

مروری بر فناوری‌های مختلف آسفالت‌زدایی با حلال (SDA) و بررسی پارامترهای عملیاتی SDA: Solvent Deasphalting

مهدی رازی‌فر، مرتضی هوائی: شرکت مهندسی مشاور پتروفرایند مهراز، تهران، ایران

info@mehraz-eng.com

چکیده

پالایشگاهی ارائه می‌شود. این فرایند تحت لیسانس شرکت‌های مختلفی مانند KBR و UOP/FW با فناوری‌های تجاری شده به ترتیب ROZE و Demex می‌باشند. در این فرایند تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند نسبت حلال به خوراک، نوع حلال، دما و فشار برج استخراج مایع-مایع و نوع خوراک، روش بازیابی حلال، اثر زمان تماس و اثر سرعت اختلاط بررسی می‌شوند.

فرایند آسفالت‌زدایی با حلال از جمله روش‌های غیر کاتالیستی ارتقای نفت سنگین ته‌مانده خلاء یا اتمسفریک یا ترکیبی از این دو بوده که با استفاده از حلال‌های عموماً پارافینی باعث کاهش ناخالصی‌های فلزی، گوگردی، نیتروژن و جداسازی ترکیبات آسفالت می‌گردد. در مقاله حال حاضر، بررسی فناوری‌های مختلف آسفالت‌زدایی با حلال، بررسی پارامترهای عملیاتی آن‌ها و الگوهای



شرکت مهندسی مشاور پتروفرآیند مهرآر

۱- مقدمه

بخش قابل توجهی از انرژی در دنیا از نفت خام تأمین می‌شود. با توجه به نوع و کیفیت نفت خام حدود ۲۵ الی ۱۰ درصد از آن از ته‌مانده برج تقطیر در خلأ تشکیل شده است [۲]. در چند دهه اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای نفت سبک و با کیفیت، کاهش منابع نفت سبک و افزایش ذخایر نفت سنگین، فرآیندهای ارتقای کیفی نفت سنگین جهت کاهش هزینه ذخیره‌سازی و نگهداری آن برای پالایشگاه‌ها حائز اهمیت شده است. فرایند ^۱SDA یا آسفالت‌زدایی با حلال یکی از روش‌های غیرکاتالیستی ارتقای نفت سنگین ته‌مانده برج تقطیر در خلأ یا اتمسفریک است. این فرایند معمولاً با استفاده از حلال‌های پارافینی مانند پروپان تا پنتان به‌منظور آسفالت‌زدایی از نفت سنگین با روش استخراج مایع-

مایع انجام می‌گردد. محصول اصلی این فرایند استخراج، ^۲DAO می‌باشد که از خوراک واحد با استفاده از حلال‌های پارافینی جدا می‌شود. این محصول خوراک مناسبی برای واحدهای پایین‌دست مانند ^۳RCD می‌باشد. محصولات دیگر این واحد سیالات سنگینی مانند Pitch (با استفاده از حلال پنتان) یا tar (با استفاده از حلال پروپان) ورزین است.

فرایند SDA یک فرایند میانی و واسطه بین واحدهای بالادستی و پایین‌دستی پالایشگاه بوده و به دلیل ارزش اقتصادی پایین نفت سنگین، فرآورش آن باعث افزایش ارزش و حاشیه سود پالایشگاه می‌شود. این فرایند یک روش مناسب برای کاهش آسفالتین،

1- Solvent Deasphalting

2- Deasphalted oil
3- Reduced Crude Desulfurization

جدید به بخش استخراج وارد می‌شوند.

۲- خوراک واحد آسفالت‌زدایی با حلال

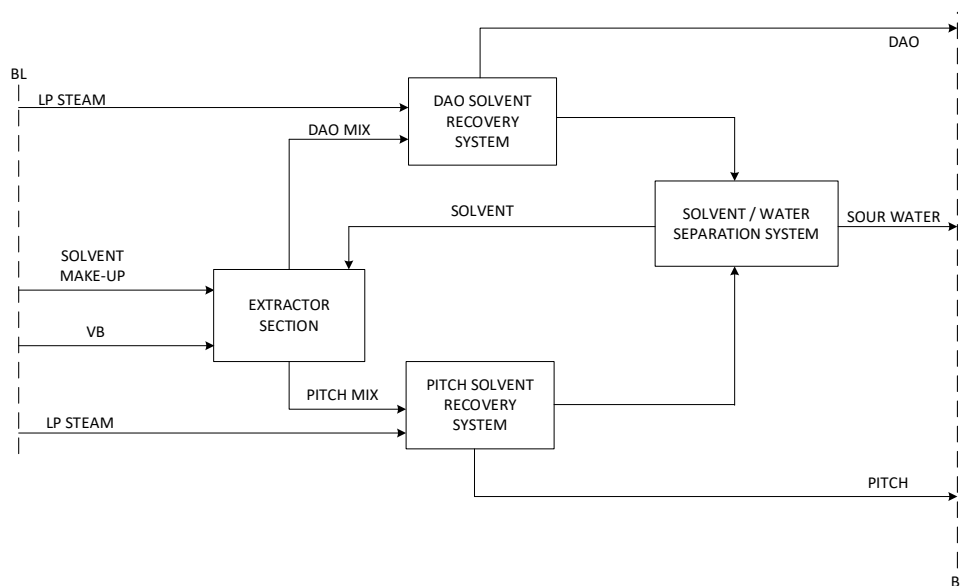
خوراک واحد SDA، ته‌ماند خلاء خروجی پایین برج تقطیر در خلاء واحد VDU بوده که از چهار بخش ترکیبات اشباع، آروماتیک، رزین و آسفالتین (SARA) تشکیل شده است. ترکیبات اشباع با محدوده کربنی ۳۸ الی ۵۰ بوده که دارای چگالی حدود ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جرم مولکولی ۳۰۰ الی ۶۰۰ و هترواتم (اتم‌های غیر از کربن و هیدروژن) بسیار پایین هستند. این ترکیبات در فرآیندهای تولید کک استفاده نمی‌شوند.

ترکیبات آروماتیک با محدوده کربنی ۴۱ الی ۷۰، وزن مولکولی بالاتر حدود ۶۰۰ الی ۷۵۰ و کربن باقیمانده یا تمایل به تشکیل کک حدود ۳ الی ۷ درصد وزنی است. این ترکیبات حاوی هترواتم و فلزات پایینی نسبت به رزین و آسفالتین بوده و عموماً از سیکلوپارافینها تشکیل شده‌اند. ترکیبات رزین به صورت زنجیره‌های طویل پارافینی با حلقه‌های بنزوئیک و نفتنیک با جرم مولکولی ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ و چگالی حدود ۱۰۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. این ترکیبات حدود ۴۰ الی ۵۳ درصد وزنی ترکیبات کربنی آروماتیکی و حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد وزنی فلزات درون نفت خام را تشکیل می‌دهند.

فلزات، ترکیبات گوگردی و نیتروژن در محصول DAO تولیدی است. این موضوع سبب عدم مسمومیت و غیرفعال شدن کاتالیست فرایندهای پایین دست مانند^۱HDS،^۲RFCC و روغن‌سازی می‌شود [۲]. در این فرایند امکان تغییر شرایط عملیاتی از جمله نسبت حلال به خوراک، دما و فشار در استخراج مایع-مایع و واحد بازیابی حلال، ترکیب و نوع حلال به‌منظور میزان بهبود تولید و تنظیم کیفیت‌های مختلف Pitch، DAO و رزین براساس نیازهای فرایندی وجود دارد. همچنین یکی از محصولات این فرایند آسفالتین بوده که در فرایندهای پایین دستی مانند گرانول‌سازی آسفالتین مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

در شکل ۱ نمای کلی فرایند آسفالت‌زدایی با حلال مشاهده می‌شود. این فرایند از چهار بلوک اصلی تشکیل شده است. در بخش مربوط به استخراج، جریان آسفالت با حلال و جریان روغن آسفالت‌زدایی شده با حلال از هم جدا شده و هر کدام جداگانه به بخش جداسازی حلال هدایت می‌شوند. محصولات بالای برج‌های بازیابی این دو بخش حاوی حلال و آب بوده که در بخش جداگانه‌ای از هم بازیابی می‌شوند. حلال بازیابی شده به همراه مقداری حلال

- 1- Hydrodesulfurization
2- Residue Fluid catalytic cracking



شکل ۱- شمای کلی فرایند آسفالت‌زدایی با حلال

صورت tar تولید می‌شود. وقتی از حلال پروپان استفاده می‌شود؛ با توجه به سبک بودن آن و توانایی کمتر در حمل ترکیبات سنگین‌تر در برج استخراج مایع-مایع، ترکیبات سبک‌تری از پایین برج نسبت به حلال‌هایی با چگالی بالاتر تولید می‌گردد. این ماده نقطه ذوب پایین‌تری نسبت به pitch دارد و در دماهای محیط به صورت نیمه‌مایع و چسبناک است. این ماده برخلاف pitch حاوی ترکیبات آروماتیک و سمی‌تر و از نظر زیست محیطی و سلامت انسان مضرتر است. امروزه کاربرد pitch نسبت به tar بیشتر و گسترده‌تر است.

