچنین استفاده از این نرم‌افزار در تحقیقات علمی می‌باشد. مطالب این کتاب طوری طراحی شده است که کاربران با خواندن آن شناخت جامع از برج‌های تقطیر و اصول طراحی و شبیه‌سازی آن‌ها را فرا گیرند. این کتاب مشتمل بر ۷ فصل می‌باشد. در فصل اول کاربر اصول عملیات تقطیر را به عنوان اولین پیش زمینه طراحی برج‌های تقطیر آموزش می‌بینند. در فصل دوم به بررسی، شناخت و نحوه استفاده از انواع برج‌های تقطیر در نرم‌افزار Aspen Hysys پرداخته شده است. فصل سوم به عنوان مهمترین فصل مجموعه حاضر به طراحی هیدرولیکی برج‌های تقطیر اختصاص داده شده است. در این فصل به طور جامع به طراحی دستی و نرم‌افزاری برج‌های تقطیر سینی‌دار و مقایسه نتایج و همچنین شناخت از تمامی قطعات و تجهیزات اینترنال، عیوب و راه‌حل و غیره پرداخته شده است. فصل چهارم تلفیقی از نحوه شبیه‌سازی واحد بازیابی LPG و شبیه‌سازی تخصصی برج‌های تقطیر سینی‌دار این واحد بوسیله نرم‌افزار Aspen Hysys می‌باشد. فصل پنجم به عنوان یک فصل کاملاً صنعتی به طراحی برج De-propaniser واقع در یکی از مجتمع‌های پالایشگاهی پارس جنوبی کشور و نحوه استفاده از انواع Process DataSheet، PFD و Stream Summary جهت طراحی برج مذکور اختصاص داده شده است. در فصل ششم کاربر می‌تواند علاوه بر نحوه طراحی برج‌های Packing، اصول شبیه‌سازی یک واحد صنعتی شیرین‌سازی گاز

طبیعی را فرا بگیرد. در فصل هفتم به نحوه پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی برج‌های تقطیر و تجهیزات وابسته به آن پرداخته شده است. نکته‌ای که در مورد این کتاب، آن را از سایر کتاب‌های آموزشی متمایز می‌کند جنبه عملی و تئوری آن است. بدین صورت که خواننده این کتاب نه تنها نحوه کار با نرم‌افزار و شبیه‌سازی واحدهای صنعتی مختلف را فرا می‌گیرد، بلکه به صورت صنعتی می‌تواند با تک تک تجهیزات، اینترنال‌ها و قسمت‌های مختلف برج‌های تقطیر آشنا شود و اطلاعات جامع و کاربردی از هر کدام دریافت می‌کند.

شایان ذکر می‌باشد، تألیف این اثر بر این فرض استوار بوده است که خواننده شناخت کافی از نرم افزارAspen Hysys را دارد و صرفاً موارد مربوط به برج‌های تقطیر در این نرم‌افزار آموزش داده می‌شود. پیشنهاد می‌گردد جهت آموزش کامل نرم افزار Aspen Hysys به عنوان پیش‌نیاز، به کتاب « کامل‌ترین مرجع آموزشی و کاربردی Hysys» انتشارات خانه مهندسی شیمی ایران، تالیف جناب آقای علیرضا پورپروانه و سرکار خانم زهره بازرگانی مراجعه شود.

بدیهی است هیچ اثر علمی، ادبی و یا هنری نمی‌تواند مبّرا از عیب و نقص باشد، از این رو از اساتید، دانشجویان، محققان و صنعتگران محترم خواهشمندم هرگونه پیشنهاد و یا انتقادی را که در راستای بهتر شدن این اثر در چاپ‌های بعدی لازم می‌بینند، به آدرس پست الکترونیکی ChemeHome.info@gmail.com ارسال نمایند. امید است که این زحمت ناچیز ضمن قبولی در پیشگاه الهی، مورد توجه صاحبنظران و علاقه‌مندان در این زمینه قرار گیرد.

در پایان لازم می‌دانیم تا مراتب تشکر و قدردانی خود را از زحمات و همکاری مسئولین گروه صنعتی آسیا اویل (Asia Oil) عراق، خانه مهندسی شیمی ایران، مهندس کوروش عبدالحسین‌پور، مهندس علی ثابتی‌راد، دکتر سیروس عمار سعیدی و مهندس کیوان تقی بیگلی اصل که با علاقه خاص در نشر این کتاب باعث دلگرمی اینجانبان شدند را اعلام نماییم.

