

امکان افزایش تولید سوخت جت با تبدیل نفت سفید مازاد در ایران

پژوهش نفت

سال هفدهم
شماره ۵۵
صفحه ۴۷ - ۳۴، ۱۳۸۶

● مریم قانديان* و محمد تیموری

پژوهشکده پالایش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت

ghaedianm@ripi.ir

چکیده

نشان می‌دهد که خواص اصلی اکثر آن‌ها (از جمله ارزش حرارتی و میزان آروماتیک‌ها) در حد استاندارد سوخت جت بوده و مابقی مشخصات نیز در عملیات تصفیه موجود در پالایشگاه‌ها به حد مطلوب می‌رسد. نتایج حاصل از پایلوت موجود در پالایشگاه تهران که در آن از نوعی کوالسر مایع - مایع استفاده شده است، کاهش مشکلات عملیاتی و هزینه را نشان می‌دهد. لذا تبدیل نفت سفید به سوخت جت می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه‌های انتخابی در تولید این ماده ارزشمند مدنظر قرار گیرد.

سوخت جت از جمله فرآورده‌های پالایشگاهی است که در سال‌های اخیر مصرف آن بیشترین نرخ رشد را در دنیا داشته است. با افزایش فعالیت‌های هوایی، در بازار رقابتی، پالایشگاهی که بتواند سوخت جت را با کیفیت بالا و کمترین قیمت تولید کند، از موقعیت بهتری برخوردار خواهد بود. نفت سفید (پایه تولید سوخت جت) یکی از فرآورده‌های اصلی در تمامی پالایشگاه‌های کشور است که روند مصرف آن در داخل رو به کاهش است. با توجه به پیشرفت طرح‌های گاز رسانی در سطح کشور و برنامه‌های آبی وزارت نفت، مبنی بر احداث پالایشگاه‌های میعانات گازی، این واحدهای صنعتی با مازاد تولید مواجه خواهند شد. ارزان‌ترین فرآیند تولید سوخت جت این است که بتوان تنها با تصفیه شیمیایی نفت سفید به تمامی مشخصات مورد نظر دست یافت.

واژه‌های کلیدی: سوخت جت، نفت سفید، اندیس جداسازی آب، تصفیه شیمیایی، مواد فعال سطحی، کوالسر مایع - مایع

در این تحقیق، نفت خام خوراک پالایشگاه‌های کشور تقطیرشده، برش نفت سفید تهیه و مشخصات آن تعیین شد. بررسی نتایج آزمایش‌ها

مقدمه

سوخت‌های هوایی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: بنزین هوایی و سوخت جت. بنزین هوایی در موتورهای رفت و برگشتی یا پیستونی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از سوخت جت (سوخت‌های هوایی توربینی)، در موتورهای توربو - فن، توربو جت و توربو - پروپ استفاده می‌شود [۱].

اولین موتورهای هواپیمای دنیا شبیه موتور اتومبیل بوده و همان سوخت را می‌سوزاندند. نیاز به توان بیشتر و عامل توسعه موتور منجر به تولید بنزین متناسب با آن شد. بهبود بنزین‌های هوایی به‌عنوان سوخت موتورهای احتراق داخلی در فاصله سال‌های ۴۵-۱۹۳۹ مصادف با جنگ جهانی به اوج خود رسید [۲].

اختراع موتور توربینی در دهه ۱۹۴۰ برای نیاز به توان و قدرت بیشتر، پاسخ مناسبی بود. با توجه به عدم نیاز این موتورها به مشخصات ویژه‌ای از سوخت، نفت سفید معمولی اولین سوخت موتورهای توربینی بود. با پیچیده‌تر شدن طراحی و کنترل این نوع موتورها، تعداد مشخصه‌های سوخت نیز بیشتر پیچیده‌تر شد. نیاز به عملکرد بهتر، مصرف کمتر، و زمان کوتاه‌تر برای تعمیرات اساسی، منجر به افزایش مشخصات لازم برای سوخت و بهینه کردن کیفیت آن و افزایش تولید شده است [۲].

مشخصه‌های سوخت به دو دسته کلی خواص توده و جزئی تقسیم می‌شود. خواص توده، آن دسته از خواص است که تغییر ترکیب اصلی سوخت (بیش از ۵ درصد حجمی)، آن‌ها را تغییر می‌دهد. خواص جزئی، خواصی است که با تغییر کمتر از یک درصد حجمی یا حتی چند ppm از ترکیب سوخت، تغییر می‌کنند [۳]. جدول ۱ برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سوخت‌های هوایی و نوع هر خاصیت را نشان می‌دهد. به‌علاوه، یکی از الزامات اصلی و مهم سوخت، سازگاری آن با مواد سازنده به‌ویژه الاستومرهای مصرفی در دیافراگم، مخزن سوخت، پوشش و درزگیرهای مخزن، لوله‌ها و انواع گسترده‌ای از آب بندهای ساکن و متحرک، در تمامی قسمت‌های سیستم سوخت می‌باشد. یکی از معیارهای نشان دهنده این سازگاری میزان کل آروماتیک‌ها است [۳]. بین‌المللی بودن ماهیت فعالیت‌های هوایی، نزدیک بودن مشخصات سوخت‌ها را در سراسر دنیا ضروری می‌نماید، در این صورت تنها تفاوت‌های جزئی (و محلی) باقی می‌ماند.

بنزین هوایی (Aviation Gasoline : avgas)

این بنزین، شبیه بنزین موتور معمولی با فراریت و نقطه انجماد پایین‌تر و دامنه جوش محدودتر می‌باشد. طبقه‌بندی و نام‌گذاری بنزین‌های هوایی بر اساس حداقل عدد اکتان

جدول ۱- انواع خواص سوخت جت و بنزین هوایی (avgas)

خواصیت مربوط با توده ترکیب	خواصیت مربوط با توده ترکیب
روان کاری (+)	انرژی (ارزش حرارتی)
پایداری اکسیداسیون (صمغ)	مشخصه‌های احتراق (نقطه دود، Luminometer، مقدار نفتالین‌ها، درصد آروماتیک‌ها)
خورندگی (گوگرد، اسیدیته)	عدد اکتان (x)
جدا سازی آب ^۱ (Water reaction، WSIM)	فراریت (دامنه جوش، نقطه اشتعال، فشار بخار x)
هدایت الکتریکی	دانسیته
تمیزی (ذرات جامد، آب آزاد)	سیالیت: کارکرد در دمای پایین (نقطه انجماد، گراندروی)

x ویژه avgas

+ ویژه سوخت جت

1. Water Separation

2. Water Separation Index Modified

آن‌ها است.

در تعیین الزامات سوخت هواپیمایی با موتور پیستونی، هدف اصلی اطمینان از کیفیت احتراق مطلوب سوخت می‌باشد.

