دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی — گروه مهندسی صنایع

پروژه طراحی برای دریافت درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع

پروژه طراحی ایجاد کارخانه تولید پُلی‌اِستر پُلی‌اِل با استفاده از PET بازیافتی

محمدرضا ضیاء خدادادیان

استاد راهنما: دکتر حمیدرضا کوشا

استاد مشاور: دکتر بابک رضایی خبوشان

چکیده

این پژوهش چارچوب طراحی ایجاد کارخانه تولید پلی‌استر پلی‌ال با استفاده از پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی را از دیدگاه مهندسی صنایع بررسی می‌کند. مسئله اصلی آن است که امکان‌پذیری چنین کارخانه‌ای صرفاً با اثبات واکنش‌پذیری PET یا معرفی یک مسیر شیمیایی احراز نمی‌شود؛ بلکه باید بازار محصول، مشخصات فنی مورد انتظار مشتری، کمیت و کیفیت خوراک، انتخاب فناوری، ظرفیت، مکان، تجهیزات، چیدمان، نیروی انسانی، ایمنی، الزامات محیط‌زیستی، مجوزها و اقتصاد طرح به‌صورت یک سامانه یکپارچه ارزیابی شوند. مطالعات علمی نشان می‌دهند که گلیکولیز می‌تواند پیوندهای استری PET را از طریق تبادل استری بشکند و مخلوطی از مونومرها یا الیگومرهای دارای گروه انتهایی هیدروکسیل ایجاد کند؛ بااین‌حال، نوع گلیکول، کاتالیست، نسبت خوراک، دما، زمان و کیفیت PET بر ترکیب و خواص محصول اثر دارند [۱]–[۴]. بنابراین، انتقال مستقیم یک فرمول آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی بدون آزمون پایلوت، موازنه جرم و انرژی و تعیین مشخصات محصول قابل دفاع نیست.

روش پژوهش، مرور نظام‌مند و فراتحلیل مشروط شواهد همراه با طراحی مفهومی کارخانه است. در این روش، داده‌ها باید همراه با مأخذ، واحد، شرایط آزمایش و دامنه اعتبار استخراج شوند. به دلیل ناهمگنی فرمولاسیون‌ها و نبود مجموعه‌داده هم‌سنج در اسناد ورودی سفارش، تجمیع آماری اندازه اثر انجام نشده و یافته‌ها به‌صورت تلفیق کیفی ارائه شده‌اند. ظرفیت اسمی، قیمت فروش، هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ بازده نیز تعیین نشده‌اند؛ زیرا این متغیرها نیازمند استعلام زمان‌دار از بازار، عرضه‌کنندگان فناوری و مراجع مجوزدهنده‌اند. در عوض، مدل‌های محاسباتی، معیارهای تصمیم، ساختار شکست کار، منطق مکان‌یابی، معماری کنترل کیفیت، چیدمان پیشنهادی، ساختار سازمانی و روش تحلیل حساسیت تدوین شده است.

نتیجه پژوهش آن است که احداث کارخانه از نظر مفهومی دارای مسیر فنی قابل بررسی است، اما تصمیم سرمایه‌گذاری باید «مشروط» باقی بماند. شروط اصلی عبارت‌اند از تثبیت محصول هدف بر پایه نیاز مشتری، تأمین پایدار PET با مشخصات قابل کنترل، تأیید فرمولاسیون در پایلوت، تعیین بازده و مصرف یوتیلیتی، دریافت پیشنهاد فنی و مالی فروشندگان، بررسی مکان‌های واقعی، اخذ استعلام مجوزها و تکمیل مدل مالی با قیمت‌های هم‌زمان. مزیت بالقوه طرح، تبدیل یک جریان پسماند به ماده اولیه‌ای با ارزش افزوده بالاتر است؛ در مقابل، نوسان کیفیت خوراک، حساسیت مشخصات پلی‌ال، مصرف انرژی، مدیریت مواد شیمیایی و عدم‌قطعیت بازار از ریسک‌های تعیین‌کننده‌اند. ازاین‌رو، راهبرد پیشنهادی، اجرای مرحله‌ای از آزمایشگاه و پایلوت تا طراحی پایه و تصمیم نهایی سرمایه‌گذاری است.

کلیدواژه‌ها: پلی‌استر پلی‌ال؛ PET بازیافتی؛ گلیکولیز؛ طراحی کارخانه؛ امکان‌سنجی فنی و اقتصادی؛ مهندسی صنایع؛ بازیافت شیمیایی؛ مکان‌یابی؛ چیدمان کارخانه.