با احترام

علیرضا پورپروانه ساناز عبدالحسین‌پور

بهار ۱۴۰۲

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر عملیات تقطیر..... ۹

فصل دوم: برج‌های تقطیر در نرم‌افزار Aspen Hysys..... ۱۴

فصل سوم: طراحی هیدرولیکی برج‌های تقطیر سینی‌دار..... ۵۴

فصل چهارم: شبیه‌سازی واحد بازیابی LPG..... ۱۷۱

فصل پنجم: طراحی صنعتی برج تقطیر De-Propaniser..... ۲۶۱

فصل ششم: شبیه‌سازی واحد شیرین سازی گاز ترش پالایشگاه..... ۲۸۴

فصل هفتم: عملیات پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی برج‌های تقطیر..... ۳۴۶

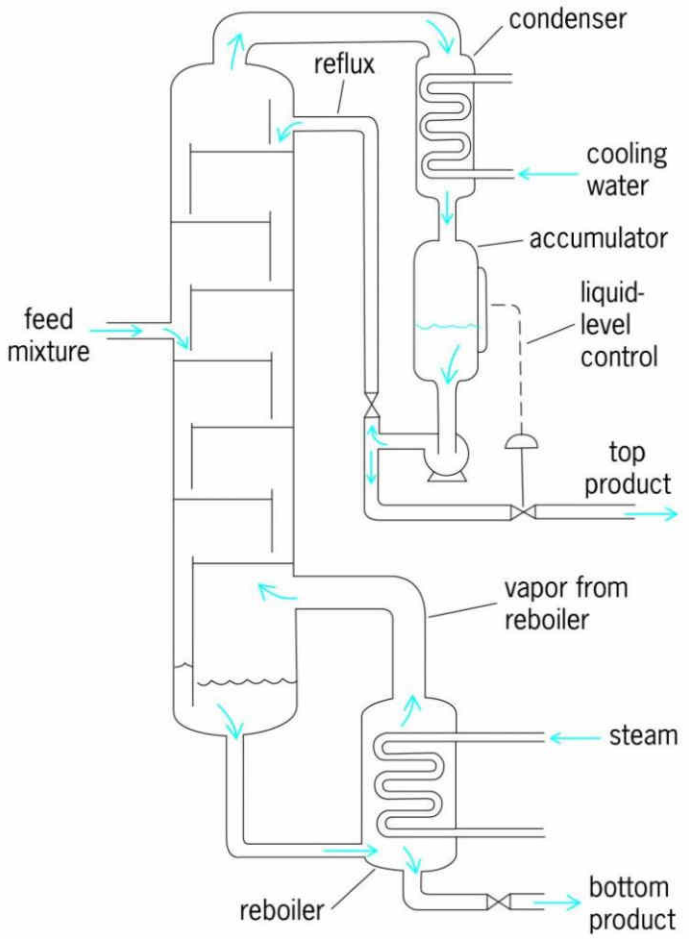
مراجع..... ۳۷۳

فصل اول: مقدمه‌ای بر عملیات تقطیر

یکی از مهمترین و متداولترین روش‌های جداسازی اجزاء یک مخلوط، تقطیر می‌باشد. این فرآیند احتمالاً از ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در چین، مصر و بین النهرین فرآیندی شناخته شده بوده است. این فرآیند توسط شیمیدانی هندی به نام ناگاراجاتا برای استخراج اسانس سینابار[1] انجام شد. به این صورت که آن را در ظرفی به همراه آب جوشاند و بخارات حاصل را در ظرفی دیگر بوسیله آب کندانس کرد. اساس جداسازی ترکیبات در تقطیر، اختلاف نقطه جوش آن‌هاست. به عنوان مثال آب دارای نقطه جوش ۱۰۰ درجه سانتیگراد و الکل دارای نقطه جوش ۷۸ درجه سانتیگراد می‌باشد. اگر محلول آب و الکل حرارت داده شود، به دلیل پایین‌تر بودن نقطه جوش الکل، مقدار الکل موجود در فاز بخار بیشتر از مقدار آن در فاز مایع می‌شود و با سرد کردن فاز بخار می‌توان الکل نسبتاً خالص بدست آورد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که گرما به عنوان عامل جداکننده، دو جزء آب و الکل را تقریباً به طور کامل از یکدیگر جدا می‌کند. در صنعت نفت نیز عملیات تقطیر درون تجهیزاتی به نام برج تقطیر[2] صورت می‌گیرد. نحوه کارکرد برج‌های تقطیر بر پایه جداسازی فیزیکی برش‌های نفتی صورت می‌پذیرد که اساس آن اختلاف در نقطه جوش هیدروکربن‌های مختلف است. هر چه هیدروکربن سنگین‌تر باشد، نقطه جوش آن بالاتر است و هر چه هیدروکربن سبکتر باشد، زودتر جدا می‌شود. در مواردی که امکان استفاده از عمل تقطیر وجود دارد، محصولات تقریباً به صورت خالص بوده و نیاز به تفکیک مجدد ندارند و بدین جهت می‌توان ادعا کرد که تقطیر متداولترین و مهمترین فرآیند جداسازی می‌باشد. در شکل (۱-۱) می‌توان شماتیک کلی یک برج تقطیر به همراه تجهیزات مرتبط به آن را مشاهده نمود.