مهم‌ترین خاصیت، کیفیت ضد ضربه^۱ است. سایر مشخصات مانند دامنه تقطیر و فراریت نیز به دلیل تاثیر بر توزیع ترکیبات مخلوط و استارت سرد دارای اهمیت هستند. بقیه خواص جهت اطمینان از مناسب بودن عمر ذخیره‌سازی سوخت، خورنده نبودن و کارکرد رضایت بخش موتور، در تمامی شرایط عملیات می‌باشد [۴].

در ابتدا، بنزین موتور اتومبیل و در نتیجه بنزین هواپیما از برش حاصل از تقطیر نفت خام با دامنه جوش مناسب بدست می‌آمد. تمام بنزین‌های حاصل از تقطیر^۲ عدد اکتان پایین داشته (بین ۵۰ تا ۷۰) و الزامات avgas را تامین می‌نمایند (بنزین نفت‌های خام آروماتیکی نسبت به پارافینی عدد اکتان بالاتری دارد). با توسعه موتورهای پیستونی هواپیما با عملکرد بالاتر، تقاضا برای بنزین با اکتان بالا افزایش یافت و در دهه ۱۹۳۰ دو فرآیند پالایشگاهی برای کراکینگ کاتالیستی و آلکیل‌اسیون تولید ترکیباتی با عدد اکتان بالا، توسعه یافت. بنزین حاصله از هر دو فرآیند نامبرده به طور گسترده در طول جنگ جهانی دوم به کار رفت، به طوری که عدد اکتان avgas از ۸۷ به ۱۱۵/۱۴۵ رسید.

در دهه بعد از جنگ، شش نوع بنزین در هواپیماهای جنگی و تجاری با درجه‌های مختلف استفاده می‌شد. در همان سال‌ها در ارتش، موتورهای توربینی جای موتورهای پیستونی را گرفت و با غلبه این نوع موتور در ناوگان تجاری، تقاضا برای تولید سوخت‌های مذکور و افزایش عدد اکتان، کاهش یافت. به طوری که دو نوع بنزین هوایی ۸۰ و ۱۰۰/۱۳۵ (که بر اساس نام گذاری جدید ۱۰۰ نامیده می‌شود) بجا ماند. اخیراً نوع^۳ ۱۰۰LL نیز برای استفاده در موتورهایی که طراحی آن‌ها بر اساس سوخت با میزان سرب پایین است معرفی شده است. هر سه نوع سوخت گفته شده حاوی سرب هستند ولی در حال حاضر

۱۰۰LL عمومی‌ترین و بیشترین مصرف را دارد [۵].

به‌طور کلی برای این‌که avgas تمامی الزامات را دارا باشد، از مخلوط چند برش و فرآورده به نسبت‌های مناسب استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال پایه تولید سوخت نوع ۱۰۰LL و ۱۰۰، آلکیلات است و برای تنظیم اکتان rich-mixture به آن تولوئن اضافه می‌شود. بنزین نوع ۸۰ عمدتاً از بنزین مستقیم که عملیات تصفیه روی آن انجام شده باشد، تولید می‌شود. به منظور تنظیم فشار بخار avgas نیز هیدروکربن‌های سبک مانند بوتان به آن اضافه و نهایتاً غلظتی مناسب از تترا اتیل سرب یا اتیلن دی بروماید، رنگ و مواد افزودنی مورد نیاز دیگر به آن اضافه می‌شود. جدول ۲ محدوده مشخصات این سه نوع سوخت را نشان می‌دهد.

مشخصات سوخت جدیدی به نام ۸۲UL برای بنزین بدون سرب با اکتان پایین، توسط ASTM ارائه شده است که در استاندارد ASTM D 6227 آورده شده است [۶]. تجاری شدن این سوخت بستگی به توسعه موتوری جدید که بتواند از آن استفاده نماید، دارد.

امروزه بنزین هوایی عمدتاً در هواپیماهای کوچک و هلیکوپترهای سبک استفاده می‌شود و چنان‌چه ذکر شد به دلیل پیشرفت و توسعه کاربرد موتورهای توربینی، تولید و مصرف این نوع سوخت به شدت کاهش یافته است. به طوری که در سال ۱۹۹۹ کل تولید بنزین هوایی در ایالات متحده آمریکا ۰/۸ mG/day بوده است که در مقایسه با تولید سوخت توربینی (۷۵ mG/day) بسیار ناچیز است. طبق اطلاعات موجود، مصرف بنزین هوایی در دنیا در سال ۱۹۹۶ حدود ۲/۲ mG/day تخمین زده شده است [۵].

سوخت توربین هوایی^۱ (سوخت جت)

موتورهای توربین گازی هواپیما به سوختی متفاوت با بنزین هوایی نیاز دارند. تفاوت اصلی در نیاز به مشخصه‌های احتراقی بهتر و ارزش حرارتی بالاتر در واحد حجم می‌باشد [۴]. ارزش حرارتی سوخت‌های هوایی در جدول ۳ ارائه شده است. سوخت جت مخلوطی از تعداد زیادی هیدروکربن بوده و به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود:

1. Anti-Knock Rating
2. Straight Run Gasoline
3. Low Lead

جدول ۲- مشخصات سه نوع بنزین هوایی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۰۰LL

روش آزمایش ASTM	مقدار	خاصیت
D 86	(°C)	تقطیر: درصد حجمی تبخیر شده:
	۷۵	٪۱۰ حداکثر
	۷۵	٪۴۰ حداقل
	۱۰۵	٪۵۰ حداکثر
	۱۳۵	٪۹۰ حداکثر
	۱۷۰	نقطه جوش انتهایی
	۱۳۵	٪T۵۰ + T۱۰، حداقل
	۹۷	بازیافت، vol%، حداقل
	۱/۵	باقی مانده، vol%، حداکثر
	۱/۵	اتلاف، vol%، حداکثر
D 5191 یا D 5190		فشار بخار در ۳۸°C، kPa:
D 323	۳۸/۰	حداقل
	۴۹/۰	حداکثر
D 2386	-۵۸	نقطه انجماد، °C، حداکثر
D 2622 یا D 1266	۰/۰۵	مقدار گوگرد، wt%، حداکثر
D 3338 یا D 4529	۴۳/۵	انرژی احتراق خالص، MJ/kg، حداکثر
D 130	No.۱	خوردگی تیغه مس، ۲ ساعت در ۱۰۰°C، حداکثر
D 873		پایداری اکسیداسیون بعد از ۵ ساعت، mg/100 ml:
	۶	صمغ پتانسیل، حداکثر
	۳	رسوب سرب، حداکثر
D 1094	± ۲	واکنش آب، تغییر حجم، ml حداکثر
D 2700/D909	۸۰/۸۷	عدد اکتان یا عملکرد، lean mix./rich mix. حداقل
	۹۹,۵ / ۱۳۰	grade : ۸۰
	۹۹,۵ / ۱۳۰	۱۰۰
		۱۰۰ LL
D 3341 یا D5059	۰/۱۳	غلظت تترایتیل سرب ml TEL/l، حداکثر
	۱/۰۶	grade : ۸۰
	۰/۵۳	۱۰۰
		۱۰۰ LL

