

بررسی اثر دما و زمان اقامت در بازیافت اجزاء فیلتر روغن به روش پیرولیز

محمد نجفی درچه کلمارانی^۱، رامین کریمزاده^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، mohammad.najafi@modares.ac.ir

۲- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ramini@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴)

چکیده: فیلترهای روغن استفاده شده هم خطرات زیست‌محیطی فراوانی را در بردارند و هم حاوی اجزاء ارزشمندی برای استفاده مجدد هستند که بازیافت آن‌ها را توجیه می‌کنند. در این طرح در میان روش‌های مختلف بازیافت از روش پیرولیز استفاده شده است. در این مطالعه رفتار هر یک از مواد تأثیرگذار در تولید باقی‌مانده (روغن کارکرده، واشر لاستیکی، کاغذ فیلتر) با تغییر دو پارامتر دما و زمان اقامت به صورت جداگانه بررسی شد. آزمایش‌ها در دماهای ۳۶۰، ۴۴۰ و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد و دو زمان اقامت ۳۰ و ۹۰ دقیقه با جریان نیتروژن ثابت $200 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ انجام شده و میزان باقی‌مانده تولیدی پس از هر آزمایش اندازه‌گیری شد. در پیرولیز روغن کارکرده با افزایش دما و زمان اقامت، تولید باقی‌مانده به دلیل پیشروی واکنش‌های شکست حرارتی اولیه خوراک ابتدا کاهش یافت و سپس به دلیل شروع شکست حرارتی ثانویه مواد هیدروکربنی موجود در راکتور کمی افزایش یافت. در پیرولیز واشر لاستیکی با افزایش دما و زمان اقامت، روند تولید باقی‌مانده همواره کاهشی بود. این رفتار نشان‌دهنده پیشرفت واکنش پیرولیز و شکست حرارتی اولیه مواد و همچنین تبخیر مواد هیدروکربنی جامد واشر در دماهای بالا است. در بررسی تأثیر دما و زمان ماند بر پیرولیز کاغذ فیلتر مشاهده شد که در اثر افزایش دما و زمان ماند بازده باقی‌مانده تولید شده کاهش یافت که می‌تواند در اثر شکست حرارتی اولیه کاغذ فیلتر یا شکست حرارتی دوباره باقی‌مانده باشد.

کلیدواژگان: فیلترهای روغن استفاده شده، پیرولیز، قراضه‌های آهنی

مقدمه

طبق گزارشات تا سال ۲۰۲۱ حدود ۸۰۰ میلیون خودرو در جهان در حال فعالیت هستند و به گفته کارشناسان تا سال ۲۰۳۵ تعداد آن‌ها به ۳ میلیارد دستگاه افزایش خواهد یافت [۱]. با توجه به حجم زیاد فیلترهای روغن کارکرده تولید شده، نحوه بازیافت آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در صورت دفع این فیلترها در طبیعت واکنش بدنه فلزی فیلتر با آب‌و‌خاک و همچنین نفوذ روغن کارکرده در آن‌ها باعث آلودگی این دو عامل حیاتی زندگی بشر شده و زیان‌های جبران‌ناپذیری را بر طبیعت تحمیل خواهند کرد. علاوه بر این، طعم حدود ۱۰۶ لیتر آب را می‌توان با ۱ لیتر روغن کارکرده مختل کرد. همچنین بین ۵۰ ppm تا ۱۰۰ ppm از روغن کارکرده می‌تواند فرآیند تصفیه فاضلاب را به تأخیر بیندازد و با چالش مواجه کند [۲]. با این حال، هزینه‌های مدیریتی بالا برای دفع پسماند روغن منجر به تخلیه غیرقانونی روغن کارکرده در بسترهای آبی می‌شود. این به نوبه خود حیات دریایی را به خطر می‌اندازد و منجر به مرگ پرندگان دریایی به دلیل هیپوترمی^۱ می‌شود. علاوه بر این، ماهیت آب‌گریز روغن ضایعاتی از انحلال اکسیژن جلوگیری می‌کند و نیاز شیمیایی اکسیژن (COD^۲) را در آب افزایش می‌دهد [۳]؛ بنابراین اگر برای بازیافت فیلترهای روغن کارکرده هزینه نشود این هزینه باید صرف پاک‌سازی خاک و تصفیه آب شود.

^۱ Hypothermia

^۲ Chemical Oxygen Demand

بررسی میزان تولید فیلتر روغن استفاده شده در ایران

با توجه به آمار تولید خودروسازان ایران در سال ۱۳۹۹، رشد ۱۹/۲ درصدی در این حوزه را نشان می‌دهد [۳]. استفاده گسترده از وسایل حمل و نقل عمدتاً آلودگی هوا، افزایش مصرف مواد اولیه و سوخت، آلودگی صوتی، تصادفات رانندگی و نیاز به تصفیه مواد کار کرده مربوطه را موجب می‌شود.

در ادامه سعی بر این است تا میزان فیلترهای روغن استفاده شده توسط خودروهای تولیدی سال ۱۳۹۹ به صورت تقریبی تخمین زده شود تا اهمیت بازیافت فیلترهای مصرفی مشخص شود. در جدول ۱ تولیدات خودرو در سال ۱۳۹۹ را می‌بینیم.

جدول ۱- تولیدات خودرو در سال ۱۳۹۹ [۳]

Table 1- Automobile Production in 2020 [3]

Number	Model	Production Quantities in 2020
1	Passenger Cars	903314
2	Vans	80805
3	Trucks, Pickup Trucks, and Tractors	5840
4	Buses	944
5	Minibuses and Midibuses	789
6	Total Production	991692

طبق امکان‌سنجی انجام شده توسط شرکت گسترش صنایع پائین دستی پتروشیمی، به طور معمول تمامی خودروها چه سبک و چه سنگین پس از طی مسافت ۱۰۰۰۰ کیلومتر اقدام به تعویض فیلتر روغن نموده و فیلتر نو جایگزین می‌نمایند. باتوجه به گستردگی مشاغل و عدم تناسب استفاده از خودرو توسط افراد و مشاغل موجود در جامعه محاسبه دقیق تعداد فیلترهای مصرف شده امکان‌پذیر نبوده و جهت این برآورد، از یک مقدار متوسط استفاده شده است. طبق اطلاعات حاصله از طرح امکان‌سنجی انجام شده توسط شرکت گسترش صنایع پائین دستی پتروشیمی، حدود ۴۵ درصد از کل خودروهای کشور در تهران مستقر هستند. باتوجه به کلان‌شهر بودن تهران، پرواضح است که کارکرد خودروها در این شهر حداقل دو برابر کارکرد خودروها در سایر نقاط کشور بوده و به همان نسبت نیز استهلاک، تعویض قطعات و مصارف عمومی خودرو نیز حداقل دو برابر خودروها در سایر نقاط کشور است. با توجه به طولانی‌بودن بعد مسافت‌های درون‌شهری و درون‌استانی در تهران و پراکندگی خطوط حمل‌ونقل و دور بودن محل کار اکثر مردم جامعه از محل سکونتشان به طور متوسط می‌توان تخمین زد که در تهران هر خودرو در طول روز ۲۰۰ کیلومتر مسافت طی نماید. این رقم برای خودروهای سایر نقاط کشور نصف مسافت فوق یعنی ۱۰۰ کیلومتر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که خودروهای سطح تهران هر ماه ۶۰۰۰ کیلومتر و هر دو ماه ۱۲۰۰۰ کیلومتر طی مسافت نموده و حداقل هر دو ماه یکبار بایستی اقدام به تعویض فیلتر خودروی خود نمایند. خودروهای سایر نقاط کشور بنا به دلایل مذکور بایستی هر ۴ ماه یکبار اقدام به تعویض فیلتر نمایند [۴].

بنابراین می‌توان تعداد فیلترهای کارکرده خودرو که سالانه توسط خودروهای ساخت سال ۱۳۹۹ تولید می‌شوند را به صورت زیر در جدول ۲ نشان داد. (توجه شود که اعداد و ارقام به صورت حدودی تخمین زده شده‌اند. مسلماً وسایل نقلیه ناوگان حمل‌ونقل عمومی و کامیون‌های باربری تعداد فیلتر روغن کارکرده بیشتری تولید خواهند کرد.)

جدول ۲- تعداد فیلترهای کارکرده تولیدی توسط خودروهای سال ۱۳۹۹

Table 2- The number of used oil filters produced by Automobiles in 2020

Annual Count of Used Oil Filters in Tehran	2677568
Annual Count of Used Oil Filters in Other Cities	1636292
Total Annual Production of Used Oil Filters	4313860

آمارها نشان می‌دهد که از کل خودروهای فعال در کشور ۷۵ درصد آن را خودروهای سبک و ۲۵ درصد آن را خودروهای سنگین تشکیل می‌دهد که به همین نسبت تعداد فیلترهای سبک ۷۵ درصد از کل و تعداد فیلترهای سنگین ۲۵ درصد از کل را تشکیل می‌دهند. وزن متوسط فیلتر نو خودروهای سبک سواری ۴۰۰ گرم و فیلتر نو خودروهای سنگین ۹۰۰ گرم بوده که این رقم برای فیلترهای کارکرده بلافاصله پس از جداسازی به ترتیب ۸۰۰ گرم و ۱۹۱۰ گرم است [۴]. فیلترهای روغن کارکرده هنگام خروج از خودرو معمولاً از ۳۰ تا ۵۰ درصد وزنی فولاد و ۴۵ تا ۶۰ درصد وزنی روغن کارکرده تشکیل شده‌اند [۳]. برای یک فیلتر روغن بلافاصله پس از جداسازی به طور متوسط می‌توان ۴۰ درصد وزنی استیل و ۵۵ درصد وزنی روغن کارکرده و ۵ درصد وزنی بقیه مواد تشکیل‌دهنده را در نظر گرفت. در این صورت تناژ فیلترهای کارکرده و همچنین مقادیر روغن کارکرده و قراضه آهنی تولیدی توسط خودروهایی که در سال ۱۳۹۹ تولید شده‌اند در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- وزن فیلترهای استفاده شده، روغن کارکرده و قراضه آهنی تولیدی توسط خودروهای مدل ۱۳۹۹

Table 3- Weight of used filters, used oil, and ferrous scrap produced by 2020 model automobiles

Number	Parameter	Weight (Ton)
1	Light-Duty (LD) Used Oil Filters Produced Annually	2588.32
2	Heavy-Duty (HD) Used Oil Filters Produced Annually	2059.9
3	Total	4648.22
4	Used Oil Produced	2556.52
5	Ferrous Scrap Produced	1859.29

اعداد تخمین زده شده بالا فقط برای خودروهای تولیدی در سال ۹۹ می‌باشند. اگر این اعداد برای کل خودروهای در حال استفاده در کشور محاسبه شود به‌طورقطع چندین برابر خواهد شد که این خود اهمیت بازیافت فیلترهای روغن کارکرده را نشان می‌دهد.