---

[1] Cinnabar
[2] Distillation Column

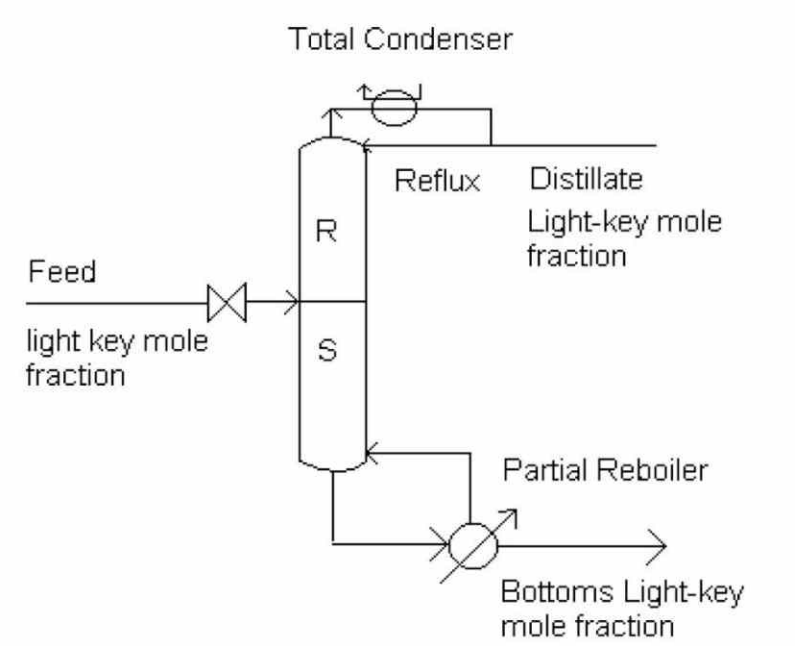


شکل (۱-۱): شماتیک کلی برج تقطیر

همانطور که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود، اجزاء اصلی برج تقطیر شامل بدنه اصلی برج، کندانسور[۱] و ریبویلر[۲] می‌باشد. برج‌های تقطیر عموماً دارای یک جریان خوراک ورودی به برج و دو محصول خروجی می‌باشد که البته در موارد خاص جریان‌های جانبی نیز به عنوان محصول جانبی با نقاط جوش مختلف از برج در نظر گرفته می‌شود. برج‌های تقطیر از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: بخش بالایی برج (R) به عنوان بخش غنی‌ساز[۳] (بالاتر از محل ورودی خوراک) و بخش پایین (S) به عنوان بخش عریان‌ساز[۴] (پایین‌تر از محل ورودی خوراک).

---

[1] Condenser
[2] Reboiler
[3] Rectifying
[4] Stripping



شکل (۱-۲): بخش‌های اصلی برج تقطیر

در برج تقطیر، سنگین‌ترین محصول با بالاترین نقطه جوش در پایین و به عنوان محصول پایینی و سبک‌ترین محصول با پایین‌ترین نقطه جوش از بالاترین خروجی به عنوان محصول بالایی از برج خارج می‌گردند. با توجه به تغییرات غلظت مواد در قسمت‌های مختلف، دما در طول برج متغیر بوده و دمای بالای برج به دلیل وجود اجزاء فرارتر، پائین‌تر از قسمت‌های پائینی آن می‌باشد. جهت جداسازی بهتر محصولات، در بیشتر موارد از جریان رفلاکس یا برگشتی استفاده می‌شود که بخشی از سیال کندانس بالاسری را به بالای برج بر می‌گرداند و در داخل برج، با حرکت رو به پایین، علاوه بر کندانس بخارهایی که رو به بالای برج حرکت می‌کنند (بر اساس نقطه جوش مورد نیاز قطرات در هر مقطع)، تعادل ترمودینامیکی بین مایع و گاز در قسمت غنی‌ساز برج را نیز ایجاد کرده و باعث افزایش بازدهی آن می‌گردد. همچنین از ایجاد Hot Spot در قسمت غنی‌ساز برج نیز جلوگیری می‌کند. هر مقدار رفلاکس بیشتر باشد، جداسازی مواد با نقطه جوش متفاوت بهتر انجام می‌گردد. ریبویلر نیز تجهیزی است که حرارت مورد نیاز جهت تبخیر جریان خروجی از انتهای برج تقطیر را فراهم می‌آورد که به طور مفصل در ادامه راجع به آن بحث خواهد شد.

