مقدمه‌ای بر جایگاه

آروماتیک‌ها در صنعت پتروشیمی

محمد یاراحمدی

اندیشکده حکمرانی انفال و منابع طبیعی

گزارش پژوهش در دست انجام

پژوهشگاه دانشگاه امام صادق علیه‌السلام

مقدمه‌ای بر جایگاه آروماتیک‌ها در صنعت پتروشیمی

مؤلف: محمد یاراحمدی

ناشر: پژوهشگاه دانشگاه امام صادق علیه‌السلام

مدیر علمی: اندیشکده حکمرانی انفال و منابع طبیعی

شماره مسلسل: ۱۴-۰۹-۱۴۰۳

تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۳

ویرایش اول

تعداد صفحات ۴۰

نشانی: تهران، بزرگراه شهید چمران، پل مدیریت، دانشگاه امام صادق علیه‌السلام، پژوهشگاه

کدپستی: ۱۴۶۵۹۴۳۶۸۱

تلفن: ۹۸۲۱۸۸۰۹۴۹۲۴+

اندیشکده حکمرانی انفال و منابع طبیعی

درگاه ارتباطی:

https://isu.ac.ir/index.php?slc_lang=fa&sid=38

https://ble.ir/anfalisu

تمامی حقوق برای پژوهشگاه دانشگاه امام صادق علیه‌السلام محفوظ است
و استفاده از مطالب این گزارش با ذکر منبع مجاز است.

فهرست مطالب

۱. مقدمه ۹

۱-۱. بررسی شیمیایی ۹

۱-۲. جایگاه در صنعت پتروشیمی ۹

۱-۳. بازار جهانی ۱۰

۱-٤. آروماتیکها در ایران ۱۱

۲. مروری بر انواع آروماتیکها ۱۲

۳. بنزن ۱۵

۳-۱. ساختار شیمیایی ۱۵

۳-۲. کاربردها ۱۵

۳-۳. بازار جهانی ۱٦

۳-٤. فناوری تولید ۱۷

۳-٤-۱. ریفورمینگ کاتالیستی ۱۷

۳-٤-۲. کراکینگ حرارتی و کاتالیستی نفتا ۱۸

۳-٤-۳. آلکیلاسیون و دآلکیلاسیون ۲۰

۳-٤-٤. پیرولیز اتان و پروپان ۲۱

۳-٤-۵. اکسیداسیون مستقیم ۲۱

٤. تولوئن ۲۲

٤-۱. ساختار شیمیایی ۲۲

٤-۲. کاربردها ۲۳

٤-٣. حجم بازار ٢٤
٤-٤. روش تولید ٢٥
٤-٤-١. استخراج از نفت خام و گاز طبیعی ٢٥
٤-٤-٢. فرآیند ریفرمینگ کاتالیستی ٢٥
٤-٤-٣. فرآیند الکیلاسیون ٢٦
٤-٤-٤. تولید از زغال سنگ ٢٦
٤-٥. فناوری‌ها و تکنولوژی‌ها ٢٧
٥. زایلنها ٢٧
٥-١. ساختار شیمیایی ٢٧
٥-١-١. اورتو-زایلن (o-Xylene) ٢٧
٥-١-٢. متا-زایلن (m-Xylene) ٢٨
٥-١-٣. پارا-زایلن (p-Xylene) ٢٨
٥-٢. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زایلن‌ها ٢٨
٥-٣. کاربردهای زایلن‌ها ٢٩
٥-٣-١. تولید ترفتالات پلی‌اتیلن (PET) ٢٩
٥-٣-٢. تولید ایزوفتالیک اسید ٢٩
٥-٣-٣. تولید فتالیک انیدرید ٢٩
٥-٣-٤. حلال‌های صنعتی ٣٠
٥-٣-٥. افزودنی‌های سوخت ٣٠
٥-٣-٦. تولید مواد شیمیایی واسطه ٣٠
٥-٣-٧. صنایع پلاستیک و لاستیک ٣١
٥-٣-٨. صنایع رنگ و پوشش ٣١
٥-٣-٩. صنایع دارویی و بهداشتی ٣١
٥-٤. حجم بازار ٣١
٥-٥. روش تولید ٣٢

۶. جدیدترین پروژه‌ها ۳۴
۷. فرآیند تبدیل متانول به آروماتیک (MTA) ۳۶
۷-۱. مراحل اصلی فرایند MTA ۳۶
۷-۲. فناوری‌های مورد استفاده در فرایند MTA ۳۷
۷-۳. مزایا و چالش‌های فرایند MTA ۳۷
۷-۴. سرمایه‌گذاری مورد نیاز ۳۸
یادداشت‌ها ۳۹

۱. مقدمه

۱-۱. بررسی شیمیایی

آروماتیک‌ها، گروهی از ترکیبات آلی هستند که دارای یک یا چند حلقه بنزنی (حلقه‌های شش‌کربنی با پیوندهای دوگانه متناوب) هستند. در صنعت پتروشیمی، این ترکیبات از مهم‌ترین مواد اولیه به‌شمار می‌آیند که از طریق فرآیندهایی مانند کلتالیتیک ریفورمینگ و کراکینگ از نفت خام و گاز طبیعی به‌دست می‌آیند. سه محصول اصلی آروماتیکی در صنعت پتروشیمی شامل بنزن، تولوئن و زایلن‌ها (BTX) هستند که پایه بسیاری از محصولات شیمیایی و پلیمری را تشکیل می‌دهند.

۱-۲. جایگاه در صنعت پتروشیمی

جایگاه آروماتیک‌ها در صنعت پتروشیمی بسیار مهم است. بنزن به‌عنوان ماده اولیه در تولید استایرن (برای تولید پلاستیک‌های مختلف)، فنول (برای تولید رزین‌ها و چسب‌ها) و سیکلوهگزان (برای تولید نایلون) استفاده می‌شود. تولوئن نیز برای تولید تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI) که در ساخت فوم‌های پلی‌یورتان کاربرد دارد، استفاده می‌شود. زایلن‌ها، به‌خصوص پارا-زایلن، در تولید پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) برای ساخت بطری‌های پلاستیکی و الیاف پلی‌استر به‌کار می‌رود. به‌طور کلی، آروماتیک‌ها نقش کلیدی در تولید مواد شیمیایی پایه، پلاستیک‌ها، الیاف مصنوعی و مواد افزودنی دارند که همگی از

اجزای اساسی صنایع مختلف مانند خودروسازی، بسته‌بندی، نساجی و ساختمان‌سازی هستند.

۱-۳. بازار جهانی

بازار آروماتیک‌ها در اقتصاد جهانی اهمیت بالایی دارد زیرا این ترکیبات پایه‌های اصلی بسیاری از محصولات صنعتی هستند. تقاضای بالا برای محصولات آروماتیکی مانند بنزن، تولوئن و زایلن‌ها از صنایع خودروسازی، ساخت و ساز، نساجی، بسته‌بندی و الکترونیک نشأت می‌گیرد. در سال‌های اخیر، رشد سریع در صنعت پتروشیمی آسیا، به ویژه در چین و هند، باعث افزایش تولید و مصرف آروماتیک‌ها شده است. همچنین، تقاضای جهانی برای پلاستیک‌های سبک و مقاوم و الیاف مصنوعی نیز به رشد بازار این مواد کمک کرده است.

در سال ۲۰۲۲، بازار جهانی آروماتیک‌ها حدود ۲۰۰ میلیارد دلار ارزش‌گذاری شد و پیش‌بینی می‌شود که با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) حدود ۵ تا ٦ درصد در دهه آینده رشد کند. منطقه آسیا-اقیانوسیه بیشترین سهم از بازار جهانی آروماتیک‌ها را به خود اختصاص داده است، که بیش از ۵۰ درصد از کل مصرف جهانی را شامل می‌شود. همچنین، چین به‌تنهایی بزرگترین تولیدکننده و مصرف‌کننده آروماتیک‌ها است، به دلیل تقاضای زیاد از سوی صنایع داخلی. اروپا و آمریکای شمالی نیز سهم قابل توجهی دارند.

چند کشور عمده در دنیا بیشترین میزان تولید آروماتیک‌ها را دارند که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱. چین: چین بزرگترین تولیدکننده و مصرف‌کننده آروماتیک‌ها در جهان است. رشد سریع صنایع پتروشیمی، تولید پلاستیک و الیاف مصنوعی، و افزایش تقاضای داخلی باعث شده تا چین در این زمینه پیشرو باشد.