طبق آمارهای جهانی ضایعات فولاد سهم ۳۱/۵ درصدی را برای تولید فولاد تشکیل می‌دهند [۵]. میزان تولید آهن قراضه در ایران، طی سال‌های گذشته، از ۱/۵ تا ۲/۵ میلیون تن در سال، متغیر بوده است اما نیاز کشور بر اساس چشم انداز ۱۴۰۴، حدود ۶ میلیون تن و براساس نیاز کنونی کارخانجات حدود ۵ میلیون تن در سال است. اگر میانگین تولید فعلی را سالانه ۲ میلیون تن در نظر بگیریم، برای تأمین نیازهای کارخانه‌ها و نیز تحقق سند چشم‌انداز باید بیش از دو برابر و حدود سه برابر رقم فعلی، آهن قراضه تولید کنیم [۶].

روش‌های بازیافت فیلترهای روغن استفاده شده

فیلترهای روغن بلافاصله پس از جداسدن از دستگاه حتی پس از تخلیه بین ۴۰ تا ۷۰ درصد روغن دارند؛ بنابراین، ضایعات حاوی روغن بیش از حدی است که به‌عنوان قراضه آهنی قابل قبول نیست و یا دفن می‌شوند و یا به یک کارخانه جمع‌آوری ضایعات ارسال می‌شوند. روش‌هایی که برای بازیافت فیلترهای روغن استفاده می‌شود شامل تخلیه گرانشی، فشردن، جداکردن، خرد کردن و پیرولیز یا ترکیبی از این فرآیندها است که به طور خلاصه به توضیح هر کدام می‌پردازیم.

تخلیه گرانشی: تخلیه گرانشی در واقع به این مفهوم است که فیلترهای روغن استفاده شده بلافاصله پس از جداسازی از وسیله نقلیه، سوراخ شده و برای مدت‌زمان حداقل ۱۲ ساعت تخلیه شوند [۴]. این فرآیند به کمترین سرمایه‌گذاری نیاز دارد، اما تنها حدود ۵۰ درصد روغن مصرف شده را بازیافت می‌کند و هیچ یک از مواد فلزی یا غیرفلزی را بازیابی نمی‌کند. علاوه بر این، فیلترهای روغن تخلیه شده به دلیل چگالی کم، به حجم زیادی از فضای دفن زباله نیاز دارند [۲].

فشردن و تخلیه کردن: استفاده از پرس‌های هیدرولیکی^۱ یا پنوماتیکی^۲ برای له کردن UOFها با هدف فشرده‌سازی و جداسازی روغن باقی‌مانده اجرا می‌شود. این فرآیند منجر به تولید قراضه‌هایی به نام خشت می‌شود که به عنوان تک فیلترهایی شناخته می‌شوند که در راستای محور طولی له شده‌اند. خشت‌ها، به تناسب نیروهای له‌کننده، ممکن است حاوی مقدار زیادی از روغن باقی‌مانده باشند. کیفیت قراضه تولیدی به طراحی فیلتر روغن و همچنین فشار له‌کردن بستگی دارد [۴]. با توجه به وجود هوای فشرده در اکثر گاراژهای محلی، استفاده از پرس پنوماتیک به صورت ارزان، ساده و نسبتاً مؤثر جهت حذف و بازیابی روغن انجام می‌شود ولی کیفیت قراضه تولیدی کم است. با افزایش سرمایه‌گذاری در له‌کننده‌های هیدرولیکی که نیروهای له‌کنندگی بیشتری تولید می‌کنند، قراضه با کیفیت بالاتر و مقدار بیشتر در هر ساعت کاری قابل دسترس است [۱] و [۷].

جداکردن: این فرآیند شامل جداکردن بخش قوطی مانند از صفحه پایه و تخلیه و بازیافت روغن کارکرده است که در نهایت منجر به تولید ضایعاتی با چگالی کم اما باکیفیت خوب می‌شود. اگرچه تجهیزات فرآیند جداکردن مانند اره یا یک برش دهنده فیلتر و تجهیزات تخلیه به سرمایه‌گذاری کمی احتیاج دارد؛ ولی این فرآیند نیاز به نیروی کار زیادی دارد [۸].

خردکردن: عموماً فرآیند خردکردن UOFها در یک ماشین چکشی انجام می‌شود که این ماشین فیلترهای کارکرده روغنی را به تکه‌های کوچک تقسیم می‌کند. سپس قطعات کوچک به صورت مغناطیسی جدا می‌شوند تا فلز آهنی را از باقی‌مانده‌های غیرفلزی جدا کنند. در مقایسه با دیگر فرآیندها، این فرآیند هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتری دارد؛ اما از لحاظ نیروی کاری به صرفه است و در نهایت قراضه‌های باکیفیت عالی تولید می‌شوند [۴].

پیرولیز: عملیاتی است که در آن فیلترهای روغن در دمای بالا در محیطی غیر اکسیدکننده قرار می‌گیرند. همان‌طوری که در حین فرآیند، دما تا رسیدن به دمای عملیاتی بالا می‌رود، گرانروی روغن کاهش یافته و به روغن مایع اجازه می‌دهد تا روان شده و جمع‌آوری شود. در دمای عملیاتی محتوای غیرفلزی حاضر در UOFها (روغن کارکرده باقی مانده، کاغذ فیلتر و واشر لاستیکی) به بخارات قابل تراکم یا محصولات گازی تجزیه و از راکتور خارج شده و در کوره بعدی تحت واکنش احتراق قرار گرفته یا به‌عنوان سوخت تکمیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بریج واتر^۳ و همکاران دریافتند که روغن پیرو (محصول مایع حاصل از سرد کردن بخارات قابل تراکم) تولید شده را می‌توان مستقیماً در کاربردهای متعدد بدون ارتقاء استفاده کرد [۹]. کاربرد مستقیم روغن پیرو شامل موتورهای دیزل، توربین‌ها، کوره‌ها، دیگ‌های بخار و ... است. جریان قراضه آهنی حاصل بدون روغن بوده؛ اما با مقادیری از کربن به صورت دوده همراه است [۴].

مکانیزم واکنش‌های شکست حرارتی (پیرولیز)

تشخیص روش‌های پیرولیز مواد هیدروکربنی سنگین به دلیل وجود صدها واکنش‌دهنده موازی، بسیار پیچیده است. در طول این فرآیند، برخی از اجزا به عنوان محصولات واکنش شکل می‌گیرند. با افزایش تبدیل و غلظت الفین‌ها و دیگر محصولات، واکنش‌های ثانویه اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند [۱۰]. به طوری کلی می‌توان گفت که مکانیزم واکنش شامل یک دسته واکنش زنجیره‌ای رادیکالی است، که شامل مراحل شروع، گسترش و پایان است [۱۱].

شروع: فرآیند با شکافت یکی از پیوندهای کربن-کربن یا کربن-هیدروژن، منجر به تولید رادیکال‌های آلکیل (R^{*}) می‌شود. دماهای بالا (صدها درجه سانتی‌گراد) برای غلبه بر انرژی فعال‌سازی موردنیاز برای شکستن این پیوندهای قوی ضروری هستند [۱۲].

¹ Hydraulic Press

² Pneumatic Press

³ A.V Bridgwater

گسترش: رادیکال‌های آلکیل تولید شده در مرحله آغازین، در چندین واکنش گسترشی نظیر گسستگی-بتا، هیدروژن‌زدایی، ایزومریزاسیون از طریق جابجایی هیدروژن و اضافه شدن به آلکن‌ها شرکت می‌کنند. این واکنش‌ها منجر به تشکیل الفین و تولید رادیکال جدید می‌شوند، که زنجیره واکنش را پیش می‌برد [۱۱، ۱۲].

۱. گسستگی-بتا: هنگامی که یک رادیکال آزاد در یک زنجیره پلیمری تحت یک β -scission قرار می‌گیرد، رادیکال آزاد دو کربن را از کربن باردار جدا می‌کند و یک الفین (اتیلن) و یک رادیکال آزاد اولیه تولید می‌کند که دو اتم کربن کمتر دارد.

۲. هیدروژن‌زدایی: شامل گرفتن یک اتم هیدروژن از مولکول هیدروکربن توسط رادیکال آلکیل و در پی آن تولید یک آلکان و یک سایت رادیکال جدید است. این فرآیند دو مولکولی در فشارهای بالا اتفاق می‌افتد [۱۱].

۳. ایزومریزاسیون از طریق جابه‌جایی هیدروژن: انتقال داخل مولکولی یک اتم هیدروژن از کربن ۵ به کربن رادیکال و در پی آن تولید یک رادیکال ایزومر پایدارتر [۱۱].

۴. واکنش‌های افزودن: رادیکال‌ها می‌توانند به پیوندهای دوگانه الفین‌ها اضافه شوند و پیوند $C=C$ را بشکنند و رادیکال‌های بزرگ‌تری تشکیل دهند [۱۳].

پایان: دو رادیکال می‌توانند دوباره ترکیب شوند و گونه‌های رادیکال را از بین ببرند. مراحل متداول پایان عبارت‌اند از [۱۴]:

۱. بازترکیب دو رادیکال به دست‌آمده از واکنش‌دهنده‌ها

۲. بازترکیب رادیکال به دست‌آمده از واکنش‌دهنده‌ها با رادیکال آلکیل در حال انتشار

۳. بازترکیب دو رادیکال آلکیل در حال انتشار

واکنش‌های جانبی: واکنش‌های جانبی مانند آروماتیک‌شدن^۱، تراکم و تشکیل کک با واکنش‌های شکست رقابت می‌کنند، به‌خصوص در دماهای بالا و زمانی که غلظت محصولات پیرولیز در راکتور زیاد است [۱۵].

۱. واکنش‌های آروماتیک شدن: هیدروکربن‌های غیراشباع مانند الفین‌ها می‌توانند تحت واکنش‌های حلقوی شدن و هیدروژن‌زدایی قرار گیرند تا ترکیبات آروماتیک ایجاد کنند. این مورد در درجه حرارت بالا و زمان اقامت طولانی اتفاق می‌افتد. تبدیل الفین‌ها به آروماتیک گرمازا است، بنابراین آروماتیک‌ها تمایل دارند در بخش‌های باقی‌مانده متمرکز شوند.

۲. واکنش‌های تراکم: گونه‌های رادیکال می‌توانند ترکیب شوند و از طریق واکنش‌های تراکمی، ترکیبات با وزن مولکولی بالاتر را تشکیل دهند. احتمال تراکم با رادیکال‌های تثبیت شده از مواد آروماتیک بیشتر است. این واکنش‌ها از نظر جنبشی با واکنش‌های گسترش رقابت می‌کنند و در دماهای بالاتر زمانی که نرخ پایان سریع‌تر است غالب هستند.

۳. تشکیل کک: در دماهای بالا واکنش‌های رادیکال متوالی می‌تواند منجر به گونه‌های پلی‌آروماتیک شود که روی هم چیده می‌شوند و کک را تشکیل می‌دهند.

مروری بر منابع

در مطالعه‌ای که توسط پیزلی در سال ۱۹۹۴ انجام شد، تحقیقات انجام شده توسط دفتر معادن ایالات متحده در زمینه بازیافت فیلترهای روغن مصرفی خودرو با تمرکز بر فولاد بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها نشان داد که فیلترهای فشرده و تخلیه شده چگالی حجمی مشابهی با درجه‌های معمول فلزات بازیافتی دارند. آزمایش‌های ذوب نشان داد که بازده ۷۶-۸۵ درصدی از فیلترهای روغن به فولاد ریخته‌گری تبدیل می‌شود. تجزیه و تحلیل شیمیایی نشان داد که سطوح پسماندهای کمی در این مواد وجود دارد و همچنین محتوای کربن بالا به فرآیند تولید فولاد کمک کرد. این مقاله مروری از

¹ Aromatization

ویژگی‌های فلزات بازیافتی فیلترهای روغن ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که این مواد به‌عنوان مواد اولیه فلزی بازیافتی قابلیت استفاده دارند [۲].