بعد از جدا شدن ترکیبات آسفالت در برج استخراج، حلال همراه DAO در بخش بازیابی حلال جدا می‌گردد. محصول DAO مشابه برش گازوئیل سنگین بوده و در واحدهای پایین دست معمولاً همراه با گازوئیل تولیدی در واحدهای تقطیر در خلأ، تقطیر اتمسفریک و یا حتی گازوئیل تولیدی در واحد کک‌سازی تأخیری وارد واحد تصفیه هیدروژنی HDS می‌شود.

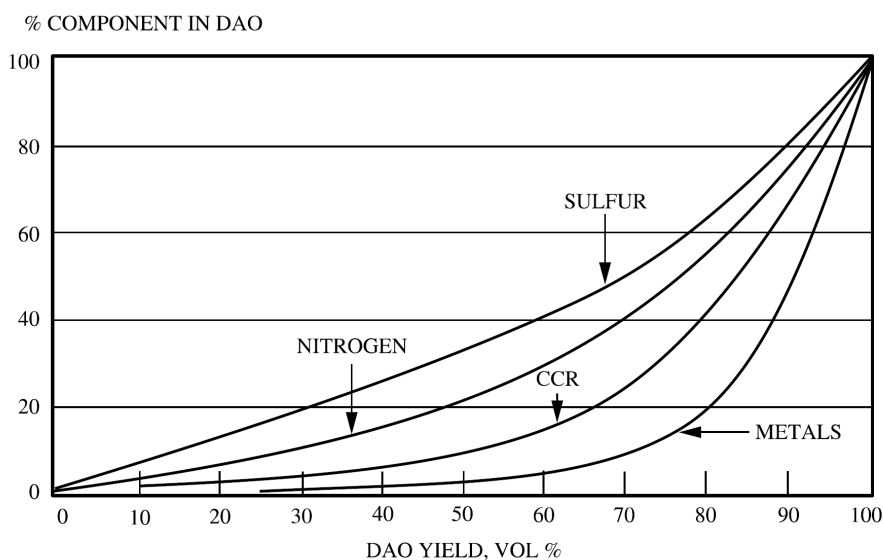
محصول DAO به رنگ قهوه‌ای مایل به تیره بوده و حاوی ترکیبات اشباع، آروماتیک و رزین است. اگر در این واحد محصول اختیاری رزین تولید گردد، این ترکیبات از DAO جدا می‌شوند. کیفیت و میزان تولید این محصول به عوامل مختلفی مانند نوع حلال و

ترکیبات آسفالتین به صورت ذرات جامد قهوه‌ای و سیاه و جزء سنگین‌ترین و پیچیده‌ترین ترکیبات در ته‌مانده خلأ محسوب می‌شوند. این ترکیبات دارای وزن مولکولی حدود ۳۰۰۰ الی ۵۰۰۰ بوده و حاوی ترکیبات هترواتم مثل نیتروژن، اکسیژن و گوگرد و ترکیبات فلزی وانادیم و نیکل هستند. این ترکیبات در حلال‌های آلکان با نقطه جوش پایین مانند پروپان تا نرمال هپتان نامحلول هستند و در فرایند آسفالت‌زدایی با حلال رسوب می‌کنند [۱۶-۱۳].

۳- محصولات واحد آسفالت‌زدایی با حلال

عمده هترواتم‌ها و ترکیبات فلزی و ترکیبات آسفالتین مربوط به ته‌مانده خلأ در نهایت از محصول پایین Pitch Stripper تولید می‌شود. محصول pitch که سنگین‌ترین برش نفت خام است؛ یک ماده عالی برای تولید آسفالت و عایق‌های حرارتی و رطوبتی بوده و در فرآیندهایی مانند کک‌سازی تأخیری یا گرانول‌سازی آسفالتین مصرف می‌شود. این محصول ماده‌ای سیاه رنگ و در شرایط محیطی به صورت جامد و سفت است و پایداری بالاتر و ضرر کمتری از نظر زیست محیطی دارد.

در صورت استفاده از حلال پروپان، این محصول پایین برج به



شکل ۲- شمای توزیع معمول آلاینده‌ها در محصول DAO

خوراک بستگی دارد. با توجه به شکل ۲ با افزایش بازده تولید DAO کیفیت آن کاهش پیدا کرده و میزان هترواتمها مانند نیتروژن، گوگرد، کربن باقی مانده و ترکیبات فلزی افزایش پیدا می کند.

۴- الگوی پالایشگاهی استفاده از فرایند آسفالت‌زدایی با حلال

فرایند آسفالت‌زدایی با حلال در شرایط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- تولید خوراک مناسب و باکیفیت برای واحدهای پایین دست مانند کراکینگ کاتالیستی سیال یا واحد تصفیه هیدروژنی که باعث افزایش طول عمر کاتالیست‌های این فرایندها می‌شود.
- نیاز به خوراک API بالاتر در واحدهای پایین دست باشد.

بنابراین، می‌توان گفت اگر خوراک سنگین و ترکیبات آسفالت و فلزات سنگین زیادی در آن باشد و هدف تولید خوراک سبک و عاری از این ناخالصی‌ها باشد از این فرایند استفاده می‌گردد. از معایب این فرایند مصرف بالای انرژی آن است [۱۶]. در شکل ۳ شمای الگوی پالایشگاهی فرایند آسفالت‌زدایی با حلال نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ خوراک ته‌مانده

فناوری ROSE¹ با استفاده از روش بازیابی حلال در شرایط فوق‌بحرانی سبب تولید خوراک مناسب واحدهای کاتالیستی پایین‌دست می‌شود. این فناوری قادر به استفاده از انواع حلال‌های

[illegible]

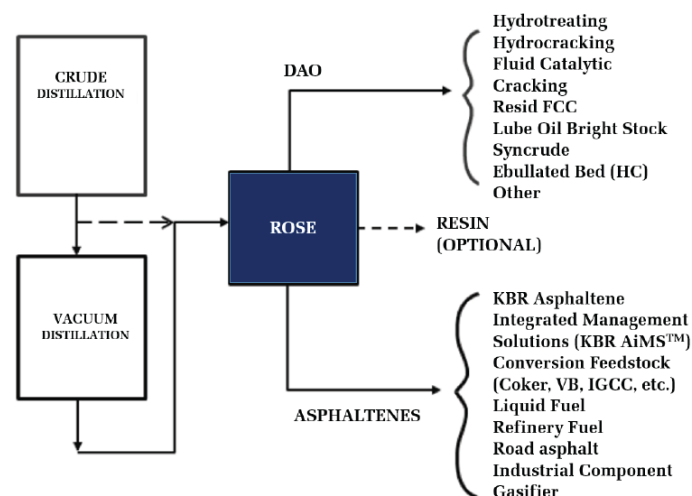
38

- آلکانی جهت استخراج DAO با کیفیت‌های مختلف و همچنین تولید محصول اختیاری رزین می‌شود.
- این فناوری تحت لیسانس شرکت آمریکایی KBR^۱ بوده و که مجوز بیش از ۶۰ واحد با ظرفیت کلی بیش از یکونیم میلیون در روز را در سرتاسر دنیا صادر کرده است. این شرکت در دهه ۱۹۵۰، اولین واحد این فناوری را در مقیاس Demo با ظرفیت ۷۵۰ بشکه در روز راه‌اندازی کرد [۱۰-۳-۱۱].
- مزایای استفاده از این فناوری جهت آسفالت‌زدایی [۱۰-۳]:
- افزایش بازده و کیفیت محصول ارزشمند DAO در مقایسه با فناوری‌های دیگر SDA
- کاهش قابل توجه نفت کوره برای پالایشگاه‌هایی که ته‌مانده خلأ را با سوخت مخلوط می‌کنند.
- انعطاف‌پذیری خوراک ورودی به واحد که می‌تواند ته‌مانده خلأ، ته‌مانده اتمسفری و ترکیبی از این دو و یا محصول باقیمانده سنگین فرایند کرکینگ باشد.
- بازایی حلال در شرایط فوق‌بحرانی که هزینه عملیاتی را در مقایسه با فناوری‌های دیگر به شدت کاهش می‌دهد.
- کاهش هزینه‌های عملیاتی و ثابت (CAPEX و OPEX پایین) در مقایسه با دیگر فناوری‌ها

2-Kellogg Brown & Root, Inc.