۲. آمریکا: ایالات متحده یکی از بزرگترین تولیدکنندگان بنزن، تولوئن و زایلن‌ها در جهان است. با توجه به زیرساخت‌های پیشرفته صنعتی و دسترسی به منابع نفت و گاز شیل، تولید آروماتیک‌ها در آمریکا بسیار قابل توجه است.

۳. کره جنوبی: این کشور نیز یکی از تولیدکنندگان بزرگ آروماتیک‌ها است. صنعت پتروشیمی کره جنوبی به خوبی توسعه یافته و این کشور توانسته است در بازار جهانی نقش مهمی ایفا کند.

٤. ژاپن: ژاپن با داشتن صنایع پیشرفته و بزرگ در زمینه‌های شیمیایی و پتروشیمی، یکی دیگر از تولیدکنندگان عمده آروماتیک‌ها در جهان محسوب می‌شود.

۵. هند: با رشد سریع صنعت پتروشیمی و افزایش تقاضای داخلی، هند به یکی از تولیدکنندگان مهم آروماتیک‌ها تبدیل شده است. برنامه‌های توسعه‌ای دولت هند برای افزایش ظرفیت تولید پتروشیمی نیز به این روند کمک کرده است.

این کشورها با توجه به زیرساخت‌های پیشرفته صنعتی، دسترسی به منابع اولیه و تقاضای داخلی و خارجی قوی، بیشترین سهم را در تولید آروماتیک‌ها در سطح جهانی دارند.

۱-٤. آروماتیک‌ها در ایران

میزان تولید آروماتیک‌ها در صنعت پتروشیمی ایران قابل توجه است و ایران یکی از تولیدکنندگان مهم این محصولات در منطقه به شمار می‌آید. تولید آروماتیک‌ها شامل بنزن، تولوئن، و زایلن‌ها است که از محصولات جانبی پالایش نفت و فرآیندهای پتروشیمی هستند. پتروشیمی بندر امام یکی از بزرگترین تولیدکنندگان آروماتیک‌ها در ایران است و ظرفیت تولید بالایی دارد. تولیدات آن شامل بنزن، تولوئن، و زایلن‌ها می‌شود. پتروشیمی نوری

(بزرگترین تولیدکننده آروماتیک‌ها در جهان) یکی از مهمترین واحدهای تولید آروماتیک‌ها در ایران و جهان است که ظرفیت تولید بالایی دارد. تولیدات این مجتمع شامل ۷۵۰ هزار تن بنزن، ٤٢٠ هزار تن تولوئن و ۱.۳ میلیون تن پارا-زایلن است[۱].

البته ایران در مسیر توسعه آروماتیک‌ها با چالش‌هایی روبرو است؛ مشکلات مربوط به تحریم‌ها تأثیر زیادی بر روی سرمایه‌گذاری و واردات تجهیزات و تکنولوژی‌های جدید داشته است. همچنین تغییرات قیمت نفت خام می‌تواند بر هزینه‌های تولید و درآمدهای حاصل از صادرات محصولات آروماتیک تأثیر بگذارد. اما فرصت‌هایی مانند بازار داخلی و منطقه‌ای (افزایش تقاضا در بازار داخلی و کشورهای منطقه برای محصولات پتروشیمی می‌تواند فرصت‌های خوبی برای توسعه تولید آروماتیک‌ها فراهم کند) و سرمایه‌گذاری در تکنولوژی (استفاده از تکنولوژی‌های جدید و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها منجر شود) پیش روی اقتصاد ایران هستند.

در کل می‌توان گفت که تولید آروماتیک‌ها در ایران از اهمیت بالایی برخوردار است و این کشور توانسته است ظرفیت تولید قابل توجهی در این زمینه ایجاد کند. با این حال، چالش‌های موجود نیازمند راه‌حل‌های جامع و همکاری‌های بین‌المللی برای رفع مشکلات و بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های موجود است.

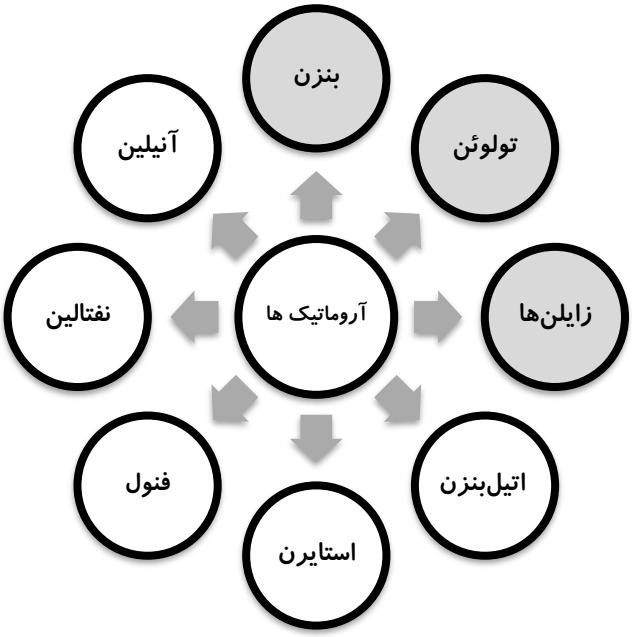
۲. مروری بر انواع آروماتیک‌ها

آروماتیک‌ها گروهی از ترکیبات آلی هستند که دارای ساختار حلقوی با پیوندهای زیگ‌زاگ هستند. این ترکیبات معمولاً بوی خاصی دارند و از نظر شیمیایی، پیوندهای میان هسته‌ای بین ذرات کربن از نوع پیوند مزدوج (pi) هستند. بنزن یکی از ساده‌ترین آروماتیک‌ها است و شکل حلقوی هگزاگونال

دارد، که هر گروه فراکسیونی آلی یا الیل می‌تواند به عنوان گروه جاگذاری در مولکول بنزن حضور داشته باشد. تولوئن و زایلن‌ها نیز مشتقاتی از بنزن هستند که یک یا چند جایگذاری متیل را دارند. اتیل‌بنزن نیز یک مولکول است که یک گروه اتیل به بنزن متصل شده است.

استایرن یک آلکن آروماتیک است که دارای ساختار حلقوی بنزنیل بوده و دارای فرمول شیمیایی C_8H_8 است. فنول یک ترکیب شیمیایی آروماتیک است که دارای یک گروه هیدروکسیل ($-OH$) به عنوان جایگذاری می‌باشد. نفتالین یک ترکیب آلی دو هسته‌ای است که به عنوان یک ماده آروماتیک دارای بوی خاصی می‌باشد. آنیلین یک ترکیب آلی است که دارای یک گروه آمینی ($-NH_2$) به عنوان جایگذاری می‌باشد.

به عنوان یک ترکیب آروماتیک، آنیلین در صنایع شیمیایی به عنوان یک مواد اولیه مهم برای ساخت انواع ترکیبات شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله رنگدانه‌ها، مواد حفاظتی و داروها. استایرن به عنوان یک ماده شیمیایی مهم در صنعت پلاستیک‌سازی و پلیمرسازی استفاده می‌شود، زیرا از آن به عنوان مونومر برای تولید پلی استایرن استفاده می‌شود که یکی از پلاستیک‌های محبوب است. فنول به عنوان یک ترکیب شیمیایی کلیدی در تولید رزین فنولیک، که به عنوان یک نوع چسب و عایق استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نفتالین به عنوان یک ماده آروماتیک، اغلب در تولید قرص‌های بوی بد، محافظت از چوب و دیگر مصارف بهداشتی استفاده می‌شود.



شکل ۱- انواع آروماتیک‌ها

در صنعت پتروشیمی، برخی از آروماتیک‌ها از نظر حجم تولید و اهمیت اقتصادی و صنعتی اهمیت بیشتری دارند. این ترکیبات عبارتند از:

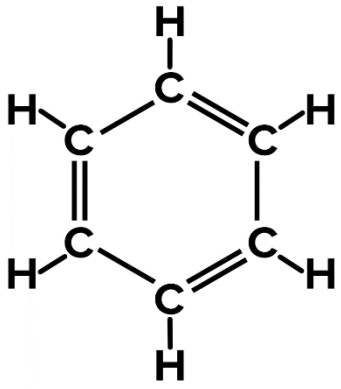
۱. بنزن
۲. تولوئن
۳. زایلن‌ها (به ویژه پارا-زایلن)

این ترکیبات به‌دلیل کاربردهای گسترده در تولید مواد شیمیایی پایه، پلاستیک‌ها، الیاف مصنوعی و محصولات دیگر، از اهمیت بالاتری برخوردارند.