در انتخاب فرآیند بازیافت یکی از عوامل کلیدی، کیفیت قراضه حاصل از بازیافت است. قراضه حاصله باید به‌گونه‌ای باشد که حتی‌الامکان بدون نیاز به فرآیندهای جانبی دیگر به چرخه صنعت بازگردد. در کار فنی ارائه شده توسط پیزلی و رابرتز که انواع فرآیندهای بازیافت از جمله جداکردن، فشردن، خردکردن و پیرولیز را بررسی کردند کیفیت قراضه حاصل از هر فرآیند به تفکیک مشخص و مقایسه شد. نتایج این بررسی در جدول ۴ آورده شده است [۸].

جدول ۴- تأثیر فناوری‌های پردازش مختلف در بازیابی مواد [۸].

Table 4- Effect of Processing Technology on Material Recovery [8]

Number	Process	Used oil	Filter media	Ferrous scrap
1	Unprocessed	None recovered	None recovered	Unacceptable as scrap (30-50 wt. % steel)
2	Gravity Drained	30-70% recovered	None recovered	Unacceptable as scrap (50-60 wt. % steel)
3	Crushed & drained	50-98% recovered	Usually remains with ferrous scrap	Inconsistent scrap quality (60-85 wt. % steel and 2-20 wt. % oil causing fuming during melting)
4	Dismantling	50-90 % recovered	Disposed in landfill or waste-to-energy when available or required	Good scrap quality (95+ wt. % steel but lower overall recovery because significant steel is disposed of with the filter media)
5	Pyrolysis	60 - 85% recovered (additional 5-25% combusted as fuel)	Vaporized and combusted, ash remains with the scrap	Excellent scrap quality (95%+ wt % steel but low density)
6	Shredding	75-95% recovered	Fluff disposed in landfill or waste-to-energy when available or required	Excellent scrap quality (95+ wt % steel)

با استناد به جدول ۴ دو روش پیرولیز و خردکردن باکیفیت‌ترین قراضه را تولید می‌کنند. مزیت فرآیند پیرولیز این است که علاوه بر بازیابی خوب روغن کارکرده، ناخالصی‌های باقی‌مانده فیلتر مانند رنگ پوششی، مواد هیدروکربنی، لاستیک، کاغذ فیلتر و... همگی تبدیل به کک شده و یک قراضه باکیفیت تولید می‌شود که ناخالصی‌های قراضه فقط محدود به کربن است ولی در سایر فرآیندها مانند خرد کردن هرچند کیفیت قراضه بالا است ولی نیاز به جداسازی و دفع پسماندهایی نظیر لاستیک، کاغذ فیلتر و ... دارد. در صورت امتناع از جداسازی این ناخالصی‌ها که خود هزینه‌بر هستند، هنگام ورود قراضه به کوره ذوب این ناخالصی‌ها باعث تغییر در خواص سرباره کوره خواهند شد. در روش پیرولیز، روغن کارکرده موجود در فیلتر روغن با درصد بازیابی قابل‌قبولی (۶۰ تا ۸۵ درصد) بازیابی شده است و بقیه روغن (۵ تا ۲۵ درصد) در فرآیند پیرولیز به عنوان سوخت استفاده می‌شود. همچنین قراضه حاصل نیز باتوجه به اینکه دارای ۹۵٪ آهن است از کیفیت مرغوبی برخوردار بوده و بدون انجام فرآیند جانبی دیگری قابل ارسال به کارخانه‌های است. چگالی کم قراضه حاصل می‌تواند تنها عیب مورد بحث این فرآیند باشد. چگالی پائین قراضه‌های سبک، موجب اشغال حجم زیادی از فضای کوره و سبب قراضه شده و بازده تولید را پائین می‌آورد. می‌توان این چگالی کم را توسط فرآیند پرس کردن قبل از فرآیند پیرولیز جبران کرد. به همین منظور برای به‌دست‌آوردن قراضه با چگالی بالا طی فرآیند پیرولیز، پرس کردن فیلترها جزء ملزومات بازیافت است.

در مطالعه پیزلی و همکاران چندین نوع قراضه مختلف ذوب شدند و از فولاد ذوب شده نمونه‌برداری شده و تجزیه و تحلیل شیمیایی برای تعیین ترکیب شیمیایی هر نوع ضایعات فراوری شده انجام شد. خلاصه‌ای از نتایج این کار در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول درصد هر یک از عناصر موجود در قراضه‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمایش‌های ذوب قراضه [۸].

Table 5- The results of scrap melting tests[8]

Scrap Material	Crushed & Drained (%)	Oil Filter Bricks (%)	Dismantled (%)	Shredded (%)	Pyrolysis (%)
C	1.61	1.59	0.05	0.04	3.11
Mn	0.15	0.20	0.12	0.21	0.17
P	0.053	0.033	0.006	0.017	0.049
S	0.061	0.048	0.030	0.022	0.051
Si	0.00	0.02	0.01	0.20	0.07
Cu	0.013	0.014	0.031	0.047	0.025
Ni	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Cr	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01
Mo	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Sn	0.031	0.034	0.043	0.020	0.027

باتوجه به جدول ۵ محتوای کربن از ۰/۰۴٪ برای قراضه فیلترهای روغن از هم جدا شده و خرد شده و تا ۳/۱۱٪ برای قراضه پیرولیز شده تغییر می‌کند. همان‌طور که مشخص است روش پیرولیز منجر به تولید محتوای کربن بسیار بالاتر از شرایط ذوب معمولی قراضه می‌شود. وجود کربن در قراضه یک مزیت برای قراضه است؛ زیرا به طور معمول در عملیات تولید فولاد به‌منظور کاهش نقطه ذوب قراضه، کربن اضافه می‌شود و درصد بالای کربن در این روش موجب صرفه‌جویی در هزینه تولید می‌شود [۸].

در این مطالعه مسائلی از جمله لجستیک حمل‌ونقل، بازار محصولات، اقتصاد و مزایای زیست‌محیطی مورد بحث و بررسی قرار گرفتند و مشخص شد که بازیافت، تأثیرات دفن و رهاسازی فیلتر در محیط‌زیست را از بین می‌برد و همچنین مواد ارزشمندی را دوباره به چرخه انرژی بازمی‌گرداند [۸].

پیزلی و رابرتز در یک کار مشترک دیگر در سال ۱۹۹۷، تأثیر طراحی ۸۷ مدل از فیلترهای روغن خودرو جدید را در میزان بازیافت‌پذیری آن‌ها بررسی کردند و دریافتند که محتوای بالاتر فولاد قابلیت بازیافت را بهبود می‌بخشد. هرچه وزن، حجم و نسبت ارتفاع به قطر فیلتر کمتر باشد درصد فولاد و قابلیت بازیافت آن بیشتر است. انتخاب مواد بر محتوای فولاد تأثیر می‌گذارد به‌گونه‌ای که صفحات کاغذی و بدنه فیلتر کمتر، قابلیت بازیافت را در مقابل صفحات فولادی و بدنه فیلتر بیشتر بهبود می‌بخشد. نتایج نشان می‌دهد که قابلیت بازیافت فیلتر روغن را می‌توان از طریق عوامل طراحی مانند اندازه، ابعاد و انتخاب مواد افزایش داد [۱۶].

در مطالعه انجام شده توسط رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۸، عوامل مؤثر بر حذف روغن از فیلترهای روغن استفاده شده در فرآیندهای بازیافت تخلیه و فشردن مورد بررسی قرار گرفت. در این مقایسه روش فشردن به میزان قابل توجهی روغن بیشتری را نسبت به روش تخلیه بازیافت کرد. نتایج نشان دادند که عواملی مانند دمای روغن، سوراخ کردن ناحیه گنبدی فیلتر، جهت گیری فیلتر در حین تخلیه و طراحی فیلتر به طور قابل توجهی بر تخلیه روغن در فرآیند تخلیه گرانشی تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه مشخص شد که دمای بالاتر به بهبود جریان‌پذیری روغن و حذف بهتر آن منجر می‌شود. همچنین سوراخ کردن انتهای گنبدی فیلتر از ایجاد خلاء در هنگام تخلیه جلوگیری می‌کند و حذف روغن را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، مخصوصاً برای فیلترهای دارای شیر ضد سیفون. در بررسی جهت‌گیری فیلتر حین تخلیه گرانشی مشاهده شد که بهترین بازیابی در تخلیه وارونه یا در زاویه ۳۰ درجه رخ می‌دهد [۱۷].

در مطالعه انجام شده توسط گایداجیس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱، ارزیابی چرخه حیاتی سناریوهای مختلف مدیریت پسماندهای مرتبط با فیلترهای روغن خودروهای استفاده شده در یونان انجام شد. اندازه‌گیری‌های تجربی برای تعیین کمیت میزان بازیابی روغن از فیلترهای مورد استفاده در شرایط مختلف (دما، زاویه، گنبد فیلتر سوراخ‌دار و غیره) انجام شد. حداکثر بازیابی روغن با سوراخ‌کردن گنبد فیلتر، تخلیه در زاویه ۰ درجه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق حدود ۵۵٪ بود. سه سناریو

¹ Gaidajis

مورد ارزیابی قرار گرفت: ۱. دفع در محل دفن زباله بدون بازیافت (سناریو قهوه‌ای) ۲. دفع در محل دفن پس از بازیافت ۵۵ درصدی روغن (سناریو متوسط)، ۳. بازیافت با حداکثر بازیابی روغن و فلزات با روش‌هایی نظیر جداکردن (سناریو سبز). نتایج نشان دادند که یک سیستم بازیافت ویژه (سناریوی سبز) گزینه‌ای بسیار محیط‌زیستی‌تر بود و دارای تأثیرات کمتری در انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف منابع نسبت به دفن در زمین بدون بازیافت بود به‌گونه‌ای که این سناریو تأثیرات مخرب را تا ۵۰ درصد کاهش داد. پیش‌پردازش ساده برای بازیافت روغن مصرفی ("سناریوی متوسط") نیز تأثیرات قابل توجهی را در مقایسه با دفن مستقیم کاهش داد. نتایج این مطالعه شواهدی ارائه می‌دهند که پیاده‌سازی برنامه‌های بازیافت برای فیلترهای روغن خودروها به دلیل مزایای محیط‌زیستی آن‌ها نسبت به دفن ترجیح بهتری دارد [۷].

هولیک^۱ و گانوشنکو^۲ به‌صورت آزمایشی روش‌های بازیابی روغن کارکرده از کاغذ فیلتر در فیلترهای روغن استفاده شده را در سال ۲۰۱۷ آزمایش کردند. آن‌ها محلول‌های شوینده شامل سدیم پرکربنات^۳، مایع ظرف‌شویی و کربنات سدیم^۴ با پراکسید هیدروژن^۵ را مقایسه کردند. پرکربنات سدیم بهترین کارایی در حذف روغن تا ۵۰ درصد را ارائه داد و یک امولسیون^۶ روغنی ایجاد کرد که از کاغذ فیلتر جدا می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از پرکربنات سدیم، بازیافت مؤثری از روغن کارکرده امکان‌پذیر است که اجازه مصرف مجدد روغن را می‌دهد و تأثیرات محیطی ناشی از سوزاندن کاغذ فیلتر استفاده شده تصفیه نشده را کاهش می‌دهد [۱۸].