جدول ۳- نمونه‌ای از ارزش حرارتی سوخت‌های هوایی بر حسب دانسیته آنها

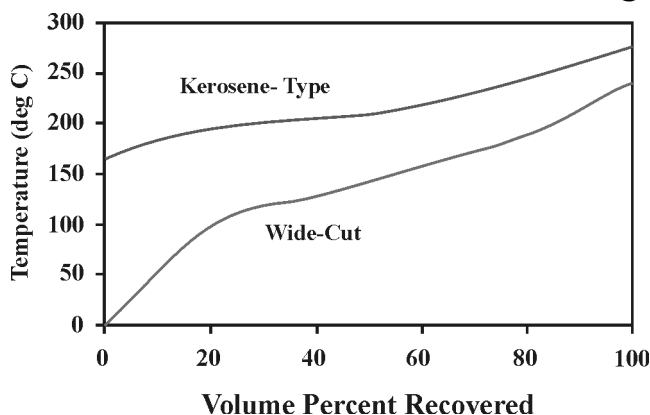
انرژی حرارتی				دانسیته در ۱۵ °C		سوخت
مبنای حجمی		مبنای وزنی		lb/US gal	g/ml	
Btu/gal	MJ/l	Btu/lb	MJ/kg			
۱۱۲,۵۰۰	۳۱/۰۰	۱۸,۸۰۰	۴۳/۷۱	۵/۹۷	۰/۷۱۵	بنزین هوایی سوخت جت :
۱۱۹,۰۰۰	۳۳/۱۸	۱۸,۷۲۰	۴۳/۵۴	۶/۳۶	۰/۷۶۲	دامنه وسیع
۱۲۵,۸۰۰	۳۵/۰۶	۱۸,۶۱۰	۴۳/۲۸	۶/۷۶	۰/۸۱۰	نفت سفید

توربینی است. بعد از جنگ جهانی دوم نیروی هوایی آمریکا جهت تامین حجم بیشتری از سوخت، استفاده از دامنه وسیعی از سوخت را آغاز کرد [۳]. با پیچیده‌تر شدن طراحی سیستم سوخت رسانی و موتور، مشخصات سوخت نیز تغییر کرده و محدود کننده‌تر شده. تقاضا برای عملکرد بهتر، مصرف کمتر و دوره تعمیرات کوتاه‌تر، محدودیت‌ها را بیشتر کرده است. جدول ۴ مشخصه‌های سوخت‌های هوایی Jet B، Jet A، Jet A-1 و TS-1 را نشان می‌دهد [۷، ۳، ۹].

مصرف سوخت جت در طی دوره ۲۵ ساله (۱۹۷۴ تا ۱۹۹۹) در ایالات متحده بیش از دو برابر شده است. یعنی از ۳۲ به ۷۵ mg/day رسیده است. طبق آخرین اطلاعاتی که در دسترس است مصرف جهانی در سال ۱۹۹۸ بالغ بر ۱۷۸ mg/day بوده است که نسبت به ۱۹۹۰ بیش از ۱۳ درصد افزایش داشته و روند افزایش مصرف ادامه دارد. شکل ۲ توزیع مصرف را نشان می‌دهد [۵].

۱ - سوخت جت نفت سفید: این نوع سوخت توزیع کربن بین ۸ و ۱۶ (دامنه جوش ۱۵۰ تا ۳۰۰ و عمدتاً کمتر از ۲۵۰°C) دارد. دو نوع اصلی سوخت جت با پایه نفت سفید عبارتند از Jet A و Jet A-1 که تفاوت اصلی آنها در نقطه انجماد است (Jet A: -۴۰°C و Jet A-1: -۴۷°C). در ایالات متحده عمدتاً از Jet A و سایر نقاط دنیا از Jet A-1 استفاده می‌شود (کشورهای CIS و اروپای شرقی از سوخت روسی TS-1 که پایه آن نفت سفید سبک است، استفاده می‌نمایند).

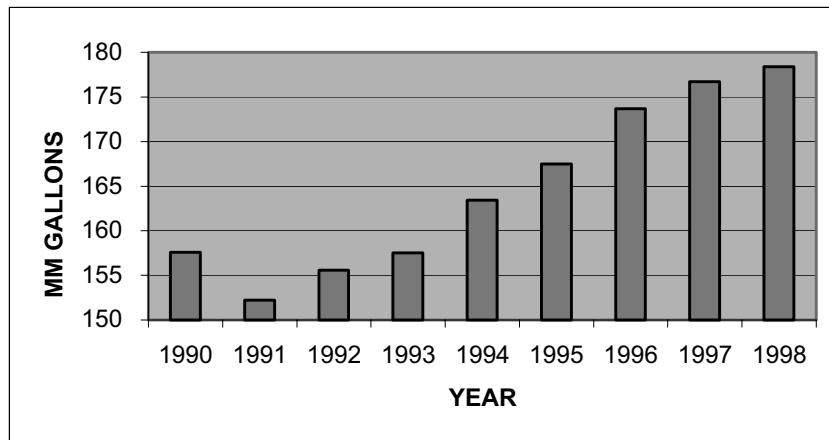
۲ - سوخت جت با دامنه جوش وسیع (Jet B): این نوع سوخت جت دارای تعداد اتم کربن بین ۵ و ۱۵ بوده و مخلوطی از نفت سفید و بنزین است. سوخت جت نوع B در آب و هوای سرد عملکرد بهتری داشته و بیشتر به کار می‌رود. JP-۴ سوخت هواپیماهای نظامی است و معادل Jet B می‌باشد. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی تقطیر دو نوع سوخت جت را نشان می‌دهد. در دهه ۱۹۳۰ طراحی و ساخت موتورهای توربین گازی توسعه یافت. نفت چراغ اولین سوخت موتورهای