جدول ۱- لیست فناوری‌های فرایند آسفالت‌زدایی با حلال [۵-۳-۷-۸-۹-۱۹]

شرکت	فناوری
KBR	ROSE
UOP/FW	Demex
Axens	Solvahl process
Foster Wheeler	LEDA (Low Energy Deasphalting)
Well Resources (Canada)	SELEX-Asp (Selective Asphaltene Extraction)
Pörner Group	SDA PLUS (EDL TECHNOLOGY)
Chevron Lummus Global (CLG)	CLG Residue Solvent Refining Solvent Deasphalting
Cosmo Oil Co., Ltd	MDS Process (SDA for Pretreating)



شکل ۴- شمای کلی تنوع خوراک و محصولات فناوری ROSE [۳]

- قابل اطمینان‌ترین و بالاترین اعتبار بر مبنای بیشترین واحد راه‌اندازی شده
- تنوع محصولات تولیدی و استفاده متنوع از DAO تولیدی در فرآورده‌های کراکینگ، کک‌سازی و گازسازی.

همچنین استفاده از فرایند مدیریت یکپارچه آسفالتین (AiMS¹) در راستای مصرف آسفالتین تولید شده به عنوان سوخت جامد، مخلوط در نفت کوره یا مکمل به عنوان pet-coke استفاده کرد. در شکل ۴ شمای کلی تنوع خوراک و محصولات فناوری ROSE آورده شده است.

در شکل ۵، نمودار جریان فرایندی فناوری ROSE نمایش داده شده است. خوراک ته‌مانده خلاء با حلال‌های آلکانی مانند نرمال-بوتان یا پنتان استخراج می‌شود. فناوری مربوط به سه محصوله نیز

مشابه دو محصوله بوده، با این تفاوت که شامل تجهیز بازیابی رزین مشابه بازیابی آسفالت و DAO است.

خوراک ته‌مانده خلاء پس از اختلاط با بخشی از حلال بازیابی شده به وسط برج استخراج مایع-مایع وارد می‌شود. در این تجهیز جریان اصلی حلال از پایین برج وارد می‌شود و از طریق تفاوت چگالی و حلالیت، DAO همراه با حلال از بالا و آسفالتین همراه با کمی حلال از پایین برج خارج می‌شوند.

جریان DAO همراه با حلال خروجی از بالای برج استخراج، پس از تبادل حرارت با سه جریان حلال بازیابی شده در مبدل Rose Exchanger، جریان DAO تولیدی و یوتیلیتی گرم روغن داغ یا بخار تا بالای دمای بحرانی گرم می‌شود. در شرایط بحرانی، حلال دارای خواص چگالی پایین و نزدیک به شرایط گاز متراکم بوده و در DAO کاملاً نامحلول است. حدود ۹۰ درصد حلال همراه با DAO با جداسازی فوق‌بحرانی جدا می‌شوند. جداسازی در شرایط فوق‌بحرانی در جداکننده Rose Separator و بازیابی حرارت در مبدل Rose Exchanger، صرفه‌جویی قابل توجهی نسبت به

1-Asphaltene Integrated Management Solution

PERSIAN
GULF
STAR
OIL
COMPANY



فرایندهای آسفالت‌زدایی مرسوم ایجاد می‌کند.

سپس DAO همراه با ۱۰ درصد دیگر حلال، ابتدا فشار آن افتاده و سپس وارد ظرف تبخیر ناگهانی جهت جداسازی گاز و حلال می‌شود. در نهایت حلال باقی مانده در DAO، در برج stripper توسط بخار آب با کاهش فشار جزئی حلال و تبخیر آن جداسازی می‌شود.

به طور مشابه محصول آسفالتن پایین برج استخراج‌کننده، توسط Pitch Heater قبل از ظرف تبخیر ناگهانی گرم شده تا حداقل دمای جداسازی در این جداکننده را فراهم کند. در ظرف تبخیر ناگهانی Pitch Flash Drum محصولات سبک حلال از آسفالت جدا شود. در نهایت حلال باقی مانده در Pitch، ابتدا فشار تا حد زیادی کاهش یافته و سپس در برج stripper توسط بخار آب با کاهش فشار جزئی حلال و تبخیر آن جداسازی می‌شود.

حلال فلش شده توسط Rose Exchanger خنک شده و پس از

خنک‌سازی توسط Solvent Cooler همراه با حلال بازیابی شده در Pitch Flash Drum به ظرف Solvent Surge Drum انتقال پیدا کرده و سپس توسط پمپ به برج استخراج بازگردانی می‌شود. بخش دیگر حلال بازیابی شده که فشار پایین‌تری دارند، مربوط به جریان‌های مخلوط حلال و بخار خروجی از بالای برج‌های DAO Stripper و Pitch Stripper و حلال تولیدی از DAO LP Flash Drum است.

این جریان‌های مخلوط حلال و بخار پس از خنک‌سازی ابتدا در ظرف‌های Solvent/Water Separator و LP Solvent Drum آبگیری شده و سپس توسط پمپ حلال فشار پایین به ظرف Solvent Surge Drum انتقال پیدا می‌کند.

محصول DAO تولیدی جهت ذخیره‌سازی ابتدا پمپ و سپس توسط جریان خروجی بالای برج استخراج و حتی جریان آب با دمای ملایم خنک شده و محصول آسفالت نیز در دمای بالا





محدوده مصارف معمول را نشان می‌دهد و مقادیر واقعی بستگی به شرایط سایت، شرایط بهینه فرایندی مانند دمای جداکننده و stripper و نسبت حلال به خوراک دارد.

مستقیماً به واحد پایین دست پمپ می‌شود. حداکثر بازده تولیدی DAO حلال‌های مختلف استفاده شده در فرایند ROSE به صورت جدول ۲ است. لازم به ذکر است که بازده تولیدی DAO به صورت زیر تعریف می‌شود.

۵-۲- فناوری Demex

این فناوری تحت لیسانس شرکت آمریکایی UOP/FW بوده که مانند فناوری ROSE، امکان تولید محصول اختیاری رزین وجود دارد. در این فناوری در برج استخراج مایع-مایع از طراحی ویژه RDC^۱ یا یکسری از دیسک‌های چرخان یا در ظرفیت‌های بالاتر از Structured Packing استفاده شده که امکان تولید حداکثر محصول DAO بدون تأثیر بر کیفیت آن وجود دارد.