۳. بنزن

۳-۱. ساختار شیمیایی

بنزن یک ترکیب آلی است که به صورت یک حلقه هگزاگونال (شش ضلعی) بسته شده است و دارای فرمول شیمیایی C_6H_6 می‌باشد. ساختار بنزن شامل شش اتم کربن است که به صورت حلقه ای به هم متصل هستند و هر یک از اتم‌های کربن با یک اتم هیدروژن متصل است. بنزن دارای سه پیوند مزدوج (pi) است که به صورت متناوب بین اتم‌های کربن وجود دارد. این ساختار متناوب پیوندهای مزدوج، بنزن را به عنوان یک ترکیب آروماتیک تعریف می‌کند[۲].



شکل ۲- ساختار شیمیایی بنزن

۳-۲. کاربردها

کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف برای بنزن وجود دارند:

۱. مواد شیمیایی و پلیمرها: بنزن به عنوان ماده اولیه در تولید انواع مواد شیمیایی و پلیمرها استفاده می‌شود. برای مثال، از آن می‌توان برای تولید پلی‌استایرن، نایلون، پلی‌استرها و رزین‌های فنولیک استفاده کرد.

۲. حلال و حمل‌ونقل: بنزن به عنوان یک حلال قدرتمند در صنایع مختلف مانند صنایع رنگ‌سازی، پوشش‌دهی، و نساجی استفاده می‌شود. همچنین به عنوان ماده‌ای برای حمل و نقل مواد شیمیایی و نفت استفاده می‌شود.

۳. صنایع الکترونیک و الکتروپلاستیک: بنزن به عنوان ماده اولیه برای تولید مواد شیمیایی در صنایع الکترونیکی، مانند تولید مواد شستشوی الکترونیکی و مدارهای مجتمع (ICs) استفاده می‌شود.

٤. داروسازی: بنزن به عنوان یک ماده اولیه مهم در تولید داروها و مواد شیمیایی دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله موارد استفاده آن می‌توان به تولید آنتی‌بیوتیک‌ها، مواد آرامبخش و داروهای محافظتی اشاره کرد.

۵. کاربردهای مرتبط با انرژی: بنزن در صنایع مرتبط با انرژی نیز مانند حفاظت از چوب و مواد محافظتی برای سایر مواد استفاده می‌شود.

بنابراین، بنزن به عنوان یک ماده شیمیایی چند منظوره و مهم در صنایع مختلف از جمله صنایع شیمیایی، الکترونیک، داروسازی و حمل‌ونقل به کار می‌رود و از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۳-۳. بازار جهانی

بازار جهانی بنزن در سال ۲۰۲۳ حدود ۷۳ میلیارد دلار ارزش داشت و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۸ به حدود ۸۸ میلیارد دلار برسد، با نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) حدود ۳.۹ درصد[۳]. این رشد به دلیل افزایش تقاضا در بخش‌هایی مانند خودروسازی، ساخت و ساز و الکترونیک است چون بنزن در تولید پلاستیک‌ها، الیاف مصنوعی، رزین‌ها و لاستیک‌ها استفاده می‌شود[٤]. بزرگترین صادرکنندگان بنزن عبارت هستند از:

۱. چین: بزرگترین صادرکننده بنزن است و ظرفیت تولید خود را به طور قابل توجهی برای پاسخگویی به تقاضای جهانی افزایش داده است[۵].

۲. کره جنوبی: دیگر صادرکننده بزرگ بنزن است که از صنعت پتروشیمی قوی خود بهره می‌برد[۶].

۳. هند نیز به یکی از بازیکنان مهم در بازار صادرات بنزن تبدیل شده است[۷].

کشورهایی با کمترین صادرات بنزن عبارت هستند از اولا کشورهایی با زیرساخت‌های پتروشیمی محدود، مانند کشورهای کوچکتر یا کمتر صنعتی شده، معمولاً صادرات بنزن کمی دارند ثانیا کشورهایی با مقررات زیست‌محیطی سختگیرانه در مورد تولید و صادرات بنزن به دلیل ویژگی‌های سمی و سرطان‌زای آن، مانند برخی از کشورهای اروپایی، نیز ممکن است صادرات کمتری داشته باشند[۸].

به طور کلی، بازار بنزن تحت تأثیر تقاضا برای مشتقات آن مانند استایرن و اتیل‌بنزن است که به طور گسترده در تولید محصولات مختلف استفاده می‌شوند. با این حال، این بازار با چالش‌هایی مانند خطرات بهداشتی مرتبط با مواجهه با بنزن و نوسانات قیمت نفت خام که هزینه‌های تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهند، مواجه است[۹].

۳-٤. فناوری تولید

در زیر به برخی از روش‌ها و فناوری‌های رایج برای تولید بنزن اشاره می‌شود:

۳-٤-۱. ریفورمینگ کاتالیستی

ریفورمینگ کاتالیستی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پالایش نفت است که برای تولید بنزن و سایر ترکیبات آروماتیک استفاده می‌شود. در این روش، هیدروکربن‌های نفتی با زنجیره‌های طولانی‌تر (نفتا) در حضور کاتالیزورهای فلزی مانند پلاتین یا رنیوم در دماهای بالا (حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشارهای کم (۱۵ تا ۳۰ اتمسفر) تبدیل می‌شوند.

➢ مراحل اصلی ریفورمینگ کاتالیستی:

۱. پیش‌گرمایش: خوراک نفتا ابتدا پیش‌گرم می‌شود تا به دمای عملیاتی مورد نظر برسد.

۲. واکنش ریفورمینگ: خوراک پیش‌گرم شده وارد راکتورهای ریفورمینگ می‌شود که در آنجا تحت تأثیر کاتالیزور قرار می‌گیرد. در این مرحله، هیدروکربن‌های پارافینی به هیدروکربن‌های آروماتیک (مانند بنزن) و اولفین‌ها تبدیل می‌شوند.

۳. جداسازی محصولات: محصولات واکنش شامل هیدروژن، بنزن، تولوئن، زایلن‌ها و گازهای دیگر است که از هم جدا می‌شوند. هیدروژن تولید شده به‌عنوان یک محصول جانبی مهم در فرآیندهای دیگر پالایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی یک واحد ریفورمینگ کاتالیستی می‌تواند به صدها میلیون دلار برسد. این شامل هزینه‌های تجهیزات، نصب، مهندسی و راه‌اندازی است.

۳-٤-۲. کراکینگ حرارتی و کاتالیستی نفتا

کراکینگ حرارتی و کاتالیستی نفتا فرآیندهایی هستند که برای تجزیه هیدروکربن‌های سنگین‌تر به هیدروکربن‌های سبک‌تر، از جمله بنزن، استفاده می‌شوند.

➢ کراکینگ حرارتی:

در این روش، نفتا در دماهای بسیار بالا (بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار پایین (۱ تا ۲ اتمسفر) تحت تجزیه حرارتی قرار می‌گیرد. این فرآیند به شکستن پیوندهای کربن-کربن در هیدروکربن‌های بزرگتر منجر می‌شود و محصولات متنوعی از جمله بنزن، اتیلن، پروپیلن و بوتادین تولید می‌کند.

- کراکینگ کاتالیستی:

در این روش، از کاتالیزورها برای تسریع واکنش‌های تجزیه نفتا استفاده می‌شود. دماهای عملیاتی معمولاً کمتر از کراکینگ حرارتی است (حدود ٤٥٠ تا ٥٥٠ درجه سانتی‌گراد)، اما فشار بالاتر (حدود ۲۰ تا ۳۰ اتمسفر) می‌باشد. این فرآیند منجر به تولید بنزن و سایر ترکیبات آروماتیک به همراه اولفین‌ها می‌شود.

- سرمایه‌گذاری:

۱. هزینه تجهیزات و زیرساخت‌ها: شامل راکتورها، کوره‌ها، برج‌های تقطیر، مبدل‌های حرارتی، و سیستم‌های کنترلی است که هزینه بالایی دارند.