به طور کلی تقطیر به دو دسته پیوسته و ناپیوسته تقسیم بندی می‌شود:

تقطیر ناپیوسته[1]

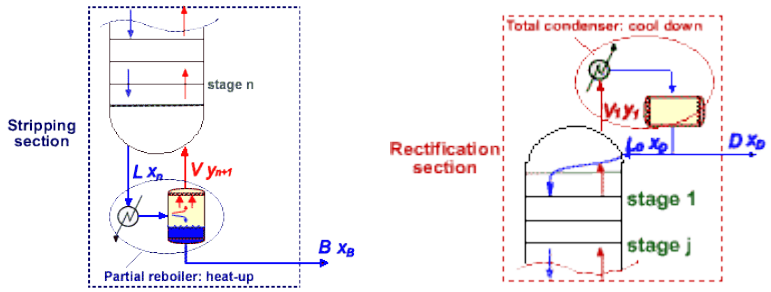
تقطیر ناپیوسته زمانی مناسب است که محصولات به مقدار کم ولی با ارزش شیمیایی بالا مورد نیاز باشند. بیشترین مزیت استفاده از یک برج تقطیر ناپیوسته انعطاف پذیری آن می‌باشد. برخلاف برج تقطیر پیوسته که فقط برای یک ترکیب مشخص طراحی و استفاده می‌شود، در یک سیستم تقطیر ناپیوسته مخلوط‌های مختلفی را با تغییر شرایط برج می‌توان تقطیر کرد. اشکال استفاده از یک سیستم تقطیر ناپیوسته این است که برای ترکیباتی که در مقابل حرارت مقاومت ندارند، نمی‌توان آن را به کار برد. انرژی مصرفی این نوع تقطیر نسبتاً بالا می‌باشد. معمولاً از تقطیر ناپیوسته در صنعت پتروشیمی برای جداسازی مواد جامد از مایع در واحدهای پلیمری استفاده می‌شود، مانند جداسازی پلیمرهایی با جرم مولکولی پائین (LNP[2]) در واحدهای HDPE[3] در یک واحد تقطیر ناپیوسته. در این فرآیند پس از وارد کردن میزان معین خوراک، جریان خوراک را قطع می‌کنند. این خوراک در ریبویلرها گرم شده و پس از تبدیل به بخار، به برج بازگشته و به سمت بالای برج حرکت می‌کند. این بخارات از بالای برج وارد کندانسور شده و پس از سرد شدن در کندانسور به عنوان جریان رفلاکس به برج برگردانده می‌شود. به این ترتیب فازهای مایع و بخار در برج فراهم می‌شود. همچنین در مواقعی که خوراک حاوی مقادیر زیادی مواد جامد، رزین[4] یا تار[5] می‌باشد که احتمال مسدود سازی تجهیزات وجود دارد، می‌بایست از سیستم تقطیر ناپیوسته استفاده نمود.

---

[1] Batch Distillation
[2] Light Normal Paraffins
[3] High-Density Polyethylene
[4] Resin
[5] Tar

تقطیر پیوسته[1]

در فرآیند تقطیر پیوسته یک جریان خوراک وارد برج می‌شود. در بخش غنی‌سازی، فاز بخار هنگام بالا رفتن با فاز مایع تماس پیدا می‌کند و در اثر این تماس، جز یا اجزائی که فراریت کمتری دارند از فاز بخار وارد فاز مایع می‌گردند. مایع مورد نیاز این قسمت از سرد شدن بخشی از بخارات در کندانسور به صورت جریان رفلاکس به برج تامین می‌گردد و روی بالاترین سینی برج می‌ریزند. بخاراتی که از بالای برج خارج می‌شود، محصول تقطیر است که دارای درصد بالایی از جزء یا اجزای فرارتر است. در قسمت پائین برج در اثر تماس فاز بخار با فاز مایع، اجزاء فرارتر از مایع جدا شده و وارد فاز گاز می‌شوند. مایعی که از پائین برج خارج می‌شود، شامل درصد زیادی از جزء یا اجزاء غیر فرارتر است که وارد ریبویلر شده و در اثر گرم شدن قسمتی از آن به بخار تبدیل می‌شود. محصول باقیمانده[2] نامیده می‌شود.