بازیابی حلال در این فرایند در شرایط فوق بحرانی انجام می‌شود. در این فناوری از حلال‌های پروپان تا هگزان معمولاً استفاده می‌شود.

$$\text{DAO yield, wt \%} = \frac{\text{Mass flowrate of product DAO}}{\text{Mass flowrate of Feedstock (VB)}} \times 100 \quad (\text{معادله ۱})$$

جدول ۲- حداکثر بازده تولیدی DAO (%) فناوری ROSE در حلال‌های مختلف [۱۰]

حلال	حداکثر بازده تولیدی DAO (%)
<i>n</i> -Pentane	۸۴
<i>n</i> -Butane	۷۴
<i>i</i> -Butane	۶۶
Propane	۵۰

در این فناوری، هزینه‌های مصارف utility به‌ازای هر بشکه از خوراک در حلال‌های مختلف به صورت جدول ۳ است. این جدول

1- Rotating DiscContactor

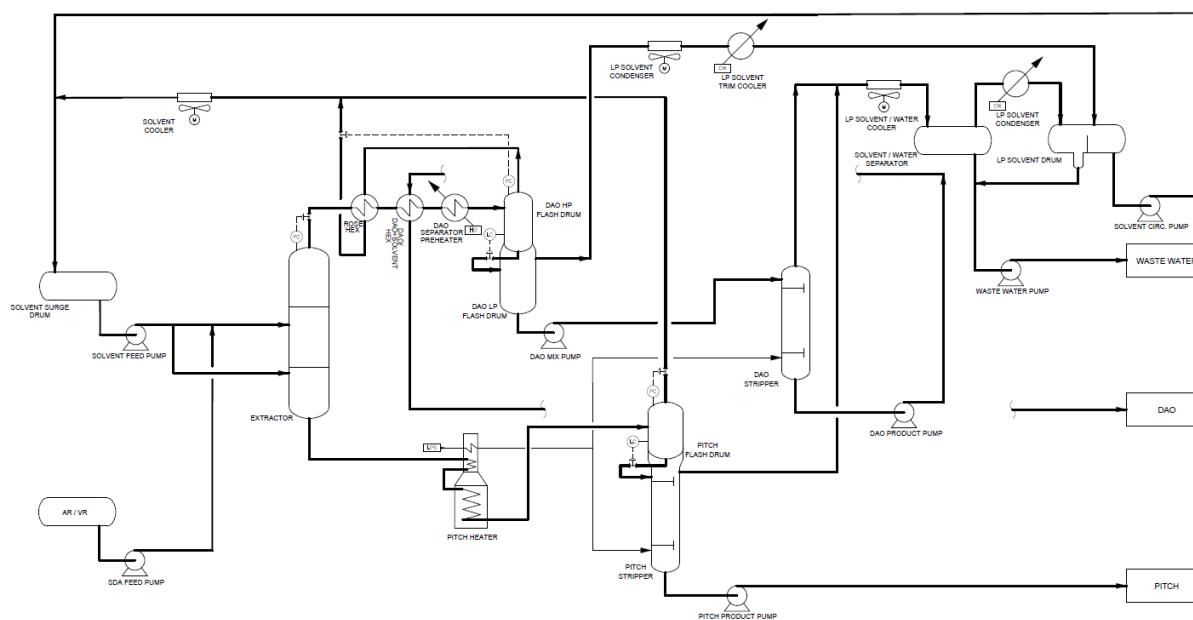
(یک یا چند مرحله‌ای به صورت سری) یا برج‌های عمودی جریان ناهمسو (چند مرحله‌ای) است. Mixer-Settlers اولین دستگاه‌های آسفالت‌زدایی بودند که به صورت تجاری مورد استفاده شده که شامل یک استاتیک میکسر درون خطی یا یک شیر برای مخلوط کردن خوراک و حلال پیش از ورود به مخزن ته‌نشینی است. مخزن ته‌نشینی زمان اقامت کافی برای جداسازی فاز سبک روغن از سیال سنگین pitch را می‌دهد. Mixer-Settlers یک مرحله‌ای در بهترین حالت منجر به یک مرحله استخراج تعادلی می‌شود که

میزان مصارف معمول utility به ازای هر بشکه خوراک در دو مطالعه موردی تولید Lube Oil و Cracking Stock فناوری Demex در جدول ۴ گزارش شده است. تولید Lube Oil نیاز به بازده پایین‌تری از DAO و نسبت حلال به روغن بالاتری داشته در حالی که تولید خوراک واحدهای کراکینگ بازده بالاتر DAO و نسبت حلال به روغن پایین‌تر است.

سیستم استخراج در این فناوری، به دو صورت Mixer-Settlers

جدول ۳- میزان مصارف معمول یوتیلیتی به ازای هر بشکه خوراک بر حسب حلال‌های مختلف در فناوری ROSE [۱۰]

پتان	بوتان	پروپان	مصارف مختلف
۱۲	۱۲	۱۲	LP stripping steam, lb/bbl
۱.۹-۱.۳	۲-۱.۴	۲.۱-۱.۵	Electricity, kWh/bbl
۰.۰۸۶-۰.۰۵۷	۰.۱۰۴-۰.۰۷	۰.۱۴۷-۰.۰۹۷	Process heat, million Btu/bbl absorbed (Hot Oil or Steam)
۰.۱-۰.۰۵	۰.۱-۰.۰۵	۰.۱-۰.۰۵	Solvent loss, wt % of feed
۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۵	Initial solvent fill, bbl/bbl



شکل ۵- نمودار جریان فرایندی فناوری ROSE

جداسازی ضعیف‌تری نسبت به برج‌های عمودی جریان ناهمسو (چندمرحله‌ای) دارد. این مزیت سبب شد که روش برج‌های عمودی جریان مخالف به مرور جایگزین روش Mixer-Settlers تک‌مرحله‌ای شوند. انگیزه اقتصادی حصول بیشترین بازده DAO با کیفیت بالا باعث شده از این روش در پالایشگاه‌ها استفاده شود.

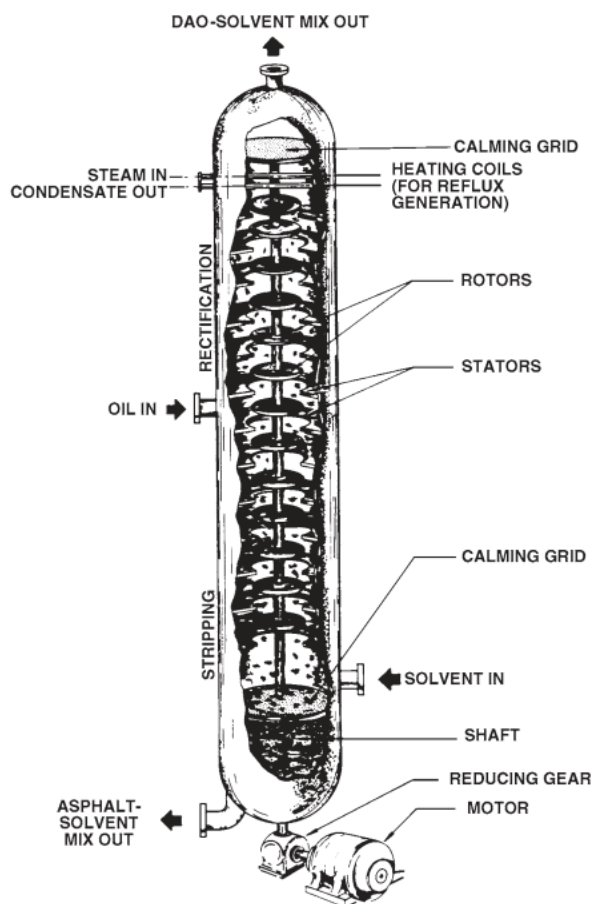
ولی اگر هدف تأمین خوراک واحدهای کراکینگ با کیفیت پایین‌تر باشد؛ استفاده از روش Mixer-Settlers به دلیل هزینه نصب پایین‌تر قابل توجیه‌تر است.

بازده تولید DAO در روش جریان مخالف کمتر و کیفیت آن بالاتر است. در روش برج‌های عمودی جریان مخالف از داخل برج

جدول ۴ - میزان مصارف معمول utility به ازای هر بشکه خوراک بر حسب محصولات مختلف [۱۲]

مصارف مختلف	Lube Oil	Cracking Stock
(Fuel Liberated, Btu (LHV	۸۱۰۰۰	۵۵۵۰۰
Power KWH	۱.۵	۱.۷۷
Steam (150 psig), lbs	۱۱۶	۱۰.۵
gal , (Cooling Water (25°F rise	۱۵	Nil





شکل ۶- شمای برج RDC فناوری Demex [۱۰]

حلالی مانند نفتا سبک استفاده کرد. در این فرایند معمولاً از برج RDC با تعداد مراحل بیشتر نسبت به برج با نوع بافل و یا Mixer-Settler استفاده کرد. شرایط عملیاتی معمول این فناوری در بازه دمایی ۵۰ تا ۲۳۰ درجه سانتیگراد، فشار 21 kg/cm^2 تا ۳۵، نسبت حلال به خوراک ۴ الی ۱۳ و نوع حلال‌های پروپان تا هپتان و نفتا سبک است. در جدول ۵ تخمین میزان یوتیلیتی مصرفی به ازای هر بشکه خوراک در دو نوع محصول مطلوب Lube Oil و Cracking Stock آورده شده است [۱۹].