شکل ۱- نمونه ای از منحنی های تقطیر D 86 سوخت‌های جت نوع نفت سفید و برش وسیع

جدول ۴ - خلاصه مشخصات دو گروه سوخت جت

روش آزمایش ASTM	TS-1	Jet A Jet A-1	Jet B	خاصیت
				ترکیب درصد:
D 3242	۰/۷	۰/۱	-----	اسیدیته mgKOH/g، حداکثر
D 1319	۲۲/۰	۲۵	۲۵	آروماتیک، vol%، حداکثر
D 3227	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	مرکاپتان، wt%، حداکثر
D 1266 , D 2622,...	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳	گوگرد، wt%، حداکثر
				فراریت:
D 86	(°C)	(°C)	(°C)	تقطیر:
	۱۶۵	۲۰۵	---	درصد حجمی تبخیر شده:
	-----	-----	۱۴۵	۱۰ حداکثر
	۱۹۵	-----	۱۹۰	۲۰ حداکثر
	۲۳۰	-----	۲۴۵	۵۰ حداکثر
	۲۵۰@/۹۸	۳۰۰	---	۹۰ حداکثر
	-----	۱/۵	۱/۵	نقطه جوش انتهایی، حداکثر
	-----	۱/۵	۱/۵	باقیمانده، vol%، حداکثر
				اتلاف، vol%، داکثر
D 3828 یا D 56	۲۸	۳۸	-----	نقطه اشتعال، °C، حداقل
D 4052 یا D1298	۷۷۵	۷۷۵-۸۴۰	۷۵۱-۸۰۲	دانسیته در ۱۵ °C، kg/m ³
D 5191 یا D 323	-----	-----	۲۱	فشار بخار در ۳۸ °C، kPa، حداکثر
				سیالیت:
D5972 یا D2386,D4305,D5501	-۶۰	-۴۰ (Jet A)	-۵۰	نقطه انجماد، °C، حداکثر
D 445	۸/۰@-۴۰°C	-۴۷ (Jet A-1)	---	گرانروی در ۲۰ °C، mm ² /sec، حداکثر
				احتراق:
D 4809 یا D4529,D3338	۴۳/۱۶	۴۲/۸	۴۲/۸	ارزش حرارتی، MJ/kg، حداقل
D 1740	-	۴۵	۴۵	یکی از الزامات زیر:
D 1322	۲۵	۲۵	۲۵	۱- عدد Luminometer، حداقل
D 1322	-	۱۸	۱۸	۲- نقطه دود، mm، حداقل
D 1840	-	۳/۰	۳/۰	۳- نقطه دود، mm، حداقل و نفثالین ها، vol%، حداکثر
				خوردگی:
D 130	Pass	No.۱	No.۱	خوردگی تیغه مس، ۲ ساعت در ۱۰۰°C، حداکثر
				پایداری:
D 3241	-----	۲۵	۲۵	پایداری حرارتی، ۲/۵ ساعت در ۲۶۰°C:
	-----	کد ۳	کد ۳	افت فشار فیلتر، mmHg، حداکثر
				رسوب، کمتر از
				آلودگی ها:
D 381	-----	۷	۷	پتانسیل تشکیل صمغ، mg/100ml، حداکثر
D 1094	-----	۱b	۱b	واکنش آب، تغییر سطح دو فاز، حداکثر



شکل ۲- روند مصرف جهانی سوخت جت در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۸

تبدیل می‌شود. تغییرات شیمیایی دیگری که در این شرایط رخ می‌دهد، اشباع شدن برخی از حلقه‌های آروماتیکی و شکستن ترکیبات گوگردی و نیتروژن‌دار و در نتیجه حذف N و S است. فرآیند شکست هیدروژنی درصد بالایی از محصولات میان تقطیر (در محدوده جوش نفت سفید و گازوئیل) را تولید می‌کند. نفت سفید تولیدی، تمامی مشخصات لازم سوخت جت را دارا بوده و نیازی به تصفیه اضافی ندارد.

سوخت‌های جت می‌بایست مشخصه‌های بین المللی سوختی را دارا باشند، چرا که توسط خطوط هوایی در سراسر دنیا مصرف شده، و صرفه‌نظر از محل فرود و سوخت‌گیری هواپیما، سوخت با کیفیت بالا، ایمن و کنترل شده خریداری می‌شود. مشخصات مهم این سوخت عبارتند از اسیدیته، میزان آروماتیک، الفین، نفتالین، نقطه دود، گوگرد، مرکاپتان، نقطه انجماد، رنگ و اندیس جدا سازی آب (WSIM). بسیاری از این خواص به هیدروکربن‌های اصلی تشکیل دهنده سوخت مربوط بوده و با تصفیه متداول (با سود) تغییر نمی‌کند.

دو هدف اصلی در فرآیند تصفیه با سود، کاهش اسیدیته و مرکاپتان‌ها است. عدد اسیدی نشان دهنده پتانسیل خوردگی تجهیزات و موتور هواپیما می‌باشد.

ترکیبات اسیدی شامل اسیدهای کربوکسیلیک، H_2S ، مرکاپتان‌ها، فنل‌ها و ... می‌باشند. اسیدهای نفتیک بیشترین سهم را در اسیدیته سوخت جت دارا هستند. این نام عمومی برای آن دسته از کربوکسیلیک اسیدهایی است

فرآیندهای تولید سوخت جت

تقریباً کل سوخت جت از نفت خام و درصد کمی از آن از oil sand تهیه می‌شود. اخیراً فرآیند فیشر- تروپش (تبدیل گاز به مایع) برای تولید مخلوط سنتزی سوخت جت در حال توسعه است. امروزه به این فرآیند توجه و علاقه زیادی معطوف شده و در آینده میزان سوخت جت تولیدی از این روش افزایش خواهد یافت.

در پالایشگاه، برش نفت سفید مستقیماً از برج تقطیر اتمسفریک به دست می‌آید و برای تبدیل به سوخت جت " فرآیندهای بهبود کیفیت " روی آن انجام می‌شود. در این نوع فرآیندها با استفاده از واکنش‌های شیمیایی با حذف ترکیبات جزئی اسیدی موجود که خواص نامطلوبی را ایجاد می‌کنند، کیفیت مواد بهبود می‌یابد. از طرفی، ترکیبات اصلی خوراک و در نتیجه خواص کلی تغییر نمی‌کند. معمول‌ترین فرآیندهای ارتقاء کیفیت سوخت جت، شیرین سازی، تصفیه با خاک و تصفیه هیدروژنی^۱ می‌باشد.

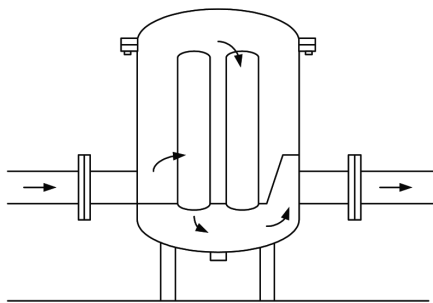
همچنین، بخشی از سوخت جت از محصول واحد شکست هیدروژنی^۲ به دست می‌آید. این فرآیند کاتالیستی یکی از فرآیندهای اصلی تبدیل است که در حضور هیدروژن و تحت فشار بالا انجام می‌شود. خوراک این واحد گازوئیل سنگین برج خلاء^۳ (VGO) است.

مولکول‌های بزرگ VGO با شکست پیوند کربن - کربن و اضافه شدن هیدروژن، به دو مولکول کوچک‌تر

1. Hydrotreating
2. Hydrocracking
3. Vacuum Gas Oil

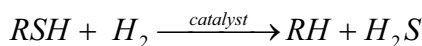
تصفیه متداول، تشکیل همین امولسیون پایدار است. باقی ماندن این ترکیبات در محصول، راندمان عملکرد و فرآیندهای بعدی را تحت تاثیر قرار داده و باعث می شود برخی مشخصات از جمله WSIM و water reaction (واکنش یا جداسدن آب) سوخت جت از حد استاندارد خارج شود. بنابراین فیلترهای سوخت گیری هواپیما مسدود و به سرعت غیر فعال می شوند.