۲. کاتالیست‌ها: برای کراکینگ کاتالیستی، نیاز به کاتالیست‌های پیشرفته است که هزینه‌بر هستند.

۳. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری: هزینه‌های جاری برای حفظ و نگهداری تجهیزات و تامین مواد اولیه.

٤. سرمایه‌گذاری اولیه: بسته به ظرفیت واحد و پیچیدگی فرآیند، سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث یک واحد کراکینگ می‌تولند از صدها میلیون دلار تا چند میلیارد دلار متغیر باشد.

- شرکت‌های پتروشیمی استفاده کننده:

۱. ExxonMobil: یکی از بزرگترین شرکت‌های نفتی و پتروشیمی جهان است که از فرآیندهای کراکینگ در تولید محصولات پتروشیمی استفاده می‌کند.

۲. Royal Dutch Shell: این شرکت نیز در فرآیندهای مختلف کراکینگ برای تولید هیدروکربن‌های سبک‌تر از جمله بنزن فعال است.

۳. Chevron Phillips Chemical: یکی از بزرگترین تولیدکنندگان محصولات پتروشیمی که از فرآیندهای کراکینگ کاتالیستی و حرارتی استفاده می‌کند.

٤. Saudi Aramco: بزرگترین شـــرکت نفتی جهان که در فرآیندهای پتروشیمی و کراکینگ نفتا سرمایه‌گذاری گسترده‌ای دارد.

۵. BASF: یکی از بزرگترین شـــرکت‌های شـــیمیایی جهان که در فرآیندهای پتروشیمی و کراکینگ نفتا فعال است.

٦. SABIC (Saudi Basic Industries Corporation): یکی از بزرگترین شـــرکت‌های پتروشـــیمی جهان که از فرآیندهای کراکینگ برای تولید مواد شیمیایی و پلاستیکی استفاده می‌کند.

۳-٤-۳. آلکیلاسیون و دآلکیلاسیون

آلکیلاســـیون و دآلکیلاســـیون فرآیندهایی هســـتند که برای تبدیل ترکیبات آروماتیک مختلف به بنزن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- دآلکیلاسیون تولوئن:

در این روش، تولوئن (۳CH۵H٦C) در حضـــور هیدروژن و کاتالیزورهای فلزی مانند کروم یا مولیبدن در دماهای بالا (حدود ۵۰۰ تا ٦۰۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار بالا (۲۰ تا ۵۰ اتمسفر) به بنزن (٦H٦C) و متان (٤CH) تجزیه می‌شود. این فرآیند به دلیل نیاز به شرایط عملیاتی سخت و مصرف بالای هیدروژن به‌طور گسترده استفاده نمی‌شود، اما در برخی پالایشگاه‌ها به‌عنوان روش مکمل استفاده می‌شود.

- آلکیلاسیون اتان و پروپان:

در این فرآیند، اتان یا پروپان با اســـتفاده از کاتالیزورهای اســـیدی مانند آلومینوسیلیکات‌ها در دما و فشار مناسب به بنزن و سایر ترکیبات آروماتیک تبدیل می‌شـــوند. این فرآیند بیشـــتر برای تولید ســـوخت‌های با ارزش بالا استفاده می‌شود.

۳-٤-٤. پیرولیز اتان و پروپان

پیرولیز اتان و پروپان یکی از روش‌های متداول تولید اولفین‌ها (مانند اتیلن و پروپیلن) و همچنین بنزن به‌عنوان یک محصول جانبی است.

- مراحل اصلی پیرولیز:

۱. پیش‌گرمایش: اتان یا پروپان به دمای عملیاتی مورد نظر (بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) پیش‌گرم می‌شوند.

۲. واکنش پیرولیز: خوراک پیش‌گرم شده وارد راکتورهای پیرولیز می‌شود که در آنجا تحت تأثیر حرارت و بدون حضور کاتالیزور به محصولات مختلف تجزیه می‌شود. این فرآیند به شکستن پیوندهای C-H و C-C در هیدروکربن‌های بزرگتر منجر می‌شود.

۳. جداسازی محصولات: محصولات واکنش شامل بنزن، اتیلن، پروپیلن، بوتادین و سایر گازهاست که از هم جدا می‌شوند.

۳-٤-٥. اکسیداسیون مستقیم

اکسیداسیون مستقیم یک روش کمتر رایج ولی موثر برای تولید بنزن از هیدروکربن‌های غیراشباع مانند پروپیلن و بوتیلن‌ها است.

- مراحل اصلی اکسیداسیون مستقیم:

۱. خوراک هیدروکربن: هیدروکربن‌های غیراشباع (مانند پروپیلن یا بوتیلن‌ها) به عنوان خوراک استفاده می‌شوند.

۲. اکسیداسیون: خوراک هیدروکربنی در حضور کاتالیزورهای فلزی مانند مولیبدن یا وانادیوم و اکسیژن به بنزن و دیگر ترکیبات آروماتیک اکسید می‌شود. دما و فشار عملیاتی بستگی به نوع کاتالیزور و خوراک دارد.

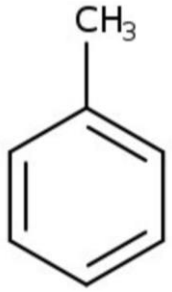
۳. جداسازی محصولات: محصولات واکنش شامل بنزن، تولوئن، زایلن‌ها و دیگر ترکیبات آروماتیک است که از هم جدا می‌شوند.

این روش‌ها هر یک به نوبه خود دارای مزایا و محدودیت‌های خاصی هستند و بسته به شرایط مختلف، ممکن است یکی از آن‌ها برای تولید بنزن بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. با پیشرفت فناوری، روش‌های بهینه‌تر و کارآمدتری برای تولید بنزن در آینده ممکن است توسعه یابد.

٤. تولوئن

٤-١. ساختار شیمیایی

تولوئن (Toluene) یک ترکیب آلی با فرمول شیمیایی C_7H_8 است که به عنوان یک آروماتیک ساده شناخته می‌شود. ساختار شیمیایی تولوئن شامل یک حلقه بنزن (C_6H_6) است که یک گروه متیل (CH_3) به یکی از کربن‌های آن متصل شده است. این ترکیب به طور رسمی با نام متیل‌بنزن نیز شناخته می‌شود. حلقه بنزن به دلیل داشتن ساختار پیوند دوگانه جابه‌جا شونده، دارای پایداری و ویژگی‌های خاصی است که منجر به آروماتیک بودن این ترکیب می‌شود. تولوئن به دلیل داشتن گروه متیل، از بنزن متمایز می‌شود و این گروه متیل بر روی خواص فیزیکی و شیمیایی تولوئن تأثیر می‌گذارد.



شکل ۳- ساختار شیمیایی تولوئن

تولوئن به عنوان یک حلال قوی در صـــنایع مختلف مورد اســـتفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب در ساختار پلیمرها، رنگ‌ها، پوشش‌ها، و چسب‌ها نقش اساسی دارد. همچنین، تولوئن در تولید مواد شیمیایی دیگری مانند بنزوئیک اسید، بنزیل کلراید، و تولوئن دی‌ایزوسیانات به کار می‌رود. ساختار شیمیایی تولوئن باعث می‌شود که این ترکیب دارای خواص فیزیکی و شیمیایی خاصی باشد که آن را از بنزن متمایز می‌کند. به عنوان مثال، نقطه جوش تولوئن حدود ۱۱۰.٦ درجه ســـانتی‌گراد اســـت که بالاتر از نقطه جوش بنزن (۸۰.۱ درجه سانتی‌گراد) است. این افزایش در نقطه جوش به دلیل وجود گروه متیل است که بر روی پایداری و برهم‌کنش‌های مولکولی تأثیر می‌گذارد.

٤-۲. کاربردها

تولوئن یکی از مواد شیمیایی مهم در صنعت پتروشیمی است که به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شـــیمیایی خاص خود، کاربردهای گســـترده‌ای دارد. برخی از کاربردهای مهم تولوئن در صنعت پتروشیمی عبارتند از:

۱. تولید بنزن و زایلن: تولوئن به عنوان یک ماده اولیه مهم در تولید بنزن و زایلن‌ها استفاده می‌شود. این فرآیند از طریق دی‌آلکیلاسیون تولوئن به دســـت می‌آید. بنزن و زایلن‌ها به نوبه خود در تولید پلاســـتیک‌ها، الیاف مصنوعی، و مواد شیمیایی دیگر کاربرد دارند.