استخراج از یکسری از بافل‌های ثابت یا چرخان استفاده شده است که باعث ایجاد قطراتی در خوراک VB شده که ترکیبات سبک‌تر آن در مسیر حرکت پایین به بالای حلال حل می‌شوند و ترکیبات سنگین‌تر به سمت پایین برج حرکت می‌کنند. این حرکت رو به پایین خوراک باعث می‌شود که اجزاء قابل حل در حلال یعنی DAO حل شوند و ترکیبات آسفالت یا رزین نامحلول در حلال، به صورت قطره به سمت پایین حرکت کنند و در پایین برج این قطرات جمع می‌شوند که فاز سنگین برج را تشکیل می‌دهند. حلال همراه DAO در بالای برج توسط کویل‌های بخار گرم می‌شود تا ترکیبات آروماتیکی سنگین از آن جدا شوند و به صورت یک رفلکس داخلی مشابه فرایند تقطیر عمل می‌کنند. هرچه این گرادیان دمایی بالاتر رود، بازده DAO بیشتر می‌شود. رایج‌ترین برج‌های استخراج در صنعت، برج‌های دیسک چرخان RDC بوده که سبب بهبود ۳ الی ۵ درصدی بازده DAO نسبت به نوع دیسک ثابت می‌شود. این برج شامل یک مخزن عمودی بوده که توسط بافل‌های حلقوی^۱ که به پوسته مخزن متصل شده‌اند، به مجموعه‌ای از محفظه‌ها تقسیم شده است. دیسک‌ها که هرکدام داخل مرکز محفظه قرار دارند، توسط یک شفت چرخان با سرعت متغیر پشتیبانی می‌شوند. تعداد محفظه‌ها و ابعاد آنها، محل نازل خوراک و محدوده سرعت چرخش همگی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که عملکرد بهینه‌ای در برج استخراج فراهم کنند.

افزایش دور موتور در دقیقه سبب افزایش بازده DAO و کاهش کیفیت آن می‌شود. همچنین اخیراً از Structured Packing برای اجزاء داخلی استخراج‌کننده‌ها به دلیل راندمان بالا استفاده می‌شود که اندازه استخراج‌کننده را به ازای نرخ خوراک یکسان کاهش می‌دهد. شمای برج RDC را در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۰].

۳-۵- فرایند LDEA

این فرایند با نام دیگر Deep Solvent Deasphalting Process تحت لیسانس شرکت Foster Wheeler بوده که برای تولید محصولی مناسب برای خوراک واحدهای پایین‌دستی مانند FCC، Hydrocracking و Hydrodesulfurizer ... استفاده می‌شود. این فرایند می‌تواند با فرایند Delayed coking ترکیب شود و از

2- $\text{kg/cm}^2\text{g}$ is a unit of gauge pressure representing the force of one kilogram-force applied over one square centimeter, relative to atmospheric pressure (kilogram-force per square centimeter gauge)

1- stator rings

جدول ۵- تخمین مصارف یوتیلیتی به ازای هر بشکه خوراک در فناوری LDEA [۱۹]

Cracking Stock	Lube Oil	محصول مطلوب
۲۲۴۰۰	۲۱۶۷۰	(Fuel , Kcal (LHV
۲	۲.۱	Electricity, kW
۳۰	۵۰	Steam (10.5 kg/cm ²), kg
Nil	۱.۱۳۶	C), M ³ Cooling Water (14

۴-۵- فناوری MDS

این فناوری تحت لیسانس شرکت ژاپنی Cosmo Oil Co., Ltd بوده که مناسب برای ارتقای نفت‌های سنگین مختلف مانند ته مانده خلأ و اتمسفریک، Oil Sand، Visbroken و... می‌باشد. این فناوری نسبت حلال به خوراک و هزینه عملیاتی پایینی داشته و خوراک مناسبی برای واحدهای پایین دست مانند FCC، HydroCracking تأمین می‌کند. هزینه یوتیلیتی مورد نیاز به ازای یک متر مکعب خوراک در جدول ۶ گزارش داده شده است.

جدول ۶- مصارف یوتیلیتی به ازای هر متر مکعب خوراک [۱۹]

(Fuel , Kcal (LHV	۶۷
Electricity, kWh	۱۴
Steam , kg	۹۷
Cooling Water , Ton	۵.۴

۵-۵- فناوری SOLVAHL

این فناوری از حلال‌های مانند پروپان، بوتان و پنتان استفاده شده و دارای نسبت حلال به خوراک پایینی می‌باشد و بازیافت حلال به صورت بهینه و در شرایط بحرانی انجام می‌شود. هزینه واحد و یوتیلیتی به ازای ۲۰۰۰ بشکه در روز به صورت جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- مصارف یوتیلیتی به ازای ۲۰۰۰ بشکه در روز [۱۹]

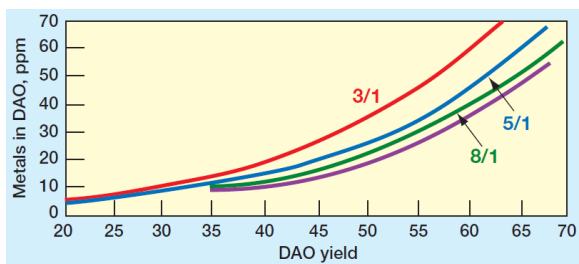
هزینه کل واحد (Million USD)	۲۵
Fuel Oil , ton/h	۲
Electricity, kWh/h	۱۳۰۰
Steam , ton/h	۹۷
Cooling Water , Ton	۰

۶- بررسی عوامل مؤثر بر فرایند آسفالت‌زدایی با حلال

در این بخش به بررسی عوامل مؤثر بر بازده و کیفیت DAO تولیدی از جمله ترکیب حلال، نسبت حلال به خوراک، دما و فشار برج استخراج، نوع خوراک و روش بازیابی حلال، اثر زمان تماس و سرعت چرخش برج استخراج پرداخته می‌شود.

۶-۱- بررسی اثر نسبت حلال به خوراک

هرچه نسبت حلال به خوراک بیشتر باشد، سبب افزایش هزینه عملیاتی و ثابت در فرایند به خصوص قسمت بازیابی حلال می‌شود. نسبت بالاتر سبب امتزاج بیشتر حلال در خوراک می‌شود. این موضوع باعث افزایش بازده DAO شده و کیفیت آن کاهش می‌یابد؛ بنابراین انتخاب یک نسبت بهینه حائز اهمیت است که در شکل ۷ نمایش داده شده است. اگر این نسبت بسیار بزرگ باشد؛ باعث رسیدن به حالت تعادل انحلال روغن در حلال شده و میزان تغییرات بازده DAO بسیار جزئی خواهد بود. معمولاً نسبت حلال به خوراک بزرگ‌تر از یک بوده و عددی بین ۴ الی ۸ است [۵].

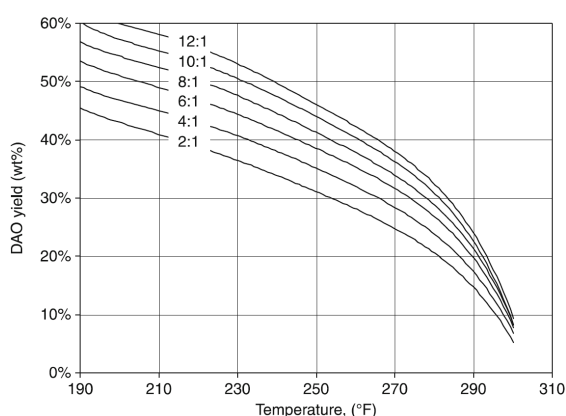


شکل ۷- اثر نسبت حلال به خوراک بر کیفیت و بازده DAO [۱۲]

در شکل ۸ اثر نسبت حلال به خوراک و دما را بر بازده DAO نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش نسبت حلال به خوراک و کاهش دما باعث افزایش بازده تولیدی DAO می‌گردد [۱۸].