هانوشنکو^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۱ جنبه‌های قانونی و فناوری را برای دفع سازگار با محیط زیست فیلترهای روغن خودرو (UAOF) مورد بررسی قرار داد. از طریق آزمایشات، آن‌ها یک فرآیند بهینه بازیافت^۸ (UAOF) شامل جداکردن، شستن با پرکربنات سدیم برای حذف روغن، سوزاندن کاغذ صافی و تصفیه گاز را توسعه دادند. این امکان استخراج اجزای ارزشمند از UAOF برای استفاده مجدد را فراهم می‌کند و درعین حال اثرات زیست محیطی را نیز کاهش می‌دهد. این رویکرد با دستورالعمل‌های اتحادیه اروپا در مورد مدیریت زباله مطابقت دارد و اوکراین را به سمت بهبود شیوه‌های بازیافت سوق می‌دهد [۱].

در مطالعه انجام شده توسط حسن‌پور، تکنولوژی‌های مدیریت فیلترهای روغن مصرفی خودروها (UAOFs) در ایران که حاوی روغن و فولاد قابل بازیافت هستند، بررسی شده است. روش‌های معمول بازیافت شامل تخلیه گرانشی، فشردن، جداسازی، پیرولیز و خردکردن می‌شوند. در این بررسی، تکنولوژی پلاسما به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه برای تغییر جذب‌کننده‌های UAOF و تولید نانومواد ارزشمند از فلزات بازیافتی معرفی شده است. داده‌های مربوط به صنایع بازیافت UAOF در ایران نیز ارائه شده است. این بررسی نشان می‌دهد که یکپارچگی تکنولوژی پلاسما در بازیافت UAOF می‌تواند از طریق بازیافت مواد، با مفهوم اقتصاد چرخه‌ای، پایداری را افزایش دهد [۱۹].

تحقیقات گذشته در زمینه بازیافت فیلتر روغن معمولاً به بررسی کلان و کلی روش‌ها اختصاص داده شده و مطالعه دقیق اجزاء سازنده فیلتر روغن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق با هدف پرداختن به این نقطه ضعف، به تجزیه و تحلیل دقیق اجزاء مختلف فیلترهای روغن که در فرآیند پیرولیز شرکت می‌کنند (روغن کارکرده، واشر لاستیکی و کاغذ فیلتر)، پرداخته است. برخلاف تحقیقات گذشته، ما مواد سازنده فیلتر را جداگانه پیرولیز کرده و تأثیر هر یک از آن‌ها را بر باقی‌مانده نهایی مورد بررسی قرار داده‌ایم. علاوه بر این، تغییرات دما و زمان واکنش نیز به‌عنوان دو تا از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر

¹ Y. Holik

² E. Ganoshenko

³ Sodium percarbonate

⁴ Sodium carbonate

⁵ Hydrogen peroxide

⁶ Emulsion

⁷ O. Hanoshenko

⁸ Used automotive oil filters

فرآیند پیرولیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تا اثرات این پارامترها بر باقی‌مانده حاصل از پیرولیز به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش تحقیق

کاغذ فیلتر و واشر لاستیکی به‌کاررفته در ساخت فیلتر خودرو از شرکت تولیدی و صنعتی فیلتر سرکان خریداری شد. روغن کارکرده استفاده شده در این آزمایش از سه مرکز تعویض روغن مختلف در سطح شهر به‌صورت تصادفی جمع‌آوری شد. چگالی محاسبه شده برای روغن کارکرده حاصل برابر $\frac{g}{Lit}$ ۸۸۲/۴ است.

فرآیند پیرولیز اجزاء فیلتر روغن کارکرده به‌صورت جداگانه در مقیاس آزمایشگاهی در شرایط عملیاتی مختلف بررسی شد. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- نمونه‌های آزمایش

Table 6- test samples

Number	Sample	Manufacturer	Quantity (g)
1	used oil	Collected from Automotive Service Centers	8
2	filter paper	Filter Sarkhan Industrial and Manufacturing Company	2
3	Rubber gasket	Filter Sarkhan Industrial and Manufacturing Company	1

به‌طور کلی پارامترهای مختلفی وجود دارند که واکنش پیرولیز را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. دمای واکنش و زمان اقامت از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند پیرولیز هستند. به‌منظور بررسی رفتار این دو عامل بر فرآیند پیرولیز مواد سازنده فیلتر روغن آزمایش‌ها در سه دمای ۳۶۰، ۴۴۰ و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد و در دو زمان اقامت ۳۰ و ۹۰ دقیقه انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها نرخ جریان نیتروژن ثابت و $\frac{ml}{min}$ ۲۰۰ در نظر گرفته‌شد. جدول ۷ شرایط انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷- شرایط انجام آزمایش‌ها

Table 7- tests conditions

Experiment number	Temperature (°C)	Reaction time (min)	Nitrogen flow rate ($\frac{ml}{min}$)
1	360	30	200
2	360	90	200
3	440	30	200
4	440	90	200
5	520	30	200
6	520	90	200

قبل از هر آزمایش مینی‌راکتور وزن شد (m_1). در مرحله بعدی باتوجه به مقادیر در نظر گرفته شده، خوراک آماده شد و سپس داخل مینی‌راکتور قرار گرفت. پس از اتمام پیرولیز مینی‌راکتور دوباره وزن شد (m_2) و با کم‌کردن وزن اولیه راکتور از مجموع وزن راکتور و مواد پس از اتمام واکنش، وزن باقی‌مانده موجود در راکتور به دست آمد ($m_{residue}$).

$$m_{residue} = m_2 - m_1 \quad (1)$$

قبل از شروع پیرولیز شیر جریان نیتروژن به مدت ۵ دقیقه باز شد تا راکتور عاری از هرگونه هوا شود. حدفاصل مخزن نیتروژن تا ورودی راکتور، از یک رگلاتور و همچنین پیچ تنظیم‌کننده جریان فلومتر^۱ برای کنترل و تثبیت نرخ جریان نیتروژن استفاده شد. پیرولیز در یک مینی‌راکتور استوانه‌ای به ارتفاع ۸۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۶ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر که از جنس

^۱ Flowmeter

فولاد ضدزنگ ۳۱۶ است صورت گرفت. مینی راکتور مذکور در یک محفظه استوانه‌ای شکل مجهز به یک ترموکوپل و نمایشگر دما و یک فشارسنج قرار گرفت. محفظه توسط یک گرمکن الکتریکی گرم شد. برای کاهش هدررفت انرژی محفظه‌ای که توسط گرمکن حرارت داده می‌شد با پشم شیشه عایق شد. این دستگاه دارای یک خروجی برای خارج شدن محصولات پیرولیز اعم گازهای غیرقابل تراکم و بخارات قابل تراکم است. در راه خروجی یک ظرف حاوی آب خنک تعبیه شده تا بخارات قابل تراکم را سرد کرده و بازیابی کند. این بخارات ناشی از پیرولیز روغن کارکرده و مواد هیدروکربنی دیگر مانند واشر لاستیکی و همچنین مواد سلولزی مانند کاغذ موجود در فیلتر روغن می‌باشند. محصول خروجی از کندانسور همان روغن پیرولیز است. گازهای غیرقابل تراکم نیز بدون هیچ تغییر فازی از سیستم خارج شدند. طرح آزمایش در شکل ۱ آمده است.

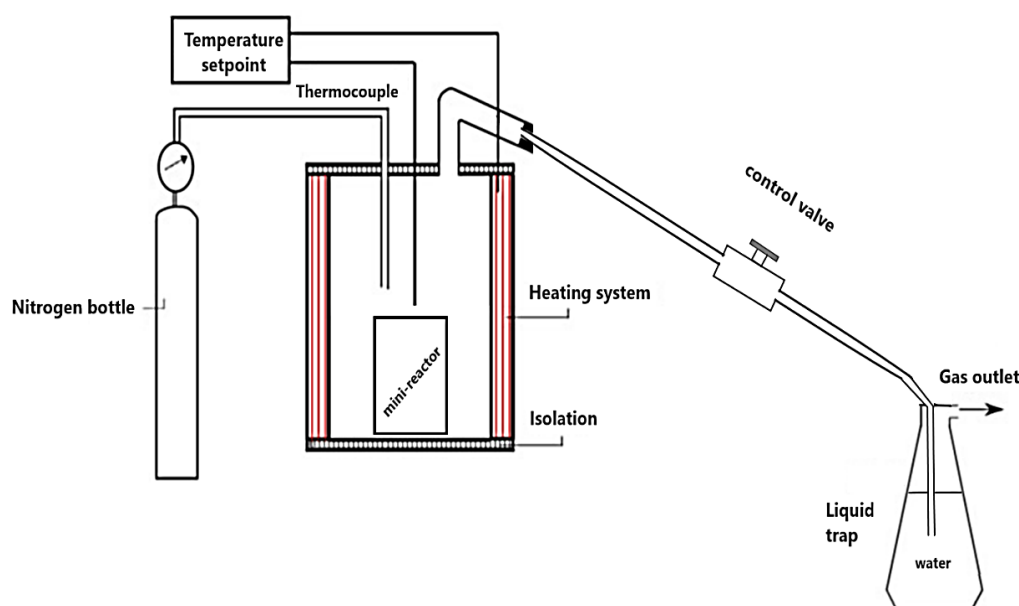


Figure 1- schematic of the experiment

شکل ۱- طرح آزمایش

بحث و نتیجه‌گیری

در این قسمت به بررسی تأثیر دما و زمان ماند بر پیرولیز مواد سازنده فیلتر روغن (روغن کارکرده، واشر لاستیکی و کاغذ فیلتر) پرداخته می‌شود. دما و زمان واکنش به‌راحتی بر محصولات پیرولیز تأثیر گذاشته و بازده این محصولات را تغییر می‌دهند به‌گونه‌ای که با تغییر هدفمند آن‌ها می‌توان شرایط مطلوب فرآیند پیرولیز را برای تولید ترکیب موردنظر به دست آورد. به‌عنوان مثال، درجه حرارت بالا و زمان اقامت بالا تولید گازهای غیرقابل تراکم را افزایش می‌دهد، درحالی‌که درجه حرارت بالا و زمان اقامت پایین باعث افزایش بازده محصولات هیدروکربنی قابل چگالش می‌شود. از سوی دیگر، درجه حرارت پایین و نرخ گرم‌شدن پایین باعث افزایش تولید باقی‌مانده جامد می‌شود [۲۰].

بررسی رفتار روغن کارکرده

روغن کارکرده بیشترین درصد وزنی را در فیلتر روغن جدا شده از اتومبیل دارد و همچنین ماده‌ای است که بازده بازیابی روغن پیرولیز آن تقریباً زیاد است و در صورت بازیابی، ارزش افزوده قابل‌قبولی دارد. جدول ۸ باقی‌مانده تولید شده و درصد باقی‌مانده به خوراک را در هر آزمایش نشان می‌دهد. در آزمایش‌های انجام شده بر روی روغن کارکرده میزان خوراک ورودی به راکتور ۸g است.