در بسیاری از موارد فیلتراسیون با خاک، آخرین مرحله عملیات تصفیه است. در این فرآیند ساده، سوخت از میان بستری از خاک عبور می کند. برخی از ترکیبات قطبی، به ویژه مواد فعال سطحی، در سطح خاک جذب و از سوخت حذف می شود. بهترین خاک برای این منظور Attapulgus است [۳]. شکل ۳ شمایی از یک سیستم فیلتراسیون با خاک را نشان می دهد [۵].



شکل ۳- شمای فیلتر تصفیه با خاک

تصفیه هیدروژنی می تواند برای تصفیه نفت سفید و تولید سوخت جت جایگزین تمامی مراحل فوق شود. این عنوان عمومی برای آن دسته از فرآیندهایی است که از هیدروژن و کاتالیست مناسب برای حذف ترکیبات نامطلوب از جریان های پالایشگاه استفاده می کنند. دامنه این فرآیندها عبارت است از شرایط ملایمی که ترکیبات فعال مانند اولفین ها و برخی از ترکیبات گوگرددار و نیتروژن دار را می شکند، و شرایط بسیار شدیدی که حلقه های آروماتیک را اشباع می کند و تقریباً تمام گوگرد و نیتروژن را حذف می نماید. در این فرآیند مولکول های گوگرددار شکسته و گوگرد به هیدروژن سولفاید تبدیل می شود که از سوخت، حذف می گردد.

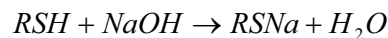
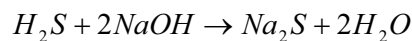
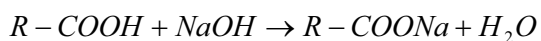


تصفیه هیدروژنی قادر است از نفت سفید اغلب نفت های خام، سوخت جتی تولید کند که تمامی مشخصه های لازم

که در ساختمان خود یک حلقه هیدروکربنی اشباع و عامل آلی اسیدی COOH - متصل به اتم کربن دارند.

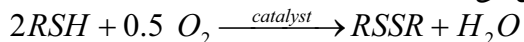
مرکاپتان ها نام عمومی ترکیبات آلی است که در آنها یک اتم گوگرد و یک اتم هیدروژن (-SH) به یکی از اتم های کربن مولکول متصل است. اتم هیدروژن -SH می تواند یونیزه شده و محیط اسیدی ضعیفی تولید کند که البته این خاصیت کمتر از اسیدهای نفتنیک است. بارزترین مشخصه مرکاپتان ها بوی شدید و نامطبوع آنها حتی در غلظت های چند ppm است.

در عملیات شستشو با سود واکنش های زیر رخ می دهد:



قابل ذکر است که سود قادر به حذف مرکاپتان های سنگین نیست و چنانچه نفت سفید حاوی این ترکیبات بوده و مقدار آن بیش از حد مجاز باشد، می بایست از فرآیند اکسیداسیون مرکاپتان استفاده نمود. که در آن مرکاپتان به دی سولفاید تبدیل می شود که خورندگی و بوی نامطبوع مرکاپتان ها را ندارد.

معروف ترین این فرآیندها، فرآیند مراکس است که از کاتالیست پایه کبالت استفاده می کند. در اکثر فرآیندهای شیرین سازی میزان کل گوگرد سوخت چندان کاهش نمی یابد اما در برخی از این فرآیندها دی سولفاید تولیدی را استخراج و در نتیجه میزان کل گوگرد نیز کاهش می یابد.



چنانچه اشاره شد در مرحله تصفیه با سود، نفتنات سدیم تشکیل می شود که این ماده خاصیت مواد فعال سطحی^۲ داشته و تمایل زیادی به ایجاد امولسیون پایدار با سوخت جت دارد و به سختی شکسته می شود. با توجه به این که در اکثر سیستم های تصفیه مرسوم که بر اساس اختلاط - ته نشینی^۳ کار می کنند، زمان اقامت برای جداسازی کامل کافی نیست، یکی از مشکلات اصلی سیستم های

1. Merox: Mercaptan Oxidation
2. Surfactant
3. Mixing / Setting

تامین بخش بنزینی سوخت JP-4 از نفتای محصول واحد تصفیه هیدروژنی (Unifiner) و یا بنزین سنگین برج تقطیر^۳ (HSRG) البته پس از تصفیه شیمیایی استفاده می‌شود و فشار بخار آن با افزودن مقدار مناسب پنتان تنظیم می‌گردد.

واحد تصفیه نفت سفید (Kerosene Treating Unit)

این واحد تصفیه شیمیایی که بر مبنای استفاده از سود^۴ کار می‌کند، در اکثر پالایشگاه‌های کشور، شامل مراحل زیر است:

- ۱ - اختلاط سود دارای غلظت مشخص با خوراک (نفت سفید یا HSRG)
- ۲ - جدا کردن محصولات واکنش (مرکاپتان‌ها، نفتنات‌ها، سود)
- ۳ - شستشو با آب
- ۴ - فیلتراسیون با استفاده از بستر شنی
- ۵ - فیلتراسیون با استفاده از بستر نمکی

را تامین نماید. اما هزینه سرمایه ثابت آن ۱۰ تا ۲۰ برابر و هزینه های عملیاتی بین ۲۰ تا ۵۰ برابر تصفیه با سود^۱ می‌باشد (جدول ۵) [۸]. لذا تا جایی که امکان پذیر است پالایش‌گران از این فرآیند اجتناب می‌کنند.

وضعیت تولید سوخت جت در پالایشگاه‌های داخلی

در حال حاضر در پالایشگاه‌های کشور دو نوع سوخت جت ATK (نوع Jet A) و JP-4 (نوع Jet B) تولید می‌شود. جدول ۶ میزان تولید این سوخت‌ها در کل پالایشگاه‌ها و همچنین مصرف را از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۲ نشان می‌دهد. با توجه به این که اکثر پالایشگاه‌ها دارای فرآیند شکست هیدروژنی^۲ می‌باشند، از نفت سفید حاصل از این واحد برای تهیه سوخت جت استفاده می‌شود. همچنین نفت سفید حاصل از برج تقطیر نیز پس از عملیات تصفیه شیمیایی در تولید سوخت جت به کار می‌رود. به منظور

جدول ۵ - مقایسه هزینه‌های فرآیندهای تصفیه شیمیایی و هیدروژنی

فرآیند	سرمایه ثابت دلار به ازای ۱۰۰۰ متریک تن محصول	هزینه عملیاتی دلار به ازای ۱۰۰۰ متریک تن محصول
تصفیه شیمیایی	۴۰۰,۰۰۰-۱,۲۰۰,۰۰۰	۸۰-۴۰۰
تصفیه هیدروژنی	۸,۰۰۰,۰۰۰-۱۲,۰۰۰,۰۰۰	۴۰۰۰-۸۰۰۰

جدول ۶ - میزان تولید و مصرف سوخت‌های جت در داخل کشور (متر مکعب در روز)

سال	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	۱۳۸۱	۱۳۸۲	
تولید:	سوخت JP-4	۴۷۶	۳۹۴	۴۸۹	۳۱۷	۴۴۷
	سوخت ATK	۲۴۲۲	۲۶۱۷	۲۶۰۹	۲۴۲۳	۲۵۵۳
مصرف:	سوخت JP-4	۴۳۱	۴۳۸	۴۲۹	۳۷۶	۳۴۳
	سوخت ATK	۲۳۴۱	۲۵۰۵	۲۵۸۴	۲۳۸۰	

3. Heavy Straight Run Gasoline
4. Caustic Treatment

1. Wet Treating
2. Isomax

پتانسیل تبدیل آن به سوخت جت با حداقل هزینه را نشان می‌دهد. به طوری که، عملیات تصفیه به kero-treater موجود محدود شده و نیازی به تصفیه هیدروژنی که بسیار پر هزینه است (جدول ۵) نمی‌باشد.