۲. حلال: تولوئن به عنوان یک حلال قوی در صـــنایع مختلف اســـتفاده می‌شود. این ماده به خوبی روغن‌ها، رزین‌ها، لاستیک‌ها، و مواد دیگر را حل می‌کند. به همین دلیل، تولوئن در تولید رنگ‌ها، پوشـــش‌ها، لاک‌ها، جوهرها، و چســـب‌ها به کار می‌رود. ویژگی‌های حلالی قوی تولوئن آن را به یک انتخاب مناسب برای استفاده در فرمولاسیون‌های صنعتی تبدیل کرده است.

۳. تولید مواد شـــیمیایی دیگر: تولوئن به عنوان یک ماده اولیه در تولید مواد شـــیمیایی مهمی ماننـد بنزوئیک اســـیـد، بنزیـل کلرایـد، و تولوئن

دی‌ایزوسیانات استفاده می‌شود. این مواد شیمیایی به نوبه خود در تولید پلاستیک‌ها، رزین‌ها، و مواد افزودنی صنعتی کاربرد دارند. به عنوان مثال، تولوئن دی‌ایزوسیانات در تولید پلی‌یورتان‌ها که در ساخت فوم‌های انعطاف‌پذیر و سخت استفاده می‌شود، نقش اساسی دارد.

٤. افزودنی‌های سوخت: تولوئن به عنوان یک افزودنی سوخت در بنزین‌های با اکتان بالا به کار می‌رود. این ماده باعث افزایش عدد اکتان سوخت می‌شود و عملکرد موتورهای احتراق داخلی را بهبود می‌بخشد. به همین دلیل، تولوئن در تولید بنزین‌های مسابقه‌ای و سوخت‌های هواپیما نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵. صنعت داروسازی و لوازم آرایشی: تولوئن در تولید برخی از مواد دارویی و لوازم آرایشی نیز کاربرد دارد. این ماده به عنوان یک حلال در تهیه برخی از داروها و ترکیبات فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، در فرمولاسیون برخی از محصولات آرایشی و بهداشتی نیز از تولوئن استفاده می‌شود.

به طور کلی، تولوئن به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خاص خود، یک ماده بسیار مهم و پرکاربرد در صنعت پتروشیمی و صنایع وابسته به آن محسوب می‌شود.

٤-۳. حجم بازار

حجم بازار جهانی تولوئن در صنعت پتروشیمی در سال ۲۰۲۳ حدود ۲۸.۳۷ میلیارد دلار بوده و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۲ به ٤۵.۱۲ میلیارد دلار برسد، با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) حدود ۵.۳٪[۱۰]. بیشترین صادرات تولوئن به کشورهای زیر تعلق دارد:

۱. چین: بزرگترین تولیدکننده و مصرف‌کننده تولوئن به دلیل صنعت شیمیایی گسترده و بخش تولیدی بزرگ.

۲. هند: به دلیل رشد سریع اقتصادی و توسعه صنعت پتروشیمی.

۳. ایالات متحده: تولید و مصرف بالای تولوئن به دلیل زیرساخت‌های پتروشیمی پیشرفته و صنعت خودروسازی بزرگ[۱۱].

در کل، منطقه آسیا اقیانوسیه بیشترین سهم بازار تولوئن را در اختیار دارد و انتظار می‌رود که این روند همچنان ادامه یابد. رشد سریع صنعتی و تقاضای بالا برای محصولات پتروشیمی در کشورهایی مانند چین و هند از عوامل کلیدی این رشد هستند[۱۲].

٤-٤. روش تولید

تولوئن به عنوان یکی از مواد پایه در صنعت پتروشیمی از چندین روش مختلف تولید می‌شود. این روش‌ها شامل استخراج از منابع طبیعی و تولید از طریق فرآیندهای شیمیایی می‌شوند. برخی از روش‌های تولید تولوئن عبارتند از:

٤-٤-١. استخراج از نفت خام و گاز طبیعی

تولوئن به طور طبیعی در نفت خام و گاز طبیعی وجود دارد. فرآیند تقطیر نفت خام می‌تواند منجر به جداسازی تولوئن به عنوان یک محصول جانبی شود. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

– تقطیر جز به جز: نفت خام به طور مرحله‌ای تقطیر می‌شود تا اجزای مختلف آن، از جمله تولوئن، جدا شوند.

– تقطیر کاتالیزوری: در این فرآیند از کاتالیزورها برای شکستن مولکول‌های بزرگ‌تر و تولید آروماتیک‌ها مانند تولوئن استفاده می‌شود.

٤-٤-٢. فرآیند ریفرمینگ کاتالیستی

ریفرمینگ کاتالیستی یکی از روش‌های اصلی تولید تولوئن است. در این فرآیند، نفتا (یک جزء سبک نفت خام) تحت تأثیر کاتالیزورهای خاص و

دماهای بالا (۵۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) قرار می‌گیرد تا هیدروکربن‌های آروماتیک تولید شوند. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

- دهیدروژناسیون: هیدروکربن‌های سیکلوآلکان به آروماتیک‌ها تبدیل می‌شوند.
- ایزومریزاسیون: ساختارهای مختلف هیدروکربنی به همدیگر تبدیل می‌شوند تا تولوئن تولید شود.
- دهیدروایزوپنتانیزاسیون: در این مرحله، آلکان‌های شاخه‌ای به هیدروکربن‌های آروماتیک تبدیل می‌شوند.

٤-٤-٣. فرآیند الکیلاسیون

در این فرآیند، بنزن با متانول یا دیگر مواد دارای گروه متیل در حضور کاتالیزورهای خاص واکنش می‌دهد تا تولوئن تولید شود. این واکنش به عنوان فرآیند آلکیلاسیون شناخته می‌شود:

- آلکیلاسیون بنزن: بنزن با متانول یا دی‌متیل اتر در حضور کاتالیزورهای مانند زئولیت واکنش می‌دهد.

٤-٤-٤. تولید از زغال سنگ

در این روش، زغال سنگ تحت فشار و دماهای بالا به گاز تبدیل می‌شود (گازسازی) و سپس گاز سنتز (مخلوطی از هیدروژن و منوکسید کربن) به هیدروکربن‌های آروماتیک مانند تولوئن تبدیل می‌شود. این فرآیند به نام فرآیند فیشر-تروپش شناخته می‌شود:

- گازسازی زغال سنگ: زغال سنگ به گاز سنتز تبدیل می‌شود.
- سنتز هیدروکربن‌ها: گاز سنتز به هیدروکربن‌های آروماتیک تبدیل می‌شود.

٤-٥. فناوری‌ها و تکنولوژی‌ها

– کاتالیزورهای پیشـــرفته: اســـتفاده از کاتالیزورهای کارآمد و پایدار برای افزایش بازده تولید و کاهش هزینه‌ها و آلودگی محیط‌زیست.

– فرآیندهای اصلاح‌شده: بهبود فرآیندهای موجود برای افزایش تولید و کارایی. این شـامل بهینه‌سـازی شـرایط واکنش مانند دما، فشـار، و زمان تماس می‌شود.

– تکنولوژی‌های پاک: اســـتفاده از فناوری‌های پاک و ســـبز برای کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید تولوئن، مانند بازیافت حرارت و کاهش مصرف انرژی.

– توسعه و بهبود این فرآیندها و فناوری‌ها به تولید کارآمدتر و پایدارتر تولوئن کمک می‌کند و نقش مهمی در صنعت پتروشیمی ایفا می‌کند.

۵. زایلن‌ها

۵-۱. ساختار شیمیایی

زایلن‌ها (Xylenes) گروهی از هیدروکربن‌های آروماتیک هســـتند که ســـه ایزومر[۱۳] مختلف دارنـد: اورتو–زایلن (o-xylene)، متـا–زایلن (m-xylene)، و پارا–زایلن (p-xylene). هر یک از این ایزومرها دارای یک حلقه بنزن با دو گروه متیل (–CH_3) متصـل به حلقه در موقعیت‌های مختلف هسـتند. فرمول شیمیایی کلی زایلن‌ها C_8H_{10} است.