۶-۲- بررسی اثر ترکیب و نسبت حلال‌ها

افزایش جرم مولکولی حلال، باعث تولید بیشتر DAO و کاهش کیفیت آن می‌شود. هرچه حلال سنگین‌تر باشد، توانایی حمل بیشتری از ترکیبات سنگین‌تر خوراک از بالای برج استخراج را دارد. این موضوع تا آلمان C۱۱ برقرار بوده و پس از آن با افزایش جرم مولکولی، مقدار حصول DAO کاهش می‌یابد. استفاده از حلال‌های سنگین‌تر به دلیل افزایش هزینه بازیابی حلال



شکل ۸- اثر دما و نسبت حلال به خوراک بر میزان بازده تولیدی DAO [۱۸]

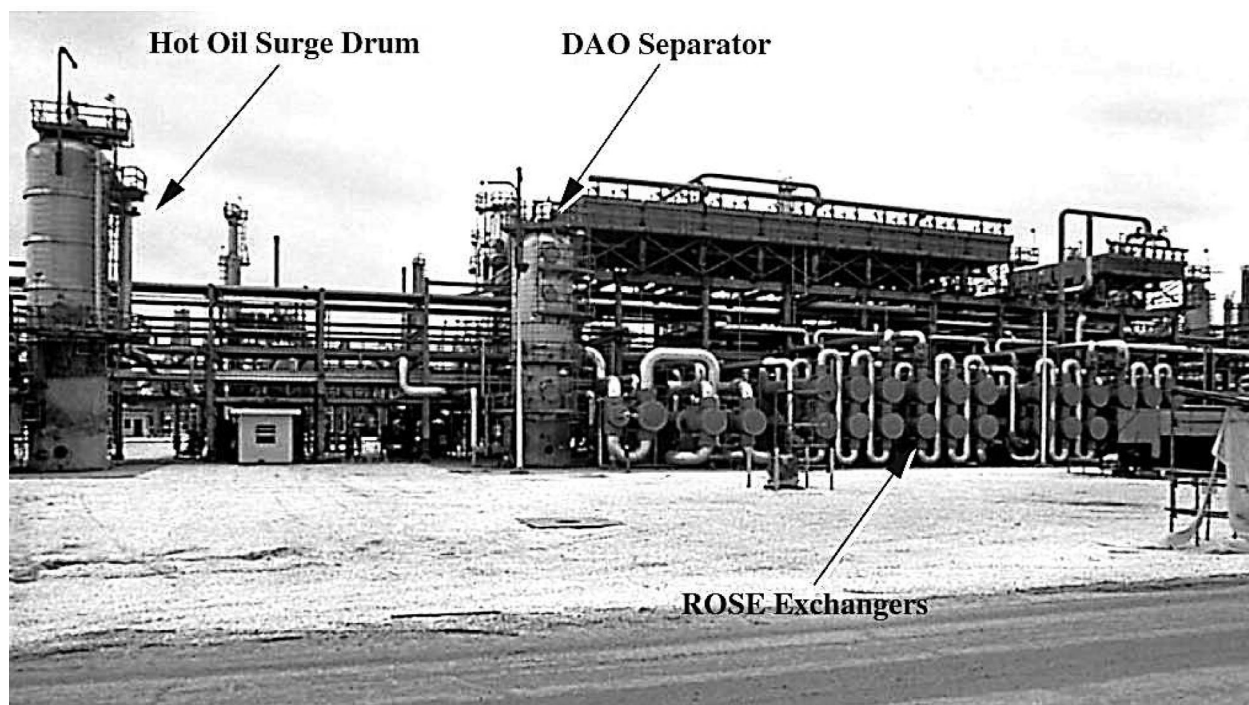
توجیه اقتصادی ندارد و جداسازی را به دلیل نزدیک تر شدن نقطه جوش حلال و روغن سخت و مشکل می کند. همچنین محصول DAO تولیدی بسیار بی کیفیت بوده و مناسب جهت استفاده در واحدهای کاتالیستی پایین دست نیست. علاوه بر آن باعث گرفتگی مبدل های پایین دست نیز می شود و استفاده از کوره و صرف هزینه ثابت و عملیاتی بالاتر اجتناب ناپذیر است.

معمولاً از حلال های پروپان تا نرمال هپتان به دلیل نقطه جوش پایین و نامحلول بودن آنها در ترکیبات آسفالتین استفاده می شود. آسفالت زدایی در نسبت های مختلف حلال به دلیل رفتار فازی متفاوت رسوبات و جامدات قابل پیش بینی دقیق نیست و نیازمند تست های آزمایشگاهی است [۱۳-۱۴].

۳-۶- بررسی اثر فشار

با افزایش فشار به ازای یک حلال مشخص، میزان چگالی آن افزایش پیدا کرده و قابلیت حمل DAO و Lift آن توسط حلال افزایش پیدا می کند و باعث کاهش کیفیت آن می شود. فشار استخراج به گونه ای باید انتخاب شود که حلال و محصولات استخراج به صورت مایع باقی بمانند. افزایش فشار تا فشار بحرانی، باعث نزدیک شدن حلال به انحلال تعادلی خود می شود و نرخ افزایش بازده DAO کاهش می یابد؛ از طرفی افزایش بیش از حد فشار باعث افزایش هزینه های سرمایه گذاری می گردد.

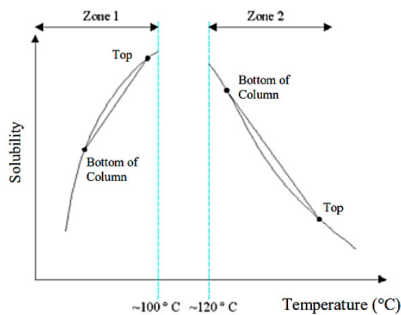
معمولاً فشار عملیاتی برج استخراج، پارامتری ثابت و قابل تنظیم بوده و مقدار آن بستگی به فشار بحرانی حلال مورد استفاده دارد. این معمولاً فشار برج مقداری بالاتر از فشار بحرانی حلال است. این موضوع با توجه به روش استخراج فوق بحرانی حلال و نبود پمپ در مسیر محصول بالای برج استخراج مایع-مایع به سمت قسمت بازیابی حلال در نمودارهای جریان فرایندی شرکت های مختلف قابل مشاهده است [۱۰-۵]. در جدول ۸، فشار و دمای بحرانی حلال های مورد استفاده در این واحد قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده



جدول ۸- دما و فشار بحرانی حلال‌های مورد استفاده در فرایند آسفالت‌زدایی

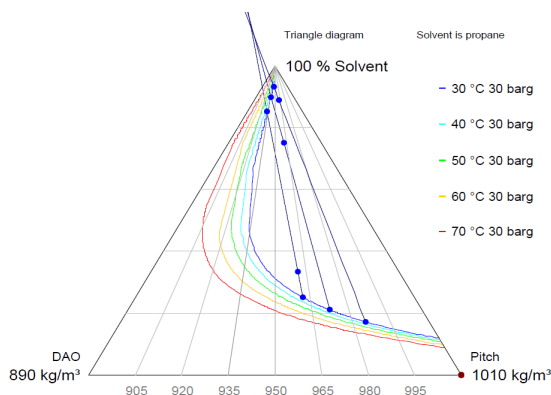
فشار بحرانی (barg)	دمای بحرانی (°C)	نوع حلال
۴۱.۵۵	۹۶.۷۵	پروپان
۳۵.۴۶	۱۳۴.۹	ایزو-بوتان
۳۶.۹۵	۱۵۲	نرمال-بوتان
۳۲.۳۲	۱۸۷.۲	ایزو-پنتان
۳۲.۷۴	۱۹۶.۵	نرمال-پنتان
۲۹.۳	۲۳۴.۷	نرمال-هگزان

فوق بحرانی وجود نداشته و دمای عملیاتی برج استخراج باید پایین‌تر از دمای بحرانی باشد [۵].



شکل ۹- پدیده اثر خوشه‌ای برای حلالیت DAO در حلال پنتان [۱۵]

در شکل ۱۰ نتایج آزمایش در نمودار مثلثی با حلال پروپان نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما در فشار ثابت، باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه دوفازی بین سیال Pitch-Solvent و DAO شده (حرکت نمودار آبی به قرمز) و حلالیت پروپان در روغن DAO در شرایط نزدیک بحرانی کاهش پیدا می‌کند. این موضوع با نزدیک شدن منحنی دوفازی (آبی به قرمز) به سمت ضلع بین دو فاز DAO و پروپان قابل درک است. نکته مورد توجه در این نمودار وجود ناحیه دوفازی در ضلع دو جزء حلال پروپان و Pitch است که به معنی عدم تمایل حل شدن این جزء در هم است.