بیشترین مشکلی که در واحد تصفیه پیش می‌آید و باعث خارج شدن مشخصات سوخت جت از استاندارد می‌شود، باقی ماندن کمی سود، قطرات آب و مقادیر جزئی مواد فعال سطحی (که عمدتاً نفتانات سدیم است) در محصول می‌باشد. همچنین، برخی از انواع مواد باز دارنده خوردگی که به بالای برج تقطیر تزریق می‌شود مانند مواد فعال سطحی عمل کرده و در صورت انتقال به نفت سفید، مشخصات سوخت جت را از حد مورد نیاز دور می‌سازد.

به‌کارگیری فناوری‌های جدید، رفع این مشکل را به راحتی امکان‌پذیر نموده است. یکی از آن‌ها استفاده از نوعی کوالسر است که در مرحله بعد از اختلاط سود و خوراک به‌کار می‌رود و به کمک آن کل سود و ذرات ناخالصی موجود در جریان اصلی جدا می‌شود. استفاده از این سیستم، فرآیند تولید سوخت جت را از مراحل بعدی یعنی شستشو با آب، فیلتر شنی و فیلتر نمکی بی‌نیاز می‌کند. بدین ترتیب در میزان آب مصرفی بسیار صرفه جویی شده و هزینه عملیات به شدت کاهش می‌یابد.

پس از مطالعه و بررسی و انتخاب سیستم مناسب، جهت دستیابی به نتایج عملی، در یک فاصله زمانی در دو نوبت، پایلوت سیستم کوالسر مایع - مایع در دو محل از واحد kero-treater پالایشگاه تهران (یک بار بعد از مرحله اول شستشو با آب (۷-۵۰۳) و بار دیگر بلافاصله بعد از اختلاط سوخت با سود (۷-۵۰۷)، شکل ۴ نصب، و به‌طور آزمایشی تحت شرایط کنترل شده به کار گرفته شد.

با گرفتن یک جریان جانبی از خط جریان خروجی از مخلوط کننده خوراک و سود (مرحله شستشو با سود) در واحد تصفیه، عملاً پایلوت در شرایط عملیاتی (فشار ۳۵psi و دمای ۱۲۰°F) و با دبی کاهش یافته، به کار گرفته شد.

اجزای اصلی پایلوت شامل یک فیلتر اولیه ۱۰ میکرونی و یک کوالسر مایع - مایع می‌باشد و دبی جریان توسط یک شیر سوزنی و اندازه‌گیری زمان پر شدن لوله استوانه مدرج، کنترل می‌شد.

۶ - شکل ۴ دیاگرام فرآیندی واحد kero-treater پالایشگاه تهران را نشان می‌دهد.

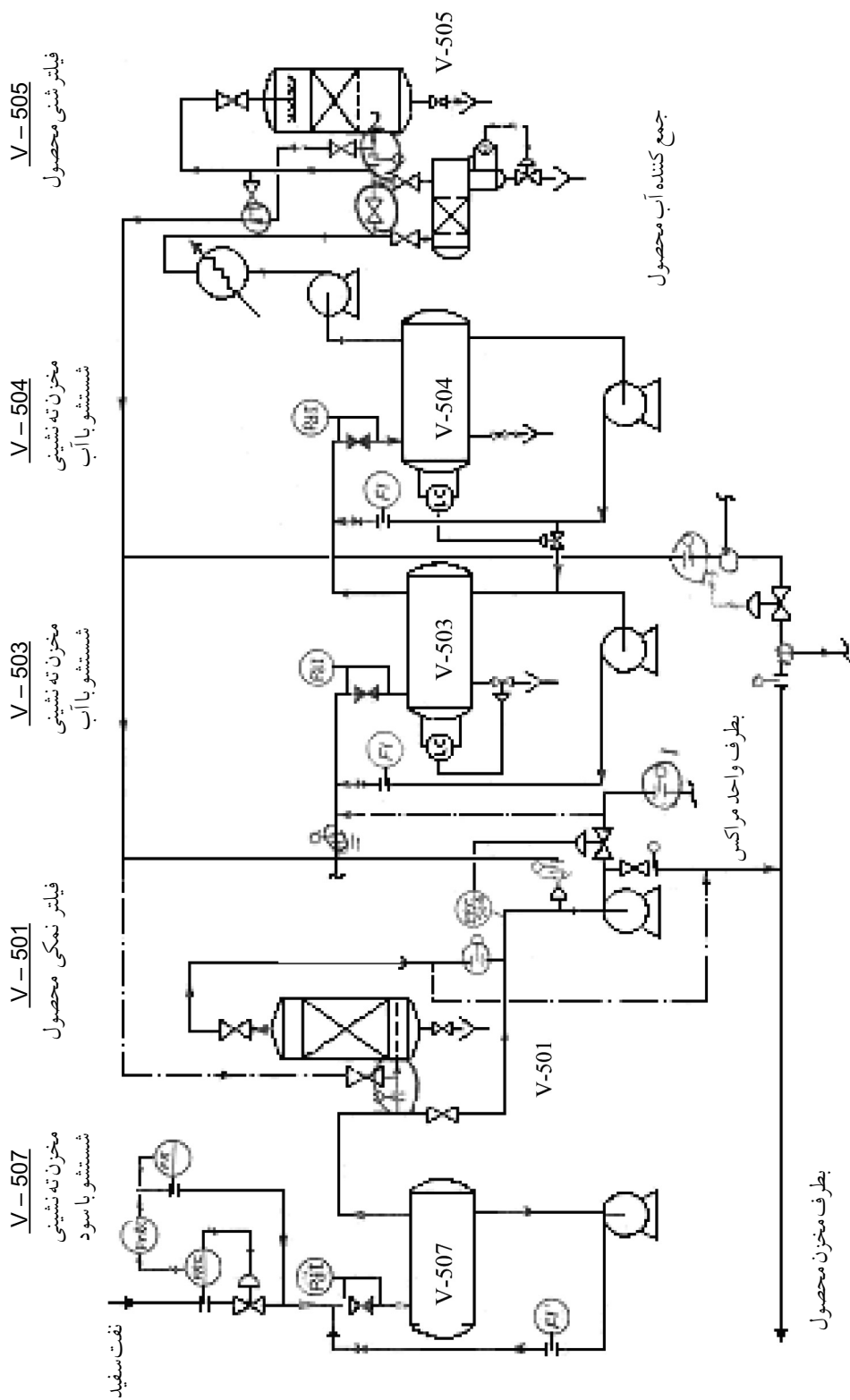
با توجه به حساسیت شدید سوخت جت به حضور مقادیر جزئی از ناخالصی‌هایی مانند آب و مواد فعال سطحی، کنترل شرایط و عملیات واحد kero-treater از اهمیت خاصی برخوردار بوده لذا، کل فرآیند می‌بایست به طور دائم تحت کنترل باشد. از جمله عوامل تاثیر گذار که به بازرسی و کنترل همیشگی نیاز دارند، می‌توان به این موارد اشاره نمود: دبی و درجه حرارت خوراک، غلظت سود، مقدار سود گردشی (نسبت سود به خوراک)، سطح دو فاز^۱ آب و هیدروکربن در شستشودهنده‌ها، اختلاف فشار دو طرف شیر مخلوط کننده^۲ سود و خوراک، تخلیه آب از ستون‌های فیلترهای شن و نمک. در صورت بروز هر یک از مشکلات فوق و خارج از استاندارد شدن مشخصات محصول، می‌بایست آن را در مخزن نفت سفید (خوراک سوخت جت) تخلیه نمود. این امر به معنی صرف وقت و هزینه بالا می‌باشد. بررسی‌های به عمل آمده حاکی از رخداد این اتفاق در پاره‌ای موارد در برخی از پالایشگاه‌ها است.