۵-۱-۱. اورتو–زایلن (o-Xylene)

اورتو–زایلن دارای دو گروه متیل اسـت که به صـورت مجاور به یکدیگر در موقعیت‌های ۱ و ۲ روی حلقه بنزن متصـــل شـــده‌لند. این ترکیب به دلیل نزدیکی گروه‌های متیل دارای ویژگی‌های خاصـی اسـت. اورتو–زایلن عمدتاً

به عنوان یک ماده اولیه در تولید فتالیک انیدرید استفاده می‌شود که به نوبه خود در تولید پلاستیک‌ها و رزین‌ها کاربرد دارد.

۵-۱-۲. متا-زایلن (m-Xylene)

در متا-زایلن، گروه‌های متیل در موقعیت‌های ۱ و ۳ روی حلقه بنزن قرار دارند. این ایزومر به دلیل فاصله بیشتر بین گروه‌های متیل، دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به اورتو-زایلن و پارا-زایلن است. متا-زایلن در تولید ایزوفتالیک اسید به کار می‌رود که در ساخت پلی‌استرها و رزین‌های مقاوم به حرارت استفاده می‌شود.

۵-۱-۳. پارا-زایلن (p-Xylene)

پارا-زایلن دارای دو گروه متیل است که در موقعیت‌های ۱ و ٤ روی حلقه بنزن قرار دارند. این ایزومر به دلیل تقارن بیشتر، از سایر ایزومرها متمایز است. پارا-زایلن به عنوان ماده اولیه اصلی در تولید ترفتالات پلی‌اتیلن (PET) استفاده می‌شود که در تولید بطری‌های پلاستیکی و الیاف مصنوعی کاربرد دارد.

۵-۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زایلن‌ها

هر یک از این ایزومرها دارای نقطه جوش و خواص حلالی متفاوتی هستند. به عنوان مثال، نقطه جوش اورتو-زایلن حدود ١٤٤.٤ درجه سانتی‌گراد، متا-زایلن حدود ۱۳۹.۱ درجه سانتی‌گراد و پارا-زایلن حدود ۱۳۸.٤ درجه سانتی‌گراد است. زایلن‌ها به دلیل داشتن حلقه بنزن و گروه‌های متیل، دارای خواص حلالی قوی هستند و در صنایع مختلف به عنوان حلال‌های صنعتی استفاده می‌شوند.

۵-۳. کاربردهای زایلن‌ها

زایلن‌ها در صنایع مختلف کاربرد دارند. علاوه بر استفاده به عنوان حلال، زایلن‌ها در تولید مواد شیمیایی مهمی مانند فتالیک انیدرید، ایزوفتالیک اسید، و ترفتالات پلی‌اتیلن (PET) به کار می‌روند. این مواد شیمیایی به نوبه خود در تولید پلاستیک‌ها، رزین‌ها، الیاف مصنوعی، و مواد دارویی استفاده می‌شوند. زایلن‌ها همچنین در تولید سوخت‌های هواپیما و به عنوان افزودنی‌های سوخت برای افزایش عدد اکتان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه به توضیح کامل کاربردهای زایلن‌ها در صنعت پتروشیمی می‌پردازیم:

۵-۳-۱. تولید ترفتالات پلی‌اتیلن (PET)

پارا-زایلن مهم‌ترین ماده اولیه در تولید ترفتالات پلی‌اتیلن (PET) است. PET یک پلیمر ترموپلاستیک است که در تولید بطری‌های نوشیدنی، بسته‌بندی مواد غذایی، الیاف مصنوعی برای لباس و فرش و فیلم‌های پلاستیکی استفاده می‌شود. مراحل اصلی تولید PET از پارا-زایلن به شرح زیر است:

- اکسیداسیون: پارا-زایلن به ترفتالیک اسید (PTA) اکسید می‌شود.
- پلیمرسازی: PTA با اتیلن گلیکول واکنش می‌دهد تا PET تشکیل شود.

۵-۳-۲. تولید ایزوفتالیک اسید

متا-زایلن به عنوان ماده اولیه در تولید ایزوفتالیک اسید استفاده می‌شود. ایزوفتالیک اسید در تولید رزین‌های پلی‌استر غیر اشباع، پلاستیک‌های مقاوم به حرارت، و رنگ‌ها و پوشش‌های صنعتی کاربرد دارد. این ماده به بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی محصولات کمک می‌کند.

۵-۳-۳. تولید فتالیک انیدرید

اورتو-زایلن به عنوان ماده اولیه در تولید فتالیک انیدرید استفاده می‌شود. فتالیک انیدرید یک ماده شیمیایی واسطه مهم است که در تولید

پلاستی‌سایزرها (نرم‌کننده‌ها)، رزین‌های آلکید، و رنگ‌ها و پوشش‌های صنعتی به کار می‌رود. پلاستی‌سایزرها در تولید PVC و محصولات پلاستیکی نرم استفاده می‌شوند.

۵-۳-٤. حلال‌های صنعتی

زایلن‌ها به عنوان حلال‌های صنعتی قوی در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. به دلیل توانایی حل کردن بسیاری از رزین‌ها، چسب‌ها، روغن‌ها و لاک‌ها، زایلن‌ها در تولید رنگ‌ها، جوهرها، پوشش‌ها، و چسب‌ها بسیار پرکاربرد هستند. همچنین، زایلن‌ها به عنوان حلال در صنایع داروسازی و محصولات آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شوند.

۵-۳-۵. افزودنی‌های سوخت

زایلن‌ها به عنوان افزودنی‌های سوخت برای بهبود عدد اکتان بنزین مورد استفاده قرار می‌گیرند. عدد اکتان بالاتر به بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی کمک می‌کند و از پدیده ناک (Knock) در موتور جلوگیری می‌کند. به همین دلیل، زایلن‌ها در تولید سوخت‌های با اکتان بالا و سوخت‌های هواپیما به کار می‌روند.

۵-۳-٦. تولید مواد شیمیایی واسطه

زایلن‌ها به عنوان مواد اولیه در تولید مواد شیمیایی واسطه دیگر استفاده می‌شوند. این مواد شیمیایی به نوبه خود در تولید انواع پلیمرها، رزین‌ها، و مواد شیمیایی خاص به کار می‌روند. به عنوان مثال، از زایلن‌ها در تولید بنزن، تولوئن، و دیگر آروماتیک‌ها استفاده می‌شود.

۵-۳-۷. صنایع پلاستیک و لاستیک

زایلن‌ها در تولید پلاستیک‌ها و لاستیک‌های صنعتی استفاده می‌شوند. این ترکیبات به عنوان حلال‌ها و مواد شیمیایی واسطه در فرآیندهای تولیدی مختلف نقش دارند و به بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی محصولات نهایی کمک می‌کنند.

۵-۳-۸. صنایع رنگ و پوشش

زایلن‌ها به دلیل خواص حلالی قوی خود، در تولید رنگ‌ها و پوشش‌های صنعتی استفاده می‌شوند. این ترکیبات به بهبود پخش‌پذیری رنگ و پوشش بر روی سطوح مختلف کمک می‌کنند و باعث افزایش کیفیت و دوام محصولات می‌شوند.

۵-۳-۹. صنایع دارویی و بهداشتی

زایلن‌ها در تولید برخی از مواد دارویی و محصولات بهداشتی و آرایشی استفاده می‌شوند. این ترکیبات به عنوان حلال‌ها در فرآیند تولید و همچنین به عنوان مواد واسطه در سنتز ترکیبات دارویی خاص نقش دارند.

زایلن‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود، نقش حیاتی در صنایع پتروشیمی و وابسته به آن دارند. این ترکیبات به عنوان مواد اولیه در تولید پلیمرها، رزین‌ها، و مواد شیمیایی واسطه استفاده می‌شوند و به بهبود کیفیت و عملکرد محصولات مختلف کمک می‌کنند. همچنین، کاربردهای گسترده زایلن‌ها به عنوان حلال‌های صنعتی و افزودنی‌های سوخت، اهمیت آن‌ها را در فرآیندهای تولیدی و صنعتی مختلف برجسته می‌کند.

۵-٤. حجم بازار

حجم بازار جهانی زایلن‌ها در صنعت پتروشیمی در سال ۲۰۲۲ حدود ۲۸.۲ میلیارد دلار بوده و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ به ۵۲.۳ میلیارد دلار

برسد. رشد سالانه مرکب (CAGR) این بازار بین سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۰ حدود ۸.۱ درصد تخمین زده شده است[۱۴]. آسیا–اقیانوسیه بیشترین سهم بازار زایلن‌ها را به خود اختصاص داده و همچنین بیشترین رشد را نیز در این منطقه پیش‌بینی می‌شود. این منطقه به خاطر داشتن تولیدکنندگان بزرگ پتروشیمی مانند چین و عربستان سعودی، به عنوان قطب اصلی تولید زایلن شناخته می‌شود[۱۵].