شکل ۱۰- نمودار مثلثی حلالیت سه جزء پروپان Pitch و روغن DAO بر حسب تغییرات دما [۷]

می‌شود رنج فشار عملیاتی بین ۲۰ الی ۴۰ بار نسبی متغیر است [۵].

۴-۶- بررسی اثر دما

افزایش دما باعث کاهش چگالی حلال و کاهش بازده DAO و کاهش ناخالصی‌ها و افزایش کیفیت آن می‌شود. به طور مثال در شکل ۹ برای حلال پنتان این موضوع برای دماهای بالای ۱۲۰ درجه سانتیگراد برقرار بوده و برای دماهای پایین‌تر، حلالیت DAO در حلال با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند؛ به این پدیده اثر خوشه‌ای حلال گفته می‌شود.

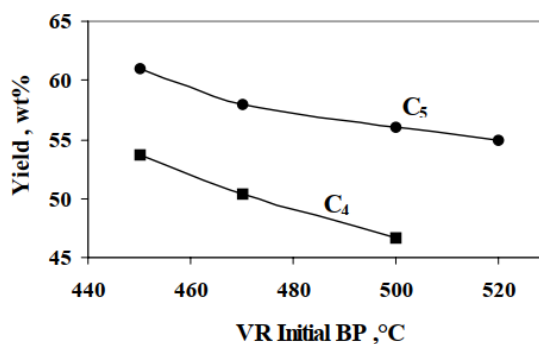
در برج استخراج به دلیل وجود خوراک ته‌مانده خلأ و محصول pitch و نقطه ریزش^۱ بالای این ترکیبات، دمای عملیاتی برج استخراج نباید در دماهای نزدیک محیط عمل کند؛ این موضوع باعث گرفتگی و تشکیل مواد جامد در برج می‌شود. همچنین پروپان باید به گونه‌ای باشد که در مسیر پایین به بالای برج، دما افزایش و حلالیت کاهش پیدا کند تا ناخالصی‌ها و ترکیبات سنگین‌تر در محصول بالای برج کمتر شود. بنابراین محدوده عملیاتی برج در زون دوم اتفاق می‌افتد. با توجه به جدول ۸ و دمای بحرانی حلال‌های مختلف، در برج استخراج در دمای بالاتر از دمای بحرانی حلال، هیچ انحلال‌پذیری روغن در حلال

۵-۶- بررسی اثر نوع خوراک واحد

افزایش نقطه جوش خوراک ورودی به واحد و سنگین‌تر شدن آن با

1- Pour Point

فرض ثابت ماندن بقیه عوامل، سبب کاهش کیفیت DAO (افزایش بازده DAO) و افزایش فلزات و ناخالصی در آن می‌شود. در شکل ۱۱، برای حلال بوتان و پنتان، با افزایش میزان نقطه جوش اولیه^۱ خوراک، میزان بازده روغن کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱- بازده روغن DAO بر حسب نقطه جوش اولیه خوراک برای حلال بوتان و پنتان [۱۵]

۶-۶- بررسی اثر نوع بازیابی حلال

اگر بازیابی حلال در زیر نقطه بحرانی سیال انجام شود، یعنی حلال آمیخته در روغن به صورت مایع باشد، نیازمند صرف انرژی بالایی برای گرمای نهان تبخیر حلال است؛ بنابراین استفاده از روش فوق‌بحرانی، باعث کاهش حلالیت روغن در حلال گردیده و راحت‌تر جداسازی اتفاق می‌افتد. چون در این حالت نیاز به تبخیر کامل حلال نیست و با گرمای نهان بالای حلال روبه‌رو نشده و انرژی

1- Initial Boiling Point (IBP)

کمتری برای گرمای محسوس صرف می‌شود و انرژی مصرفی. همان‌طور که در شکل ۱۲ الف و ب مشاهده می‌شود، بازیابی حلال با دوروش زیر نقطه بحرانی حلال و بالای نقطه بحرانی حلال براساس فشار و آنتالپی نمایش داده شده است.

نقطه A جریان DAO همراه با حلال در دما و فشار مشخص در خروجی بالای برج استخراج، نقطه E جداسازی حلال از DAO در ظرف تبخیر ناگهانی، نقطه F جداسازی نهایی حلال باقی‌مانده از DAO در برج Stripper تا ۰.۵ درصد است. بعد از نقطه F حلال به منظور استفاده مجدد در برج استخراج توسط مبدل خنک می‌شود و سپس توسط پمپ به شرایط عملیاتی برج استخراج (نقطه A) انتقال می‌یابد.

این موارد در هردو شکل مشترک است. همان‌طور در شکل ۱۲. الف مشاهده می‌شود، به منظور تبخیر حلال از نقطه A به E با افزایش دما و کاهش فشار در شرایط زیر بحرانی، از گرمای نهان حلال عبور می‌کند. در شکل ۱۲. ب این با گرم کردن حلال بدون کاهش فشار در نقاط A تا C با استفاده گرمای بخار حلال جدا شده در جداکننده DAO، گرمای DAO تولیدی در پایین برج Stripper، گرمای یوتیلیتی گرم و ایجاد شرایط فوق بحرانی برای حلال، ناحیه دوفازی حلال را دور زده و سپس جداسازی حلال صورت می‌گیرد. در نقطه C با جداکننده DAO حدود ۸۵ الی ۹۳ درصد حلال جدا شده و باقی ۷ الی ۱۵ درصد حلال در دو مرحله ظرف تبخیر ناگهانی (نقطه E) و برج Stripper (نقطه F) جدا می‌شوند. نقطه D حلال جدا شده در جداکننده DAO، با استفاده از تبادل حرارت

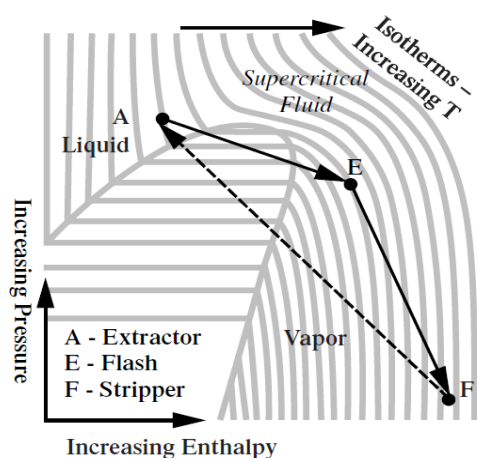
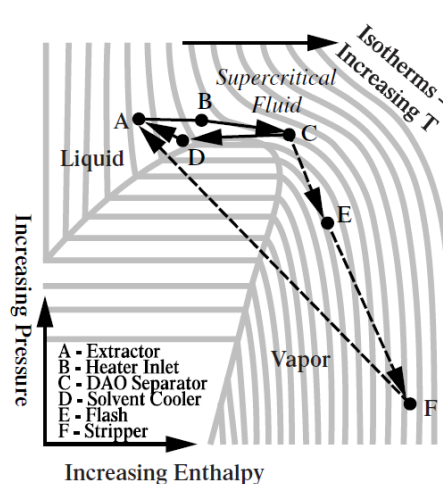


FIGURE 10.2.1 Conventional solvent recovery.

شکل ۱۲. الف) بازیابی حلال زیر نقطه بحرانی [۱۰]



شکل ۱۲. ب) بازیابی حلال بالای نقطه بحرانی [۱۰]

می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان در ۱ ساعت، ۲۴ ساعت و زمان تعادل، میزان رسوب آسفالت در یک نسبت حجمی مشخص حلال در نفت خام سنگین افزایش و میزان آسفالت حل شده کاهش می‌یابد.

همچنین مشاهده می‌شود، تنها در نسبت حجمی ۷۰ درصد حلال در نفت، کل آسفالت رسوب می‌کند. نکته مورد توجه در نمودار میزان وابستگی میزان رسوب تشکیل شده و اثر زمان تماس به نسبت حجمی حلال در نفت است. هرچه نسبت بیشتر باشد، در زمان کمتری میزان رسوب آسفالت مورد نظر تشکیل می‌شود. لازم به ذکر است که در واحد SDA، میزان معمول مورد نظر آسفالت باقی‌مانده در روغن DAO کمتر از ۱ درصد وزنی است [۲۰].