بخش تجربی

با توجه به این که پایه اصلی تهیه سوخت جت، نفت سفید می‌باشد، به منظور بررسی کیفیت نفت سفید تولید داخل، نمونه‌هایی از نفت خام خوراک کلیه پالایشگاه‌های کشور تهیه و تقطیر شد. سپس از اختلاط برش‌های حاصل از تقطیر، برش نفت سفید (۲۷۵-۱۵۰°C) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از برخی آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است با توجه به نتایج جدول ۷ مشاهده می‌شود که خواص اصلی و کلی بیشتر نفت سفیدهای تولیدی (از جمله مقدار آروماتیک، نقطه دود، گوگرد) در حد قابل قبول بوده و با تنظیم دامنه جوش هنگام تولید نفت سفید در برج تقطیر پالایشگاه به منظور تهیه سوخت جت، برخی مشخصه‌های دیگر نیز تصحیح می‌شود. این مهم از امتیازات ویژه نفت سفید تولید داخل است که

1. Interface Level

2. Mixing Valve



شکل ۴- دیاگرام فرایندی واحد تصفیه نفت سفید پالایشگاه تهران

جدول ۷- برخی مشخصات برش نفت سفید پالایشگاه‌های کشور

مشخصات	پالایشگاه	آبادان	آبادان	اراک	بندرعباس	اصفهان	شیراز	تبریز	تهران	کرمانشاه
وزن مخصوص در ۱۵/۵۶°C / ۱۵/۵۶°C	در	۰/۸۰۸۵	۰/۸۰۴۱	۰/۸۰۷۰	۰/۸۱۰۸	۰/۸۰۴۳	۰/۸۱۶۴	۰/۸۰۶۴	۰/۸۰۷۹	۰/۸۰۶۷
مقدار در نفت خام wt%		۱۹/۰۲	۲۱/۶۵	۲۰/۰۴	۱۸/۸۷	۲۰/۳۹	۱۹/۷۷	۱۹/۸۹	۲۱/۴۴	۲۱/۶۹
مقدار در نفت خام vol%		۲۰/۵۵	۲۲/۸۶	۲۱/۴۴	۲۰/۳۸	۲۱/۸۶	۲۱	۲۱/۲۹	۲۲/۷۹	۲۲/۸۲
گوگرد wt%		۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۵
مرکپتان ppm		۸	۸۲	۷	۴۷	۹	۴۰	۱۵	۱۸	۵۹
H ₂ S ppm		---	۳۲/۰	---	۳۵/۰	---	۸	---	۱۲	۱۵
اسیدیته mgKOH/g		۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
رنگ سیبولت		-۲	۰	+۱۶	-۲	+۱۹	+۱۵	+۲۳	+۱۹	+۱۵
خوردگی تیغه مس ، ساعت در ۱۰۰°C	۳	۱b	۲c	۱b	۲b	۲b	۴a	۲c	۲b	۲b
نقطه آنیلین °C		۶۰/۸	۶۲/۳	۷۴	۶۰	۶۲/۳	۵۸	۶۱/۵	۶۱	۶۱/۴
نقطه اشتعال °C		۵۷	۵۴	۵۶	۵۵	۵۷	۵۹	۵۶	۶۰	۵۲
نقطه دود mm		۳۲	۳۲	۳۰	۳۰	۳۱	۲۹	۴۰	۳۵	۳۱
نقطه انجماد °C		-۳۸	-۴۰	-۲۸	-۲۷	-۳۴	-۳۳	-۴۰	-۳۹	-۳۰
آزمایش PONA :										
پارافین vol%		S=۸۰/۸	S=۷۹/۸	S=۸۱/۴	S=۷۹/۵	S=۸۷/۲	۴۱/۰	۴۹/۴	۳۱/۱	S=۸۰/۵
نفتن vol%		---	---	---	---	---	۳۹/۶	۳۲/۰	۵۰/۷	---
اولفین vol%		۰/۲	۰/۲	۰/۲	جزئی	جزئی	۰/۴	۰/۶	۰/۲	۰/۵
آروماتیک vol%		۱۹/۰	۲۰/۰	۱۸/۴	۲۰/۵۰	۱۲/۸۰	۱۹/۰	۱۸/۰	۱۸/۰	۱۹/۰
ارزش حرارتی خالص kcal/kg		۱۰۳۲۵	۱۰۳۴۰	۱۰۳۴۵	۱۰۳۳۰	۱۰۳۲۵	۱۰۲۸۲	۱۰۳۲۹	۱۰۳۰۱	۱۰۳۱۲

S : اشباع = پارافین + نفتن

با استفاده از سیستم کوالسر مایع - مایع بعد از مرحله شستشو با سود می‌توان از مزایای زیر بهره جست:

- افزایش تولید و نزدیک شدن به ظرفیت طراحی (حدود ۱۳۰۰۰ بشکه در روز) که در حال حاضر به دلیل مشکلات عملیاتی حداکثر ۴۰۰۰ بشکه در روز می‌باشد.
- صرفه جوئی در مصرف آب به میزان ۴۲ Gal/min (طبق طراحی) که جهت شستشو به کار می‌رود.
- حذف مراحل شستشو با آب و فیلترهای نمک و شن و کلیه ظروف و متعلقات مربوطه
- جلوگیری از خوردگی مخازن و ظروف بدلیل carry over شدن سود و آب به همراه محصول
- کاهش هزینه‌های عملیاتی و کنترل راحت‌تر واحد

آزمایش در دبی‌های مختلف برای امولسیون سوخت جت/سود ورودی به مجموعه پایلوت (۱-۵ L/min) انجام شد معیار انتخاب دبی مناسب، تمیز و شفاف بودن نمونه خروجی از کوالسر بوده است. در دبی‌های ۱ و ۲ L/min نمونه‌ها شفاف بوده و پس از سرد کردن آن‌ها با آب خنک کننده، همچنان روشن و شفاف باقی می‌ماند (کدورت و ابری شدن نمونه حاکی از وجود ذرات آب است). در تمام مراحل بر روی محصول آزمایش‌های تعیین کیفیت (Na⁺ water reaction، WSIM و ...) انجام شد که خلاصه آن در جدول ۸ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود سوخت جت حاصل از تمامی مراحل ذکر شده در جدول، الزامات استاندارد NIOC را تامین می‌نماید.