در زمینه صادرات، چین و عربستان سعودی از بزرگترین صادرکنندگان زایلن در جهان هستند. این کشورها با بهره‌برداری از زیرساخت‌های پیشرفته و شبکه‌های لجستیکی موثر، قادر به تولید و صادرات حجم زیادی از زایلن می‌باشند. از سوی دیگر، کشورهای با تولید کمتر مانند کشورهای اروپایی کوچک و برخی کشورهای آفریقایی کمترین میزان صادرات زایلن را دارند[۱۶].

۵-۵. روش تولید

در تولید زایلن‌ها، معمولاً مخلوطی از هر سه ایزومر به دست می‌آید. برای جداسازی و خالص‌سازی هر یک از ایزومرها، از فرآیندهای تقطیر و کریستال‌سازی استفاده می‌شود. جداسازی ایزومرها به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و فرآیندهای جداسازی پیچیده‌ای را می‌طلبد. در جدول زیر مهم‌ترین روش‌های تولید زایلن‌ها بیان شده است:

جدول ۱- روش‌های تولید زایلن‌ها

روش‌های تولید زایلن‌ها	ریفورمینگ کاتالیستی[۱۷]	پیرولیز بخار[۱۸]	استخراج و تفکیک[۱۹]
تکنولوژی مورد استفاده	کاتالیزورهای پلاتینی اصلاح‌شده	کوره‌های پیرولیز با دمای بالا و کاتالیزورهای کروم، نیکل	تقطیر آزئوتروپیک، جذب انتخابی با زئولیت‌ها
کشورهای تولیدکننده تکنولوژی	ایالات متحده آمریکا (شرکت UOP)، ژاپن (شرکت تویوتا تسوشو)	آمریکا (ExxonMobil)، آلمان (BASF)، فرانسه (TotalEnergies)	آمریکا (Honeywell UOP)، ژاپن (Mitsubishi Chemical)
میزان سرمایه‌گذاری	برای یک واحد ریفورمینگ کاتالیستی بزرگ، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌تواند بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلیون دلار باشد.	هزینه سرمایه‌گذاری برای یک واحد پیرولیز بخار بزرگ ممکن است بین ۱ تا ۳ میلیارد دلار باشد.	هزینه سرمایه‌گذاری برای واحدهای استخراج و تفکیک بستگی به ظرفیت تولید دارد و می‌تواند بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلیون دلار باشد.

٦. جدیدترین پروژه‌ها

در اینجا برخی از جدیدترین پروژه‌های تولید آروماتیک‌ها در جهان آورده شده‌اند:

۱. مالزی: گروه ChemOne در حال توسعه مجتمع انرژی Pengerang (PEC) در جوهور با سرمایه‌گذاری ۳.٤ میلیارد دلار است. این تأسیسات یکی از بزرگ‌ترین و رقابتی‌ترین واحدهای جداسازی کندنسات و آروماتیک‌ها در جهان خواهد بود و انتظار می‌رود در اوج ظرفیت تولید سالانه ۵ میلیارد دلار صادرات داشته باشد[۲۰].

۲. چین: شرکت CNOOC Huizhou Petrochemical در حال گسترش مجتمع پتروشیمی خود در خلیج دایا است و ظرفیت تولید آروماتیک‌های با خلوص بالا را به ۳ میلیون تن در سال افزایش می‌دهد. این پروژه با استفاده از فناوری ParamaX® شرکت Axens برای تولید پارا-زایلین و سایر ترکیبات آروماتیک انجام می‌شود[۲۱].

۳. رومانی: شرکت OMV Petrom در حال سرمایه‌گذاری حدود ۱۳۰ میلیون یورو در پالایشگاه پتروبرازی برای ساخت یک واحد جدید آروماتیک است. این تأسیسات جدید ظرفیت تولید محصولات آروماتیک را تا سال ۲۰۲٦ به حدود ۱۰۰,۰۰۰ تن در سال افزایش خواهد داد[۲۲].

٤. عربستان سعودی و چین: شرکت سعودی آرامکو و شرکت پتروشیمی Rongsheng چین در حال بررسی ایجاد یک سرمایه‌گذاری مشترک هستند که شامل سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه در بخش‌های پتروشیمی هر دو کشور می‌شود. این همکاری شامل توسعه یک پروژه تبدیل مایعات به مواد شیمیایی در شرکت پالایشگاهی سعودی آرامکو جبیل (SASREF) و سرمایه‌گذاری در شرکت Ningbo Zhongjin Petrochemical (ZJPC) متعلق به Rongsheng است که یک مجتمع تولید آروماتیک‌ها را اداره می‌کند[۲۳].

این پروژه‌ها نشـــان‌دهنده ســـرمایه‌گذاری‌های بزرگ و توســـعه‌های استراتژیک در تولید جهانی آروماتیک‌ها هستند که به منظور افزایش ظرفیت و پاسخگویی به تقاضای رو به رشد در صنعت پتروشیمی انجام می‌شوند. در ایران نیز پروژه‌های متعددی در زمینه تولید آروماتیک‌ها کلید خورده‌اند. برخی از جدیدترین این پروژه‌ها عبارتند از:

۱. پتروشـــیمی نوری: این پتروشـــیمی یکی از بزرگترین تولیدکنندگان آروماتیک در ایران اســـت و ظرفیت تولید ۷۵۰ هزار تن پارازایلین و ٤۳۰ هزار تن بنزن را داراست. پتروشیمی نوری نقش مهمی در تولید محصولات آروماتیک در کشور ایفا می‌کند.

۲. پتروشیمی بوعلی سینا: با ظرفیت تولید ٦۱۰ هزار تن آروماتیک، این پتروشـیمی به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان بزرگ آروماتیک در ایران شـناخته می‌شود. این شرکت در حال گسترش ظرفیت تولید خود است تا به تقاضای رو به افزایش بازار پاسخ دهد.

۳. پتروشـــیمی بندر امام: این مجتمع پتروشـــیمی با ظرفیت تولید ۳۷۰ هزار تن آروماتیک در ســـال، به تولید محصـــولات متنوعی از جمله بنزن، تولوئن و زایلن‌ها می‌پردازد. این شرکت نیز به‌تازگی پروژه‌هایی برای افزایش ظرفیت تولید خود آغاز کرده است.

٤. پتروشـــیمی اصـــفهان: این شـــرکت با ظرفیت تولید ۲۰۰ هزار تن آروماتیک در سال، یکی از واحدهای کلیدی تولید آروماتیک در ایران است. پروژه‌های توسعه‌ای جدیدی در این شرکت در حال انجام است.

این پروژه‌ها نشان‌دهنده تعهد ایران به افزایش ظرفیت تولید آروماتیک‌ها و توسعه زیرساخت‌های پتروشیمی در کشور هستند.

۷. فرآیند تبدیل متانول به آروماتیک (MTA)

یکی از پروژه‌های مهم دیگر، فرآیند تبدیل متانول به آروماتیک (MTA) است که ایران از منابع فراوان گاز طبیعی برای این فرآیند بهره می‌برد. این فرآیند به تازگی توجه بیشتری در ایران به خود جلب کرده و واحدهای جدیدی در دست برنامه‌ریزی و احداث هستند[۲٤]. فرایند تبدیل متانول به آروماتیک‌ها (Methanol to Aromatics یا MTA) یک فناوری شیمیایی است که در آن متانول به ترکیبات آروماتیک مانند بنزن، تولوئن و زایلن (BTX) تبدیل می‌شود. این فرایند از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا آروماتیک‌ها مواد اولیه مهمی در صنایع شیمیایی و پتروشیمی هستند.

۷-۱. مراحل اصلی فرایند MTA

- تولید متانول

متانول از گاز سنتز (syngas) که خود از گاز طبیعی یا زغال‌سنگ تولید می‌شود، به‌دست می‌آید. گاز سنتز عمدتاً شامل مونوکسید کربن (CO) و هیدروژن (۲H) است.