شکل (۱-۳): بخش غنی‌سازی و عریان‌سازی در برج تقطیر

تذکر: فرایندهای تقطیر توضیح داده شده در این کتاب به صورت پیوسته می‌باشد.

[1] Continuous Distillation
[2] Residue

فصل دوم: برج‌های تقطیر در نرم‌افزار Aspen Hysys

بنابر اهمیت روز افزون بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی، شرایط اقتصادی و ایمنی در دنیای صنعتی امروز، صنایع متفاوت از جمله نفت، گاز و پتروشیمی ملزم به استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری می‌باشند. استفاده از نرم‌افزارهای متفاوت این امکان را به کاربر می‌دهد که به بررسی عملکرد تجهیزات موجود و رفع تنگناها و مشکلات بپردازد، نتایج را بر اثر اعمال هرگونه تغییر پیش‌بینی کند و در نتیجه از ساخت واحدهای نیمه صنعتی به منظور انجام آزمایشات پیچیده‌ای که خود مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است جلوگیری به عمل آید.

به طور کلی از نرم افزارهای شبیه‌سازی فرآیند به منظور

- طراحی یک واحد صنعتی
- کاربری در واحدهای در حال فعالیت

استفاده می‌شود.

در نهایت می‌توان دلایل ضرورت استفاده از شبیه‌سازها را در چند دسته تقسیم بندی کرد:

- سرعت انجام محاسبات پیچیده ترمودینامیکی دستگاه‌های فرآیندی و جریان برگشتی
- صرفه‌جویی در وقت و هزینه به همراه اخذ جواب‌های دقیق‌تر
- مطالعه و بررسی گزینه‌های مختلف خط تولید از نظر افزایش ظرفیت واحد با هدف طراحی و ساخت
- پیش بینی رفتار یک سیستم در اثر انجام تغییرات برای حالت پایا و دینامیک و تعیین نقطه بهینه عملکرد فرآیندی

معیارهای متفاوت در انتخاب شبیه‌ساز

- گستردگی بانک اطلاعاتی شامل مواد شیمیایی اعم از سیالات، جامدات، الکترولیت‌ها و مواد جدید
- سهولت تغییر واحدهای ورودی و خروجی

- قدرت پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی مواد و مخلوط‌های نامعین
- امکان انجام موازنه جرم و انرژی
- محاسبه تجهیزات عملیاتی متفاوت
- امکان برآورد اقتصادی و بروز کردن تجهیزات
- توان اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی
- امکان اتصال به سایر برنامه‌ها
- سهولت استفاده برای کاربر
- استفاده از ریاضیات پیشرفته در حل معادلات

در این فصل به معرفی و شرح امکانات مربوط به طراحی برج‌های تقطیر نرم‌افزار Aspen Hysys به عنوان یکی از محبوب‌ترین و شناخته شده‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی شیمی در حوزه صنعت نفت، گاز و پتروشیمی پرداخته شده است. Hysys از محصولات شرکت نرم‌افزاری AspenTech است که توسط Hyprotech طراحی شده‌است. توانایی مدل‌سازی حالت پایا و پویا، محیط کاری آسان و زیبا، سرعت و دقت انجام محاسبات و در برگرفتن تمام فرآیندهای نفت، گاز، پتروشیمی و بسیاری از فرآیندهای موجود در صنایع تولیدی سبب شده این نرم‌افزار به عنوان یکی از کارآمدترین شبیه‌سازها معرفی شود. این نرم‌افزار شامل بانک اطلاعاتی جامعی از مواد خالص و خواص آن‌ها می‌باشد و در صورت عدم وجود ترکیب خاصی این امکان را به کاربر می‌دهد که با استفاده از داده‌های شخصی و استفاده از گروه‌های UNIFAC ترکیب را ایجاد و به محاسبه خواص آن بپردازد. بنیان قوی ترمودینامیکی وجه تمایز Aspen Hysys با سایر شبیه‌سازها می‌باشد، به طوری که علاوه بر مجموعه بسیار جامعی از معادلات حالت و ضرایب اکتیویته برای سیستم‌های ایده‌آل و غیر ایده‌آل برای ساخت بسته خصوصیات مواد، می‌توان با استفاده از ActiveX از بسته‌های خواص مواد که در خارج از نرم افزار قرار دارند نیز بهره برد. امکان تعریف انواع واکنش‌ها در این نرم‌افزار و جود دارد و با یکبار تعریف می‌توان از آن در تمام طول فرآیند استفاده کرد و نیاز به