جدول ۸- باقی مانده و درصد باقی مانده به خوراک در پیرولیز روغن کار کرده

Table 8- Residue and residue-to-feed ratio in used oil pyrolysis

Experiment number	Temperature (°C)	Reaction time (min)	Residue (g)	Residue to feed ratio (%)
1	360	30	5.04	63
2	360	90	1.19	14.84
3	440	30	0.05	0.625
4	440	90	0.09	1.125
5	520	30	0.08	1
6	520	90	0.14	1.75

در آزمایش شماره ۱ زمان لازم برای فرآیند پیرولیز تأمین نشد و فرآیند ناقص انجام شد و به همین دلیل مقدار باقی مانده حاصل از پیرولیز زیادتر از آزمایش‌های دیگر است. همچنین در باقی مانده، تغییر ماهیت خاصی نسبت به خوراک دیده نشد و صرفاً یک ماده با ویسکوزیته بالاتری تولید شد. در آزمایش شماره ۲ فرآیند پیرولیز کامل تر بوده و باقی مانده ممکن است شامل هیدروکربن‌های سنگین و کک باشد. باقی مانده تولید شده در این آزمایش را در شکل ۲ مشاهده می‌کنید.



Figure 2- Residue produced in experiment number 2
شکل ۲- باقی مانده تولید شده در آزمایش شماره ۲

از آزمایش ۳ به بعد فرآیند پیرولیز کامل تر شده و موادی هیدروکربنی سنگین تر پیرولیز می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده درصد بسیار زیادی از باقی مانده موجود شامل کک است.



Figure 3- Coke produced in experiments 3 to 6
شکل ۳- کک تولید شده در آزمایش‌های ۳ تا ۶

به‌طور کلی دو پارامتر زمان اقامت و دمای واکنش تأثیر بیشتری بر چگونگی پیشرفت واکنش‌های شکست حرارتی دارند. تغییر این دو پارامتر باعث تغییر در بازده محصولات پیرولیز می‌شود.

تأثیر دما بر پیرولیز روغن کارکرده

در شکل ۴ درصد باقی‌مانده تولید شده به خوراک در اثر پیرولیز روغن کارکرده در دماهای مختلف آورده شده است.

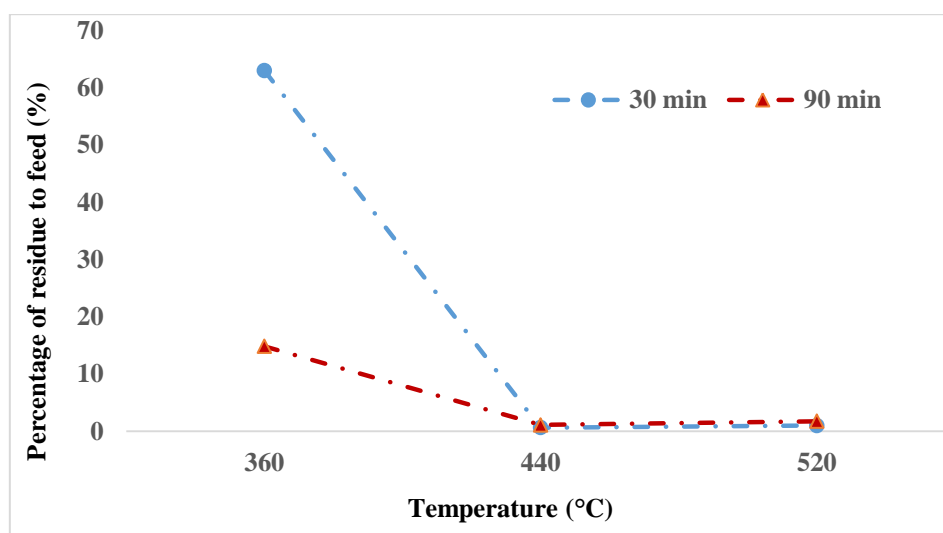


Figure 4- Percentage of residue to feed with respect to temperature

شکل ۴- درصد باقی‌مانده تولید شده به خوراک نسبت به دما

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش دما از ۳۶۰°C به ۴۴۰°C میزان باقی‌مانده تولید شده در اثر فرآیند پیرولیز در هر دو زمان ماند گزارش شده به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد تا به کمینه مقدار باقی‌مانده تولیدی برسیم. این کاهش باقی‌مانده در اثر پیشروی شکست حرارتی اولیه خوراک است. در واقع با افزایش دما، انرژی موردنیاز برای شکست پیوندهای شیمیایی در هیدروکربن‌های بلندزنجیر فراهم شده و منجر به تجزیه مولکول‌های بزرگ‌تر به اجزای کوچک‌تر و فرار شده است که در نهایت با آزاد شدن بخارات فرار جرم خوراک ورودی کم‌تر و باعث کاهش باقی‌مانده شده است. سپس در هر دو زمان ماند گزارش شده با افزایش دما از ۴۴۰°C درجه سانتی‌گراد به ۵۲۰°C درجه سانتی‌گراد مقدار کمی افزایش باقی‌مانده مشاهده شد. این مقدار در زمان ماند ۳۰ دقیقه ۰/۰۳ گرم و در زمان ماند ۹۰ دقیقه ۰/۰۵ گرم است. در واقع پتانسیل تشکیل کک فرآیند در دمای ۵۲۰°C مقداری بیشتر از دمای ۴۴۰°C است. در دماهای بالا واکنش‌های ثانویه غالب می‌شوند و تشکیل مولکول‌های سنگین‌تر و پیچیده‌تر را از طریق فرآیندهایی مانند پلیمریزاسیون و تراکم تسهیل می‌کنند. افزایش انرژی ورودی به سیستم منجر به کاهش پایداری حرارتی در مولکول‌های خاص می‌شود (مولکول‌هایی که در دماهای پایین‌تر انرژی شکست آن‌ها تأمین نمی‌شد) و باعث تجزیه و بازآرایی آن‌ها به ترکیبات پایدارتر و با وزن مولکولی بالاتر می‌شود. این پدیده به شکل‌گیری ترجیحی کک، یک جامد غنی از کربن و تولید گازهای غیر قابل تراکم کمک می‌کند. نتایج این تحقیق مشابه کار لام^۱ و همکاران است که اشاره می‌کند با پیشروی شکست حرارتی ثانویه مقدار تشکیل کک افزایش می‌یابد [۲۱]. در واقع با افزایش دما شکست حرارتی ثانویه باعث می‌شود بخارات هیدروکربنی تولید شده که در راکتور حضور دارند دوباره شکسته شوند. به شکل ۵ توجه شود.

¹ S. S. Lam

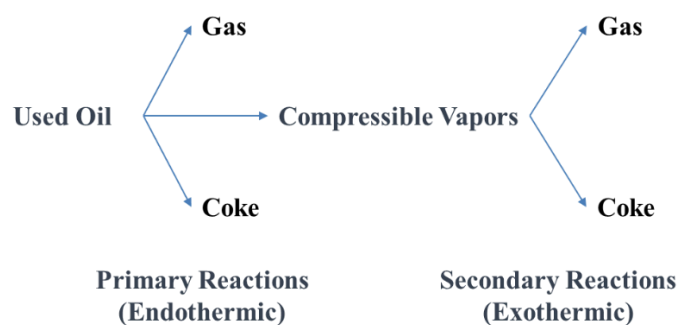


Figure 5- Formation of Coke in Oil Pyrolysis

شکل ۵- نحوه تشکیل کک در پیرولیز روغن

با افزایش دما شرایط برای تجزیه مولکول‌ها با زنجیره آلیفاتیک^۱ بلندتر مهیا می‌شود. با تجزیه مولکول‌های بلندزنجیر آلیفاتیک، باقی‌مانده این مولکول‌ها تشکیل حلقه می‌دهند و پس از واکنش‌های هیدروژن‌زدایی ساختمان حلقوی رشد کرده و منجر به گونه‌های پلی آروماتیک می‌شود که روی هم چیده می‌شوند و کک را تشکیل می‌دهند.

تأثیر زمان اقامت بر پیرولیز روغن کارکرده

عامل مهم دیگری که کنترل‌کننده واکنش‌های صورت‌گرفته در شکست حرارتی مواد موجود در راکتور است، زمان اقامت خوراک در راکتور است. شکل ۶ اثر زمان اقامت بر فرآیند پیرولیز روغن کارکرده را مشخص می‌کند.

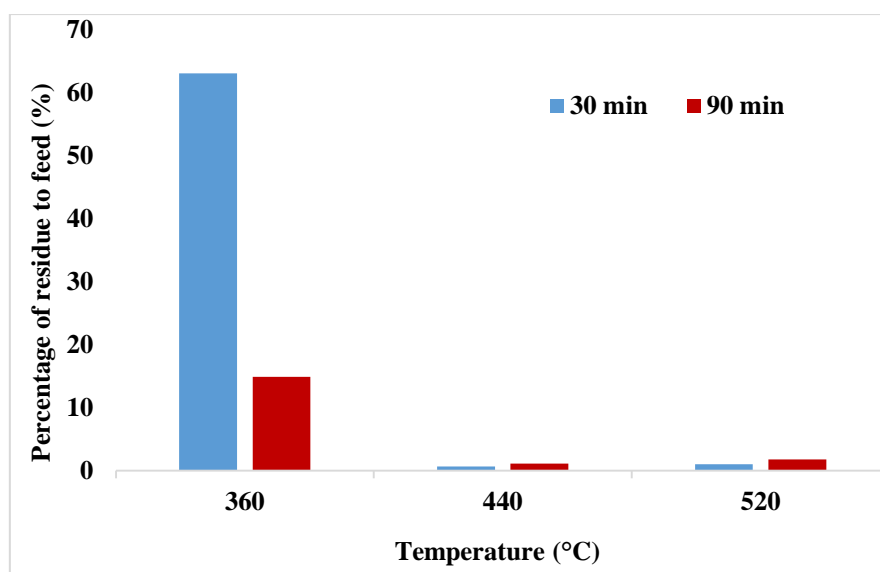


Figure 6- The Effect of Residence Time on the Residue Yield in the Used Oil Pyrolysis Process

شکل ۶- اثر زمان اقامت بر روی باقی‌مانده حاصل از فرآیند پیرولیز روغن کارکرده

باتوجه به شکل ۶ در دمای ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ماند ۳۰ دقیقه، مقادیر زیادی مواد هیدروکربنی پیرولیز نشده داریم که با افزایش زمان ماند به ۹۰ دقیقه زمان موردنیاز برای شکست حرارتی به مواد داخل راکتور داده می‌شود و فرآیند پیرولیز به سمت کامل‌شدن حرکت می‌کند. با زمان واکنش بیشتر، واکنش‌های پیرولیز می‌توانند تا پایان کامل شوند و مقدار

¹ Aliphatic chain

بیشتری از خوراک را به اجزای فرار تبدیل کرده و باقیمانده کمتری باقی بگذارند. در دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان ماند از ۳۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه مقدار کمی افزایش در تولید باقی‌مانده داشته‌ایم. این مقادیر نشان می‌دهد که واکنش تشکیل کک به صورت غیر کاتالیستی شروع شده است و هرچه زمان ماند طولانی‌تر شود بخارات بیشتری در معرض شکست حرارتی ثانویه قرار می‌گیرند و کک بیشتری تولید می‌شود. محصولات شکست حرارتی ثانویه، کک و گازهای تراکم‌ناپذیر می‌باشند. پس از شکست حرارتی ثانویه هیدروکربن‌های سبک به صورت گاز غیرقابل تراکم متصاعد شده و قسمت باقی‌مانده زنجیره به دلیل واکنش‌پذیری بالایی که دارد با تشکیل حلقه‌های بنزنی و پلیمریزاسیون مجدد تبدیل به کک می‌شوند. با افزایش زمان ماند مقدار کک اضافه شده در دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۰/۰۴ گرم و این مقدار برای دما ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد ۰/۰۶ گرم است. در واقع هرچه دما افزایش یافته شرایط برای کک‌سازی بهتر شده و سبب افزایش باقی‌مانده بیشتری شده است.