- تبدیل متانول به دی‌متیل اتر (DME)

متانول ابتدا به دی‌متیل اتر تبدیل می‌شود. این واکنش توسط یک کاتالیست اسیدی مانند آلومینوم فسفات یا زئولیت‌ها انجام می‌شود.

- تبدیل دی‌متیل اتر به هیدروکربن‌های سبک

DME سپس به هیدروکربن‌های سبک مانند اتن و پروپن تبدیل می‌شود. این واکنش نیز به کمک کاتالیست‌های زئولیتی انجام می‌شود.

- تبدیل هیدروکربن‌های سبک به آروماتیک‌ها

هیدروکربن‌های سبک در حضور کاتالیست‌های زئولیتی خاصی به آروماتیک‌ها تبدیل می‌شوند. در این مرحله ترکیبات آروماتیک مانند بنزن، تولوئن و زایلن تولید می‌شوند.

۷-۲. فناوری‌های مورد استفاده در فرایند MTA

- کاتالیست‌های زئولیتی

زئولیت‌ها نقش بسیار مهمی در فرایند MTA دارند. زئولیت‌های مختلفی مانند ZSM-۵ به‌عنوان کاتالیست استفاده می‌شوند که دارای خواص اسیدی و ساختار بلوری خاصی هستند که واکنش‌های مورد نیاز را تسهیل می‌کنند.

- راکتورهای بستر ثابت (Fixed-Bed Reactors)

این نوع راکتورها برای انجام واکنش‌های کاتالیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. متانول یا DME از بستر ثابت حاوی کاتالیست عبور می‌کند و به ترکیبات آروماتیک تبدیل می‌شود.

- راکتورهای بستر سیال (Fluidized-Bed Reactors)

در برخی از موارد، از راکتورهای بستر سیال برای افزایش کارایی واکنش و توزیع بهتر حرارت استفاده می‌شود.

۷-۳. مزایا و چالش‌های فرایند MTA

- مزایا

– تولید آروماتیک‌های با ارزش از متانول که می‌تولند از منابع متنوعی مانند گاز طبیعی و زغال‌سنگ به‌دست آید.

– استفاده از کاتالیست‌های کارآمد که نرخ تبدیل بالا و گزینش‌پذیری خوبی دارند.

➢ چالش‌ها

– مدیریت حرارت در طول فرایند که ممکن است به تجهیزات پیچیده‌تر نیاز داشته باشد.

– کنترل کاتالیست‌ها و جلوگیری از کاهش کارایی آن‌ها در طول زمان.

با توجه به تقاضای رو به رشد برای آروماتیک‌ها در صنایع مختلف، فرایند MTA یکی از فناوری‌های نوین و مهم در صنعت پتروشیمی به‌شمار می‌رود.

۷-٤. سرمایه‌گذاری مورد نیاز

فرایند تبدیل متانول به آروماتیک‌ها (MTA) به سرمایه‌گذاری قابل توجهی نیاز دارد. هزینه‌های کل سرمایه‌گذاری شامل تجهیزات، کاتالیست‌ها و زیرساخت‌های مربوطه است. به‌طور کلی، هزینه سرمایه‌گذاری برای پروژه‌های MTA در حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلیون دلار برای یک واحد تولید با ظرفیت متوسط تخمین زده می‌شود. این هزینه‌ها بسته به محل اجرای پروژه، مقیاس تولید و تکنولوژی‌های استفاده شده ممکن است متفاوت باشد.

از نظر اقتصادی، فرایند MTA می‌تواند جذاب باشد به‌ویژه در مناطقی که متانول با هزینه کم تولید می‌شود، مانند چین و خاورمیانه. این فرایند به‌دلیل استفاده از منابع غیرفسیلی مانند گاز طبیعی و زغال‌سنگ، در مقایسه با روش‌های سنتی تولید آروماتیک‌ها از نفت خام، مزیت دارد[۲۵].

یادداشت‌ها

1 https://www.reportsanddata.com/report-detail/xylene-market

2 Organic Chemistry, ۸th Edition, Paula Yurkanis Bruice

3 https://www.researchandmarkets.com/reports/۵۱۱۷۵۹۷/global-benzene-market-۲۰۲٤-۲۰۲۸

4 https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-benzene-market

5 https://www.researchandmarkets.com/reports/۵۱۱۷۵۹۷/global-benzene-market-۲۰۲٤-۲۰۲۸

6 https://www.researchandmarkets.com/reports/۵۱۱۷۵۹۷/global-benzene-market-۲۰۲٤-۲۰۲۸

7 https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-benzene-market

8 https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-benzene-market

9 https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/benzene-market
https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-benzene-market

10 https://www.expertmarketresearch.com/reports/toluene-market
https://www.imarcgroup.com/toluene-technical-material-market-report

11 https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/global-toluene-market
https://www.imarcgroup.com/toluene-technical-material-market-report

12 https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/toluene-market-report

۱۳ ایزومرها ترکیبات شیمیایی هستند که فرمول مولکولی یکسانی دارند اما ساختارهای متفاوتی را نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها می‌توانند در نحوه اتصال اتم‌ها (ایزومرهای ساختاری) یا در ترتیب فضایی اتم‌ها (ایزومرهای فضایی) باشد. به عبارت دیگر، ایزومرها ترکیباتی با ترکیب اتمی مشابه ولی ترتیب و شکل متفاوت هستند. انواع ایزومرها عبارت هستند از: (الف) ایزومرهای ساختاری (Structural Isomers): ایزومرهای ساختاری یا ایزومرهای پیوندی ترکیباتی هستند که فرمول مولکولی یکسانی دارند اما در نحوه اتصال اتم‌ها به یکدیگر تفاوت دارند. (ب) ایزومرهای فضایی (Stereoisomers): ایزومرهای فضایی ترکیباتی هستند که فرمول مولکولی و ترتیب اتصال اتم‌هایشان یکسان است، اما تفاوت در چیدمان فضایی اتم‌ها دارند. این نوع ایزومری نیز شامل چندین زیرشاخه است:

14 https://www.kbvresearch.com/xylene-market
https://www.reportsanddata.com/report-detail/xylene-market

15 https://www.marketresearchfuture.com/reports/xylene-market-۱۰۰۱

https://www.precedenceresearch.com/xylene-market

16 https://www.marketresearchfuture.com/reports/xylene-market-۱۰۰۱

https://www.kbvresearch.com/xylene-market/

17 Catalytic Reforming

18 Steam Cracking

19 Extraction and Separation

20 https://www.worldconstructionnetwork.com/news/chemone-to-build-۳٤bn-aromatics-plant-in-malaysia

21 https://www.hydrocarbonengineering.com/petrochemicals/۰۵۰۵۲۰۲۰/axens-selected-for-chpcl-petrochemical-complex-expansion

22https://www.omvpetrom.com/en/news/omv-petrom-investment-of-eur-۱۳۰-million-at-petrobrazi-refinery-to-build-new-unit-of-aromatic-products

23 https://www.saudigulfprojects.com/۰٤/۲۰۲٤/aramco-and-chinas-rongsheng-to-explore-new-opportunities

24

https://www.vcmstudy.ir/%D۹٪.BE%D۸٪.A۷٪.D۸٪.B۱٪.D۸٪.A۷٪.D۸٪.AF%D۸٪.A۷٪.DB٪.۸C%D۹٪.۸۵-%D۸٪.AC%D۸٪.AF%DB٪.۸C%D۸٪.AF-%D۸٪.AF%D۸٪.B۱-%D۸٪.B۲٪.D۹٪.۸٦٪.D۸٪.AC%DB٪.۸C%D۸٪.B۱٪.D۹٪.۸۷-%D۸٪.A۷٪.D۸٪.B۱٪.D۸٪.B۲٪.D۸٪.B٤-%D۹٪.BE%D۸٪.AA%D۸٪.B۱٪.D۹٪.۸۸٪.D۸٪.B٤٪.DB٪.۸C%D۹٪.۸۵٪.DB٪.۸C/

http://monochem.ir/%D۸٪.A۲٪.D۸٪.B۱٪.D۹٪.۸۸٪.D۹٪.۸۵٪.D۸٪.A۷٪.D۸٪.AA%DB٪.۸C%DA%A۹-%D۹٪.۸۷٪.D۸٪.A۷/

25 https://www.nexanteca.com/reports/methanol-aromatics-global-impact-new-technology