نتیجه گیری

قیمت‌های جهانی و منطقه‌ای فرآورده‌های نفتی مشخص می‌شود که سوخت جت بالاترین قیمت را داراست. با توجه به انطباق مشخصات کلی نفت سفید تولیدی اکثر پالایشگاه‌های داخلی با محدوده خواص سوخت جت و به دلیل این‌که این برش تنها به تصفیه شیمیایی متداول نیازمند است، همچنین با توجه به اجرای طرح‌های گاز رسانی در داخل کشور در طی سال‌های گذشته و

افزایش مسافرت‌های هوایی در بین عامه مردم و استفاده از ناوگان هوایی جهت حمل و نقل کالا، باعث شده است که مصرف سوخت‌های جت سریع‌ترین نرخ رشد را در دنیا داشته باشد و پالایشگرانی که بتوانند سوختی با کیفیت مطلوب و قیمت پایین تولید کنند بازار خوبی برای محصول خود در سراسر دنیا خواهند داشت. با نگاهی به

جدول ۸- مشخصات محصولات خروجی از پایلوت کوالسر مایع - مایع در مراحل مختلف

محل نصب پایلوت						استاندارد NIOC	آزمایش
بعد از مرحله شستشو با سود دبی ۲ l/min		بعد از مرحله شستشو با سود دبی ۱ l/min		بعد از مرحله اول شستشو با آب دبی ۲ l/min			
ورودی	خروجی	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی		
۱b	۲	۱b	۲	۱b	۲	۱b	water reaction
۹۸	مقدار زیاد آب	۹۸	مقدار زیاد آب	۹۸	مقدار زیاد آب	> ۸۵ و < ۱۰۰	WSIM
-	-	۰/۰۰۴	وجود سود	۰/۰۰۴	وجود سود	۰/۰۱۲	اسیدیته mgKOH/gr
۰/۰۸	۷/۷	۰/۱	۹/۷	۰/۴۹	۰/۳۱	-	مقدار سدیم ppm
-۴۰	-	-۴۰	-	-۴۰	-	-	نقطه انجماد °C
۰/۳	-	۰/۶	-	۰/۶	-	-	جامدات mg/lit

جدول ۹- تولید و توزیع مصرف نفت سفید در داخل کشور (میلیون بشکه معادل نفت خام در سال) *

سال	۱۳۷۳	۱۳۷۴	۱۳۷۵	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	۱۳۸۱
خانگی	۵۳/۸۰	۵۲/۹۵	۵۶/۹۶	۵۶/۸۱	۵۲/۹۴	۵۲/۴۱	۵۱/۱۸	۴۹/۱۲	۴۸/۸۶
تجاری	۴/۲۱	۳/۱۵	۳/۶۱	۲/۴۴	۲/۱۶	۱/۶۲	۱/۸۳	۲/۳۷	۱/۴۹
صنعتی	۱/۰۸	۱/۲۳	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۰
کشاورزی	۲/۶۸	۱/۹۱	۲/۱۰	۰/۹۴	۱/۰۵	۰/۸۹	۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۵۵
سایر	۱/۹۷	۲/۴۷	۲/۱۷	۱/۴۳	۱/۷۵	۰/۷۳	۱/۱۷	۰/۰۰	۰/۰۰
کل مصرف	۶۳/۷۴	۶۱/۷۱	۶۵/۶۳	۶۲/۴۹	۵۸/۳۷	۵۵/۸۷	۵۵/۴۵	۵۲/۷۰	۵۱/۱۱
سهام مصرف خانگی (درصد)	۸۴/۴	۸۵/۸	۸۶/۸	۹۰/۹	۹۰/۷	۹۳/۸	۹۲/۳	۹۳/۲	۹۵/۶
تولید	۵۳/۹۲	۵۰/۹۳	۵۵/۰۹	۵۴/۷۲	۶۱/۴۷	۶۱/۳۸	۵۷/۴۶	۵۸/۳۶	۵۲/۸۷

*برنامه ریزی تلفیقی شرکت ملی پالایش و پخش

بیشتر نیز خواهد شد، اختلاف قیمت نفت سفید و سوخت جت که حدود $12 \text{ \$/metric ton}$ می باشد، تبدیل نفت سفید به سوخت جت می تواند به عنوان یکی از بهترین گزینه های جایگزین مدنظر قرار گیرد. به علاوه نتایج آزمایش های پایلوتی بکارگیری نوعی کوالسرمایع - مایع در واحد تصفیه نفت سفید پالایشگاه تهران، نشان دهنده کاهش بیشتر هزینه تولید و نیز بهبود خواص (در صورت استفاده از فنآوری های جدید) می باشد.

برنامه های آتی و در نتیجه ادامه روند کاهش مصرف نفت سفید (که یکی از فراورده های اصلی پالایشگاه هاست) به عنوان سوخت گرمایشی منازل که در حال حاضر حدود ۹۰ درصد از کل مصرف را شامل می شود (جدول ۹)، خالی بودن ظرفیت کاری واحدهای تصفیه نفت سفید پالایشگاه ها، مازاد تولید نفت سفید که با توجه به برنامه های وزارت نفت مبنی بر احداث پالایشگاه های میعانات گازی و ورود محصولات آن از جمله نفت سفید به چرخه تولید

منابع

- [1] Shell Aviation Fuels Documents
- [2] J.P. Allinson, *Criteria for Quality of Petroleum Product*, 1973
- [3] Ullman, *s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. A3, 1985
- [4] J.G. Speight, *Handbook of Petroleum Product Analysis*, 2002
- [5] Chevron Jet Fuels Documents
- [6] Annual Book of ASTM Standards Vol. 05.01, 02, 03, 2002
- [7] IATA , *Guidance Material For Aviation Turbine Fuels Specifications*, 4TH ed. March 2000
- [8] P. Forero and F.J. Suarez, *Caustic Treatment of Jet Fuel Streams*, Merican Company Documents
- [9] G. Alan Lucas, *Modern Petroleum Technology* Vol.2 (Downstream), 2000
- [10] J.P. Wauquier, *Petroleum Refining: Crude oil* , Petroleum Products, Process Flowsheets, 1995
- [11] Mcketta, *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, Vol. 27, 1988