بررسی رفتار واشر لاستیکی

در ادامه، آزمایشات مشابه بر روی واشر لاستیکی انجام گرفت تا رفتار آن را نسبت به تغییر دما و زمان اقامت در راکتور مشخص کنیم. جدول ۹ باقی‌مانده تولید شده و درصد باقی‌مانده به خوراک را در اثر پیرولیز واشر نشان داده است. در آزمایش‌های انجام شده بر روی واشر، میزان خوراک ورودی ۱g است.

جدول ۹- باقی‌مانده تولید شده و درصد باقی‌مانده تولید شده به خوراک در اثر پیرولیز واشر

Table 9- Residue and residue-to-feed ratio in gasket pyrolysis

Experiment No.	Temperature (°C)	Residence Time (min)	Residue (g)	Percentage of residue to feed (%)
1	360	30	0.47	47
2	360	90	0.46	46
3	440	30	0.44	44
4	440	90	0.43	43
5	520	30	0.43	43
6	520	90	0.41	41

تأثیر دما بر پیرولیز واشر لاستیکی

شکل ۷ درصد تولید باقی‌مانده نسبت به خوراک اولیه را در اثر افزایش دما از ۳۶۰°C تا ۵۲۰°C نشان می‌دهد.

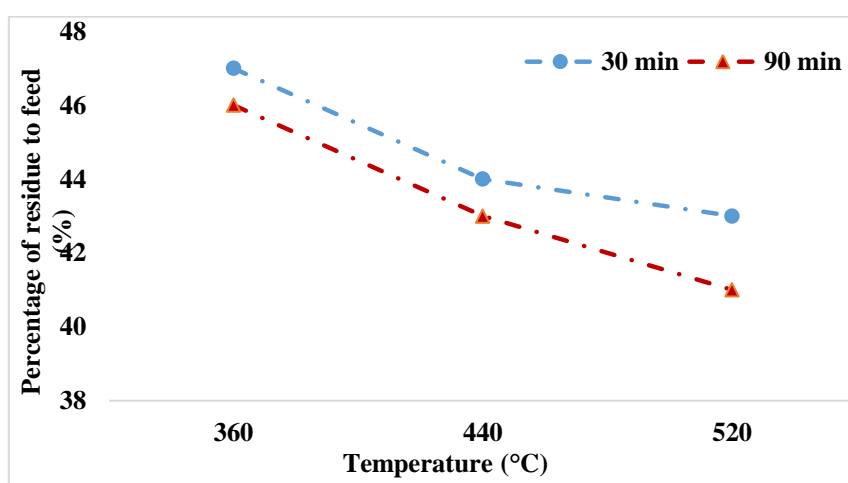


Figure 7- Percentage of residue to feed with respect to temperature in gasket pyrolysis

شکل ۷- درصد باقی‌مانده به خوراک نسبت به دما در پیرولیز واشر

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود در هر دو زمان ماند ۳۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه میزان باقی‌مانده تولید شده در اثر فرآیند پیرولیز با افزایش دما از ۳۶۰°C به ۵۲۰°C کاهش می‌یابد. در زمان ماند ۳۰ دقیقه از ۴۷ درصد به ۴۳ درصد و در زمان ماند ۹۰ دقیقه از ۴۶ درصد به ۴۱ درصد رسیده‌ایم. این کاهش باقی‌مانده نشان‌دهنده پیشرفت واکنش پیرولیز و شکست حرارتی اولیه مواد هیدروکربنی موجود در واشر است. در مطالعه کانلیف^۱ و همکاران که بر روی پیرولیز تایرهای لاستیکی کار کرده‌اند نشان داده شده است که باقی‌مانده حاصل از مواد لاستیکی عمدتاً از کربن، مقداری هیدروکربن جامد و اکسیدهای فلزی تشکیل شده است [۲۲]. در کار دیگری دادز^۲ و همکاران طی پیرولیز تایرهای لاستیکی فرسوده مشخص کردند که از آنجایی که هیچ مکانیزم مشخصی برای کاهش بازده باقی‌مانده کربنی با افزایش دمای پیرولیز وجود ندارد منطقی است استنباط کنیم که افزایش دمای پیرولیز باعث تبخیر هیدروکربن‌های جامد در باقی‌مانده می‌شود [۲۳]. به بیان دیگر واکنش پیرولیز یک واکنش گرماگیر است به همین دلیل با افزایش دما هم سرعت واکنش افزایش می‌یابد و هم انرژی لازم برای شکستن پیوندهای مولکولی تأمین می‌شود، به همین منظور مواد هیدروکربنی بیشتری تجزیه شده و باقی‌مانده واشر لاستیکی کمتر شده است. در دماهای بالا (۴۴۰°C تا ۵۲۰°C) برخلاف پیرولیز روغن، بازده باقی‌مانده واشر همچنان نزولی است. در این دماها تبخیر مواد هیدروکربنی جامد موجود در لاستیک شروع می‌شود که باعث کاهش باقی‌مانده شده است. به بیان دیگر به دلیل غالب بودن سرعت واکنش شکست حرارتی اولیه و تبخیر مواد هیدروکربنی سنگین موجود در لاستیک که باعث کاهش باقی‌مانده می‌شوند نسبت به واکنش شکست حرارتی ثانویه که با پلیمریزاسیون مجدد منجر به تولید کک می‌شود، بازده باقی‌مانده نزولی است. شیب خط زمان ماند ۹۰ دقیقه در دماهای بالاتر بیشتر از شیب خط زمان ماند ۳۰ دقیقه است که نشان می‌دهد زمان ماند نقش به‌سزایی در کاهش مقدار باقی‌مانده حاصل از پیرولیز واشر دارد.

تأثیر زمان اقامت بر پیرولیز واشر لاستیکی

در این سری از آزمایش‌ها پارامتر متغیر، زمان اقامت واکنش است و دما ثابت نگه داشته شده است. نتایج حاصل از آزمایشات در شکل ۸ گزارش شده است.

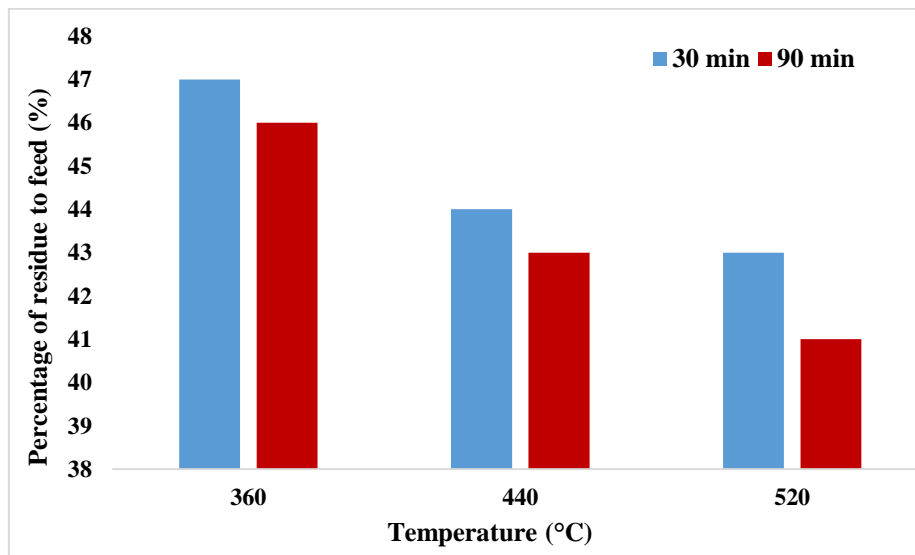


Figure 8- Effect of residence time on residue yield in gasket pyrolysis

شکل ۸- تأثیر زمان اقامت در تولید باقی‌مانده در اثر پیرولیز واشر

¹ A. M. Cunliffe

² W. J. Dodds

همان طور که در شکل ۸ مشخص است در هر دما با افزایش زمان ماند مقدار باقی مانده تولیدی کاهش می یابد. در دمای ۳۶۰ درجه سانتیگراد با افزایش زمان ماند از ۳۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه ۲ درصد کاهش تولید باقی مانده داشته ایم. همچنین در دمای ۴۴۰ درجه و ۵۲۰ درجه سانتیگراد نیز به ترتیب ۱ و ۲ درصد کاهش بازده تولید باقی مانده مشاهده شده است. با افزایش زمان ماند هیدروکربن های سازنده واشر، زمان بیشتری در معرض حرارت قرار گرفته و انرژی بیشتری برای شکستن پیوندهای مولکولی دریافت کرده اند که این عامل باعث کامل تر شدن فرآیند شکست و پیرولیز آن ها شده و در نهایت مواد فرار بیشتر و باقی مانده جامد کمتری تولید شده است.

بررسی رفتار کاغذ فیلتر

تست های مشابه بر روی ۲g از کاغذ فیلتر انجام شد. جدول ۱۰ نتایج حاصل از پیرولیز کاغذ فیلتر را در دما و زمان های ماند مختلف نشان می دهد.

جدول ۱۰- باقی مانده و درصد باقی مانده تولید شده به خوراک در اثر پیرولیز کاغذ فیلتر

Table 10- Residue and residue-to-feed ratio in paper pyrolysis

Experiment No.	Temperature (°C)	Residence Time (Min)	Residue (g)	Percentage of residue to feed (%)
1	360	30	0.68	34
2	360	90	0.66	33
3	440	30	0.66	33
4	440	90	0.65	32.5
5	520	30	0.66	33
6	520	90	0.65	32.5

طبق اعداد گزارش شده در جدول ۱۰ با افزایش ۱۶۰ درجه ای دما تنها ۱/۵ درصد کاهش بازده باقی مانده داشته ایم. به همین دلیل پیرولیز کاغذ در دمای بالاتر از ۳۶۰°C و زمان ماند بیشتر از ۳۰ min توجه اقتصادی ندارد. در دماهای بالاتر از ۳۶۰°C خاکستر تولید شده در اثر پیرولیز کاغذ فیلتر، وابستگی زیادی به دمای واکنش و زمان ماند در راکتور ندارد. شکل ۹ باقی مانده تولید شده در اثر پیرولیز کاغذ فیلتر را نشان می دهد.