۸-۶- اثر سرعت در برج‌های RDC

سرعت چرخش دیسک‌ها در این نوع برج، تأثیر قابل توجهی بر بازده و کیفیت DAO تولیدی دارد. با افزایش سرعت چرخش با

با نقطه B خنک و مایع شده و سپس با یوتیلیتی سرد تا نقطه A خنک می‌شود. بازیابی حلال در شرایط فوق بحرانی نسبت به شرایط زیر بحرانی با تعدادی تبخیرکننده در جدول ۹ نشان داده شده است [۱۷-۱۰].

جدول ۹- مقایسه نسبی هزینه انواع روش‌های بازیابی حلال [۱۷]

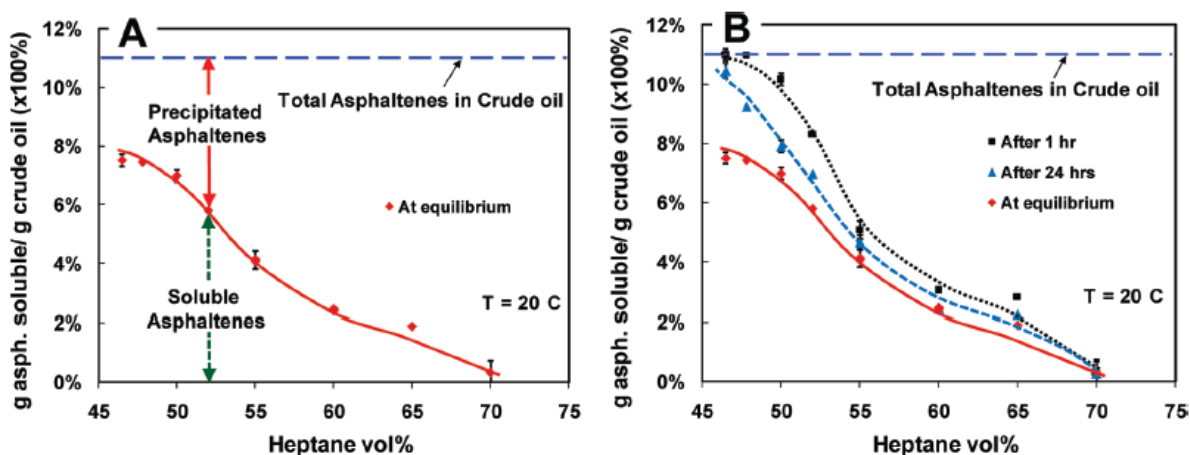
هزینه نسبی	نوع روش بازیابی حلال
۲۸۰	تبخیر تک مرحله‌ای
۱۷۰	تبخیر دو مرحله‌ای
۱۵۰	تبخیر سه مرحله‌ای
۱۰۰	شرایط فوق بحرانی (ROSE)

۷-۶- بررسی اثر زمان تماس

در شکل ۱۳ نتایج آزمایشی برای نفت خام سنگین با حدود ۱۰.۹ درصد وزنی آسفالت با حلال نرمال هپتان در حالت تعادل (رسوب آسفالت متوقف می‌شود) در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نمایش

جدول ۱۰- اثر سرعت دیسک چرخان در فرایند SDA [۱۰]

DAO properties					
RDC rotor speed (r/min)	DAO yield of feed, %vol	Viscosity, SSU at 100°C	API	CCR, %wt	Asphalt penetration, 0.1 mm at 25°C
۲۰	۷۶.۸	۱۹۴	۲۳.۲	۱.۴	۳۸
۳۵	۸۰.۳	۱۹۸	۲۳	۱.۵	۸
۵۰	۸۳.۳	۲۰۳	۲۲.۳	۱.۵	۱



شکل ۱۳- اثر زمان تماس و نسبت حجمی حلال n-CV در نفت سنگین بر میزان تشکیل رسوب آسفالت [۲۰]

Asphaltenes). <https://www.wellresources.ca/selex-asp>.

[9] Chevron Lummus Global (CLG) (2025). Residue Solvent Refining Solvent Deasphalting (RSR). <https://www.chevronlummus.com>.

[10] Meyers, R. A. (2004). Handbook of petroleum refining processes.

[11] م. منصوره گله، شبیه‌سازی فرایند آسفالتین زدایی با حلال: بررسی اثر نوع حلال و شرایط عملیاتی، کارشناسی ارشد دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، 1401.

[12] Houde, E. J., & McGrath, M. J. (2006, February). When solvent deasphalting is the most appropriate technology for upgrading residue. In IDTC Conference, London, England.

[13] ا. رضایی بابادی، توسعه مدل سینتیکی فرایند شکست حرارتی خوراک‌های آروماتیک، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۴۰۰.

[14] Tobrise, O. O., Ofodile, S. E., Osu, C., & Achugasim, O. (2016). Comparative evaluation of asphaltene precipitation from nigerian crude oil residue using intermediate and long chain single and binary n-alkane solvent mixtures. IOSR Journal of Applied Chemistry, 9(5), 82-86.

[15] Sattarin, M., Modarresi, H., Talachi, H., & Teymori, M. (2006). Solvent deasphalting of vacuum residue in a bench-scale unit. Petroleum & Coal, 48(3), 14-19.

[16] Sawarkar, A. N., Pandit, A. B., Samant, S. D., & Joshi, J. B. (2007). Petroleum residue upgrading via delayed coking: A review. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 85(1), 1-24.

[17] Dang, G. S., & Rawat, B. S. (2010). Role of Solvent Deasphalting in Processing Petroleum Residues in Refineries.

[18] Gillis, D. B., & Van Tine, F. (1998, June). What's new in solvent deasphalting. In Foster Wheeler International Corporation, Heavy Oils Conference (pp. 16-1).

[19] Kamiya, Y. (1991). Heavy oil processing handbook. RAROP, Japan, 109.

[20] Maqbool, T., Balgoa, A. T., & Fogler, H. S. (2009). Revisiting asphaltene precipitation from crude oils: A case of neglected kinetic effects. Energy & Fuels, 23(7), 3681-3686.

ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، باعث افزایش بازده و کاهش کیفیت DAO شده که این موضوع به دلیل افزایش نرخ انتقال جرم است. این اثر در نرخ سرعت دیسک و توان عملیاتی پایین قابل توجه‌تر است. در توان عملیاتی بالا، بخش زیادی از انرژی اختلاط از خود فازهای جریان مخالف به دست می‌آید. در این حالت، نرخ چرخش پایین برای رساندن سیستم استخراج به راندمان بهینه کافی است. در جدول ۱۰ مثالی از اثر سرعت چرخش دیسک در توان عملیاتی پایین را نمایش می‌دهد [۱۰].

۷- مراجع

[۱] شریعتمدار مرتضوی. (۲۰۱۵). امکان‌سنجی احداث واحد استخراج آسفالتین توسط حلال-طرح ارتقای محصولات سنگین نفتی. نشریه علمی فرایند نو، ۱۰(۵۱)، ۱۶۶-۱۷۷.

[2] Park, J. W., Im, S. I., & Lee, K. B. (2023). Techno-economic optimization of novel energy-efficient solvent deasphalting process using CO₂ as a stripping agent. Energy, 263, 125728.

[3] KBR (2019). Residuum Oil Supercritical Extraction (ROSE). <http://www.kbr.com/>

[۴] ۱۳۸۷، انجام برنامه ریزی خطی یک پالایشگاه نمونه ایران به منظور ارائه الگوی بهینه پالایش نفت خام <https://civilica.com/doc/1859862>.

[5] Magomedov, R. N., Pripakhaylo, A. V., Maryutina, T. A., Shamsullin, A. I., & Ainullov, T. S. (2019). Role of solvent deasphalting in the modern oil refining practice and trends in the process development. Russian Journal of Applied Chemistry, 92(12), 1634-1648.

[6] Kumar, R., Chebrolu, S., Voolapalli, R. K., & Upadhyayula, S. (2022). A solvent deasphalting dearomatization (SD-A2) process for heavy oil upgradation. Fuel, 307, 121923.

[7] Pörner Gruppe (2014). SDA PLUS (EDL. TECHNOLOGY). www.edl.poerner.de.

[8] Well Resources (2025). SELEX-Asp (Selective Extraction