Figure 9- Residue produced in filter paper pyrolysis

شکل ۹- باقی مانده تولید شده در اثر پیرولیز کاغذ فیلتر

تأثیر دما بر پیرولیز کاغذ فیلتر

شکل ۱۰ درصد تولید باقی مانده نسبت به خوراک اولیه را در اثر افزایش دما از ۳۶۰°C تا ۵۲۰°C نشان می دهد.

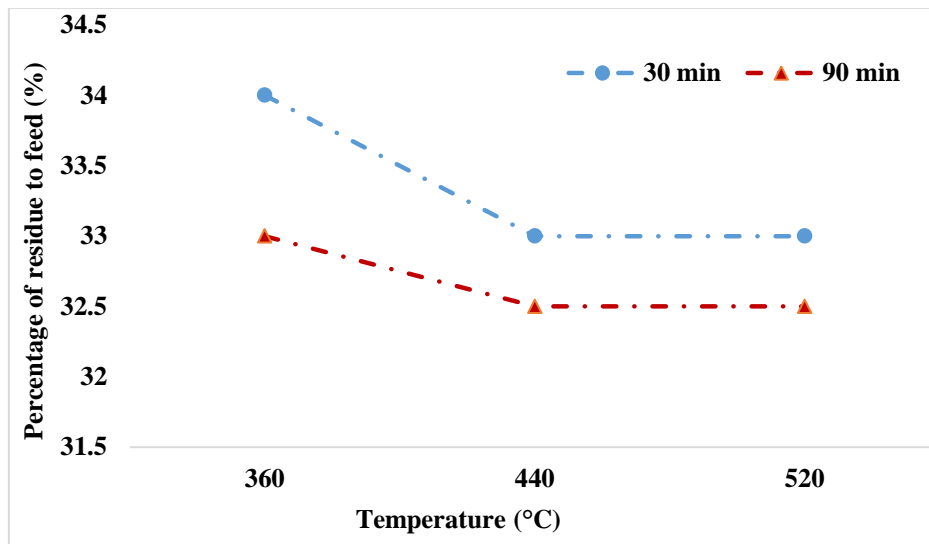


Figure 10- Percentage of produced residue to initial feed in filter paper pyrolysis
شکل ۱۰- درصد باقی مانده تولید شده به خوراک اولیه در اثر پیرولیز کاغذ فیلتر

در اثر افزایش دما از ۳۶۰°C تا ۴۴۰°C بازده باقی مانده تولید شده کاهش می یابد. کاهش بازده باقی مانده با افزایش دما می تواند در اثر شکست حرارتی اولیه کاغذ فیلتر یا شکست باقی مانده حاصله باشد. با افزایش دما از ۴۴۰°C به ۵۲۰°C تغییری محسوسی در بازده باقی مانده مشاهده نشد. با تبدیل شدن مواد سلولزی کاغذ فیلتر به خاکستر عملاً واکنش پیرولیز رو به اتمام است. با توجه به نمودار مشخص است که بازده باقی مانده ثابت مانده است.

تأثیر زمان اقامت بر پیرولیز کاغذ فیلتر

شکل ۱۱ اثر زمان اقامت بر فرآیند پیرولیز کاغذ فیلتر را مشخص می کند.

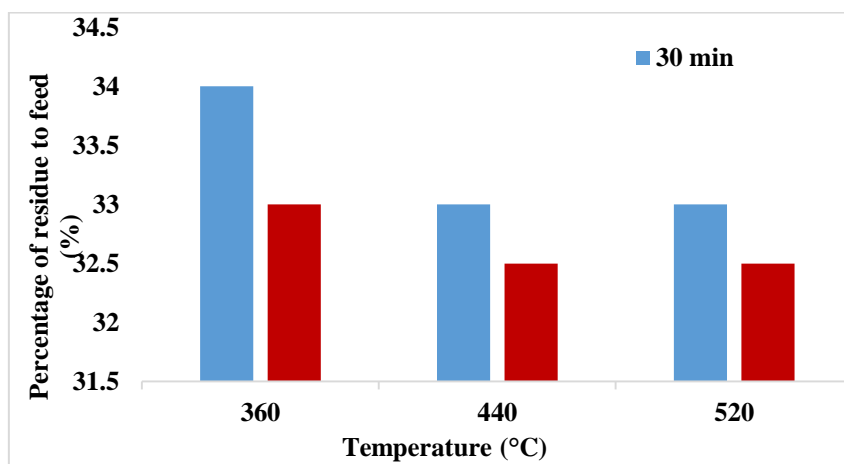


Figure 11- Effect of residence time on residue yield in filter paper pyrolysis
شکل ۱۱- اثر زمان اقامت بر تولید باقی مانده طی فرآیند پیرولیز کاغذ فیلتر

طبق شکل ۱۱ در همه دماها با افزایش زمان ماند مقدار باقی مانده تولیدی مقدار کمی کاهش می یابد. در دمای ۳۶۰ درجه سانتی گراد با افزایش زمان ماند از ۳۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه تنها ۱ درصد کاهش تولید باقی مانده داشته ایم. همچنین در دمای ۴۴۰ درجه سانتی گراد و ۵۲۰ درجه سانتی گراد نیز ۰/۵ درصد کاهش بازده باقی مانده مشاهده می شود. با افزایش زمان ماند کاغذ فیلتر مدت زمان بیشتری در راکتور قرار می گیرد و انرژی بیشتری دریافت می کند که این باعث می شود فرآیند پیرولیز کامل تر و میزان باقی مانده جامد کمتری داشته باشد. بر اساس شکل ۱۱ با توجه به کاهش ناچیز باقی مانده طی افزایش شصت دقیقه ای زمان ماند در هر دما، برای رسیدن به باقی مانده کمتر، زیاد کردن زمان اقامت فرآیند پیرولیز توجیه اقتصادی نداشته و چنین کاری پیشنهاد نمی شود.

سهام هر یک از مواد در تولید باقی مانده

با نظر به اینکه فیلتر روغن از مواد مختلفی تشکیل شده است که در تشکیل باقی مانده بر روی فولاد قراضه شرکت می کنند، دانستن سهم هر یک از مواد در تولید باقی مانده به ما کمک می کند تا برای رسیدن به قراضه ای با کیفیت مطلوب تر بهتر تصمیم گیری کنیم. در شکل ۱۲ درصد تولید باقی مانده به تفکیک مواد آورده شده است.

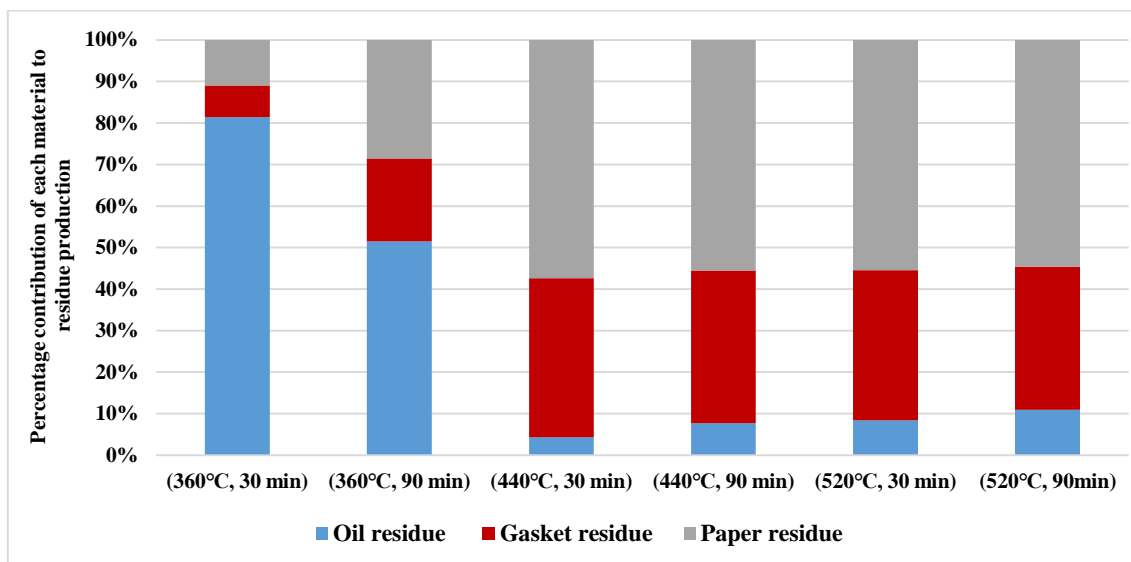


Figure 12- Percentage contribution of each material to residue production (%)

شکل ۱۲- سهم هر یک از مواد در تولید باقی مانده

طبق شکل ۱۲ در دمای ۳۶۰°C که فرآیند پیرولیز کامل نشده است روغن بیشترین تأثیر را در باقی مانده تولید شده دارد. قراضه تولید شده در این دما، به دلیل داشتن مواد هیدروکربنی زیاد کیفیت لازم برای ارسال به کارخانه های فولاد را نداشته و توسط این شرکتها پذیرفته نمی شود. از دمای ۴۴۰°C به بعد قراضه دارای کیفیت مطلوبی است. در این دما سهم کاغذ فیلتر در تولید باقی مانده از همه اجزاء شرکت کننده در فرآیند بیشتر است. در دمای ۵۲۰°C با اینکه سهم روغن کارکرده در تولید باقی مانده کمی بیشتر شده است؛ ولی بازهم کاغذ فیلتر است که بیشترین تأثیر در تولید باقی مانده را دارد.

مقایسه ترکیب درصد باقی مانده تولید شده با ترکیب درصد خوراک

در ادامه باقی مانده تولید شده را با مقدار خوراک ورودی مقایسه خواهیم کرد. به دلیل اینکه قراضه های تولید شده در دمای ۳۶۰°C دارای مواد پیرولیز نشده هستند و کیفیت خوبی ندارند از این دما صرف نظر می کنیم و محاسبات را برای آزمایشاتی انجام می دهیم که در آنها فرآیند پیرولیز تقریباً کامل شده و قراضه کیفیت قابل قبولی دارد. در واقع آزمایش های ۳ تا ۶ مورد نظر ما است. در جدول ۱۱ و شکل ۱۳ به ترتیب مقادیر و تفکیک درصد مواد در خوراک آورده شده است.

جدول ۱۱- مقادیر مواد موجود در خوراک

Table 11- Composition of Feed

No.	Sample	Feed (g)
1	Used oil	8
2	Gasket	1
3	Filter paper	2

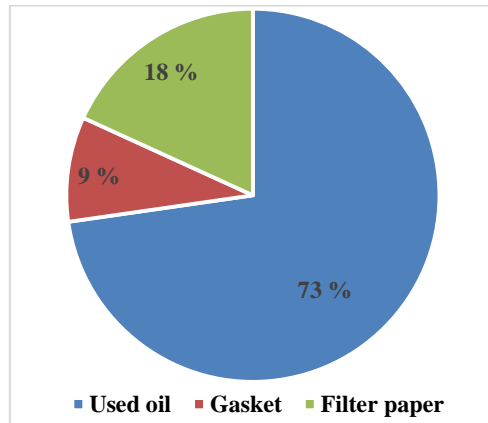


Figure 13- Composition of feed

شکل ۱۳- ترکیب درصد خوراک

در ادامه در شکل ۱۴ سهم هر یک از مواد در تولید باقی مانده طی آزمایش ها ۳ تا ۶ را نشان می دهد. (میانگین باقی مانده تولید شده توسط هر ماده طی این آزمایشات گزارش شده است.)

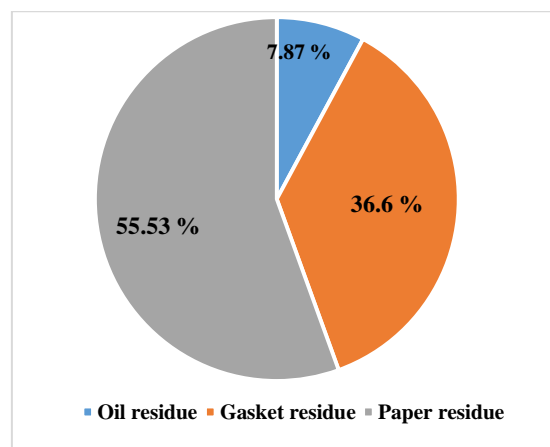


Figure 14- Contribution of each material to residue generation in experiments 3 to 6

شکل ۱۴- سهم هر ماده در تولید باقی مانده طی آزمایشات ۳ تا ۶

باتوجه به شکل ۱۳ میزان ورودی روغن کارکرده از همه مواد موجود در خوراک بیشتر بوده است و پس از آن به ترتیب کاغذ فیلتر و واشر بیشترین سهم را در خوراک ورودی داشته‌اند. بنا بر شکل ۱۴ مشخص است که بیشترین سهم تولید باقی‌مانده به ترتیب از آن کاغذ فیلتر، واشر و در نهایت روغن کارکرده است. طبق اعداد گزارش شده باتوجه به اینکه ۷۳ درصد از خوراک ورودی از روغن کارکرده تشکیل شده است، بازیابی روغن کارکرده بسیار خوب بوده است و کمترین بازده باقی‌مانده را دارا است. به همین دلیل با سرمایه‌گذاری روی این ماده و تعبیه سردکننده مناسب در فرآیند پیرولیز می‌توان مقدار زیادی از روغن پیرولیز را سرد کرده و به چرخه صنعت باز گرداند. توجه شود که روغن پیرولیز حاصل، از ارزش بیشتری نسبت به روغن کارکرده اولیه موجود در فیلتر برخوردار است.

لازم به ذکر است که در طی فرآیند پیرولیز به‌خصوص پیرولیز در دماهای بالا مقادیر زیادی گاز غیر قابل تراکم نیز تولید می‌شود. از این گاز بیشتر برای تأمین گرمای فرآیند استفاده می‌شود. ترکیب درصد مونوکسید کربن موجود در این گاز به دلیل پیرولیز واشر لاستیکی معمولاً از حداکثر حد مجاز برای حمل‌ونقل در خطوط لوله گاز طبیعی فراتر می‌رود و از طرفی دیگر در صورت ذخیره‌سازی محتوای الفین موجود در گاز باعث ایجاد پلیمرهای نامطلوب می‌شود. اگر گاز پیرولیز در خود فرآیند استفاده نشود یا کارخانه نتواند گاز اضافی محصول را مصرف کند، معمولاً در فلر^۱ سوزانده می‌شود [۲۳].

در این بین کاغذ فیلتر کمترین بازده پیرولیز را داشته است و همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است بیشترین بازده باقی‌مانده از آن این ماده است.

نتیجه‌گیری

پس از پیرولیز اجزاء فیلتر روغن استفاده شده به‌صورت جداگانه و بررسی دو عامل تأثیرگذار بر این فرآیند یعنی دما و زمان ماند، نتایج زیر به دست آمد.

- در پیرولیز روغن کارکرده، در دماهای پایین‌تر (۳۶۰°C تا ۴۴۰°C) که واکنش شکست حرارتی اولیه واکنش غالب بود، افزایش دما و زمان ماند باعث کاهش باقی‌مانده پیرولیز شد و در دماهای بالاتر (۴۴۰°C تا ۵۲۰°C) که واکنش شکست حرارتی ثانویه واکنش غالب بود به دلیل شروع تشکیل کک، افزایش دما و زمان ماند باعث افزایش بازده باقی‌مانده شد.
- در بررسی پیرولیز واشر لاستیکی مشاهده شد که افزایش دما و زمان ماند باعث کاهش بازده باقی‌مانده می‌شود. در دماهای پایین، واکنش شکست حرارتی اولیه لاستیک و در دماهای بالا تبخیر مواد هیدروکربنی جامد موجود در لاستیک منجر به کاهش باقی‌مانده شدند.
- طی بررسی تأثیر دما و زمان ماند بر پیرولیز کاغذ فیلتر مشخص شد که افزایش این دو پارامتر باعث پیشروی بهتر فرآیند پیرولیز و کاهش باقی‌مانده می‌شود. همچنین مشاهده شد که در دمای ۴۴۰°C واکنش تقریباً کامل شده و در دماهای بالاتر از آن، میزان خاکستر تولید شده از دما و زمان ماند تأثیر کمی می‌پذیرد.
- در بازیافت فیلترهای روغن به روش پیرولیز، بیشترین سهم تولید باقی‌مانده به ترتیب از آن کاغذ فیلتر، واشر و در نهایت روغن کارکرده است.

منابع

- [1] O. Hanoshenko, O. Stepova, Y. Chukhlib, L. Kostiantyn, Y. Yanovych, and N. Bilotserkivsk, "Environmentally friendly disposal of used automotive oil filters: legislative aspects and technology," *Ecol. Quest.*, vol. 32, pp. 77–89, 2021.
- [2] K. D. Peaslee, "Recycling used automotive oil filters," *JOM*, vol. 46, pp. 44–46, 1994.
- [3] "www.irna.ir/news/84299320/."

¹ Flare

- [4] Small Industries Organization and industrial States of Iran. Preliminary feasibility studies of the recycling plan automobile oil filters. (in Persian)
- [5] A. Babich and D. Senk, "Coke in the iron and steel industry," in *New Trends in Coal Conversion*, Chapter 13, pp. 367–404, 2019.
- [6] "<https://www.markazehan.com/iron-scrap-market-situation>."
- [7] G. Gaidajis, K. Angelakoglou, P. N. Botsaris, and F. Filippidou, "Analysis of the recycling potential of used automotive oil filters using the Life Cycle Assessment approach," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, pp. 986–994, 2011,
- [8] K. D. Peaslee and D. E. Roberts, "The Future of Used Oil Filter Recycling in Missouri: An Evaluation of Potential Processes, Product Quality, Recycling Locations, and Economics," 1997.
- [9] A. V. Bridgwater, "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, pp. 3–22, 1999.
- [10] J. Towfighi, S. M. Sadrameli, and A. Niaei, "Coke Formation Mechanisms and Coke Inhibiting Methods in Pyrolysis Furnaces," *J. Chem. Eng. Japan*, vol. 35, pp. 923–937, 2002
- [11] M. L. Poutsma, "Fundamental reactions of free radicals relevant to pyrolysis reactions," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 54, no. 1–2, pp. 5–35, 2000.
- [12] A. Corma, L. Sauvanaud, Y. Mathieu, S. Al-Bogami, A. Bourane, and M. Al-Ghrami, "Direct crude oil cracking for producing chemicals: Thermal cracking modeling," *Fuel*, vol. 211, pp. 726–736, 2018.
- [13] S. S. Nagaraja, A. B. Sahu, S. Panigrahy, and H. J. Curran, "A fundamental study on the pyrolysis of hydrocarbons," *Combust. Flame*, vol. 233, p. 111579, 2021.
- [14] P. E. Savage, "Mechanisms and kinetics models for hydrocarbon pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 54, pp. 109–126, 2000.
- [15] J. Singh, S. Kumar, and M. O. Garg, "Kinetic modelling of thermal cracking of petroleum residues: A critique," *Fuel Process. Technol.*, vol. 94, pp. 131–144, 2012.
- [16] K. D. Peaslee and D. E. Roberts, "Characterization of used automotive oil filters for recycling," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 19, pp. 81–91, 1997.
- [17] D. E. Roberts II and K. D. Peaslee, "Analysis of the factors influencing the removal of oil from used automotive oil filters during recycling operations," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 22, pp. 97–113, 1998.
- [18] Y. Holik and E. Ganoshenko, "Experimental research of withdrawal of oil remains from the used kaolin oil filters," *Environmental problems*, 2017. irbis-nbuv.gov.ua.
- [19] M. Hassanpour, "Technologies to Manage Used Automotive Oil Filters in Iran: A Review Study," *Arch. Hyg. Sci.*, vol. 10, pp. 97–110, 2021.
- [20] S. A. El-Mekkawi, N. N. El-Ibiari, N. K. Attia, G. I. El-Diwani, O. A. El-Arady, and A. K. E. Morsi, "Reducing the environmental impact of used lubricating oil through the production of fuels by pyrolysis," *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 14, pp. 92–109, 2020.
- [21] S. S. Lam, A. D. Russell, and H. A. Chase, "Pyrolysis Using Microwave Heating: A Sustainable Process for Recycling Used Car Engine Oil," pp. 10845–10851, 2010.
- [22] A. M. Cunliffe and P. T. Williams, "Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 44, pp. 131–152, 1998.
- [23] W. J. Dodds, J.; Domenico, W.F.; Evans, D.R.; Fish, L.W.; Lassahn, P.L.; Toth, "Scrap tires: a resource and technology evaluation of tire pyrolysis and other selected alternate technologies" U.S. Department of Energy Idaho Operations Office Under DOE Contract No. DE-AC07-761001570, 1983.

English Abstract

Studying the Influence of Temperature and Residence Time on the Recovery of Oil Filter Components via Pyrolysis

Mohammad Najafi Dorcheh Kalmarani¹, Ramin Karimzadeh^{2*}

1- Department of chemical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, mohammad.najafi@modares.ac.ir

2- Department of chemical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, ramin@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2023/11/14, Received in revised form: 2024/01/03, Accepted: 2024/02/13)

Used oil filters contain both significant environmental hazards and valuable components suitable for reuse, justifying their recycling. Among various recycling methods, pyrolysis has been employed in this project. This study investigates the behavior of each influential material in residue production, including used oil, rubber gasket, and filter paper, with the alteration of two parameters: temperature and residence time, individually. Experiments were conducted at temperatures of 360, 440, and 520 degrees Celsius, with two residence times of 30 and 90 minutes, under a constant nitrogen flow rate of 200 ml/min. The residue yield was measured after each experiment. In the pyrolysis of used oil, with an increase in temperature and residence time, the residue production initially decreased due to the advancement of primary thermal cracking reactions in the feed. However, secondary thermal cracking of hydrocarbons present in the reactor led to a subsequent increase in residue production. In the pyrolysis of rubber gasket, the residue production trend consistently decreased with rising temperature and residence time, indicating the progression of pyrolysis and initial thermal cracking, as well as the vaporization of solid hydrocarbon materials at higher temperatures. In the examination of the effect of temperature and residence time on filter paper pyrolysis, it was observed that increasing these parameters reduced the efficiency of residue production. This reduction could be attributed to either the initial thermal cracking of the filter paper or the secondary thermal cracking of the produced residue.

Keywords: Used oil filters, Pyrolysis, Ferrous scrap