فهرست مطالب

چکیده

فصل اول: کلیات پژوهش و تعریف مسئله

فصل دوم: مبانی نظری و مرور شواهد

فصل سوم: روش پژوهش و چارچوب طراحی

فصل چهارم: مطالعه بازار و تعریف محصول

فصل پنجم: تأمین خوراک و برنامه ظرفیت

فصل ششم: انتخاب فناوری و طراحی فرایند

فصل هفتم: تجهیزات، یوتیلیتی و کنترل کیفیت

فصل هشتم: مکان‌یابی، استقرار و چیدمان کارخانه

فصل نهم: نیروی انسانی، کارسنجی و سازمان

فصل دهم: ایمنی، محیط‌زیست و مجوزها

فصل یازدهم: ارزیابی اقتصادی و مدیریت عدم‌قطعیت

فصل دوازدهم: تحلیل یکپارچه، برنامه اجرا و مدیریت ریسک

فصل سیزدهم: جمع‌بندی و پیشنهادها

منابع

فصل اول: کلیات پژوهش و تعریف مسئله

مقدمه

پلی‌اتیلن ترفتالات یا PET یک پلی‌استر ترموپلاستیک است که در بسته‌بندی، بطری، الیاف و محصولات مهندسی استفاده می‌شود. دوام و پایداری آن در زمان مصرف، پس از خروج از چرخه مصرف به مسئله مدیریت پسماند تبدیل می‌شود. بازیافت مکانیکی برای جریان‌های تمیز و نسبتاً یکنواخت اهمیت دارد، اما آلودگی، اختلاط، افت خواص و محدودیت کاربرد می‌تواند استفاده مکرر از آن را دشوار کند. بازیافت شیمیایی، زنجیره پلیمر را به مواد کوچک‌تر تبدیل می‌کند و امکان کاربرد محصولات حاصل در سنتز مواد جدید را فراهم می‌سازد [۱]، [۲].

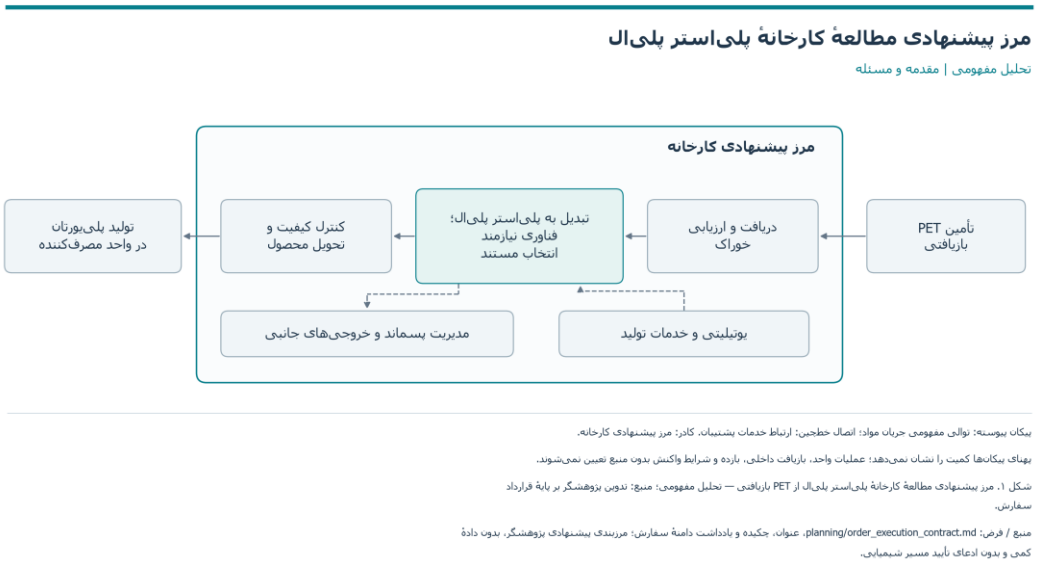
یکی از مسیرهای بازیافت شیمیایی PET، گلیکولیز است. در این فرایند، یک گلیکول در واکنش تبادل استری شرکت می‌کند و زنجیره PET به گونه‌های کم‌جرم‌تر شکسته می‌شود. محصول می‌تواند، بسته به مسیر و شدت واکنش، شامل بیس(هیدروکسی‌اتیل) ترفتالات، الیگومرها و ترکیبات هیدروکسیل‌دار باشد [۱]–[۳]. برای کارخانه مورد مطالعه، هدف لزوماً تولید BHET خالص و بازپلیمریزاسیون آن به PET نیست؛ هدف پیشنهادی، تولید پلی‌استر پلی‌الی است که مشخصات آن برای یک کاربرد پایین‌دستی معین، به‌ویژه تولید پلی‌یورتان، پذیرفتنی باشد. این تمایز بر طراحی فرایند، شدت خالص‌سازی، هزینه تجهیزات و روش کنترل کیفیت اثر مستقیم دارد.

بیان مسئله

فاصله مهمی میان «امکان انجام واکنش» و «امکان ایجاد کارخانه» وجود دارد. مقاله آزمایشگاهی ممکن است تبدیل PET را در مقدار محدود، با خوراک تمیز و شرایط کنترل‌شده نشان دهد؛ اما کارخانه

باید خوراک متغیر را دریافت کند، ناخالصی‌ها را شناسایی یا حذف کند، محصول یکنواخت تحویل دهد، ایمنی کارکنان را حفظ کند، خروجی‌های زیست‌محیطی را کنترل کند و هزینه‌های خود را از درآمد پوشش دهد. افزون بر این، هر تصمیم در یک زیرسامانه بر زیرسامانه‌های دیگر اثر می‌گذارد. برای نمونه، سخت‌گیری بیشتر در مشخصات خوراک می‌تواند هزینه آماده‌سازی را کاهش ولی قیمت خرید یا دشواری تأمین را افزایش دهد. خالص‌سازی شدیدتر ممکن است کیفیت محصول را بهتر کند، اما سرمایه‌گذاری، مصرف آب و انرژی و تولید پساب را بالا ببرد.

مرز پیشنهادی مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این مرز از تأمین PET آغاز می‌شود و دریافت خوراک، تبدیل، کنترل کیفیت و تحویل پلی‌ال را دربرمی‌گیرد. تولید پلی‌یورتان در کارخانه مصرف‌کننده، پایین‌دست مطالعه است و نباید هزینه‌های آن با سرمایه‌گذاری کارخانه پلی‌ال مخلوط شود. در عین حال، نیازهای مصرف‌کننده پایین‌دستی باید به مشخصات محصول کارخانه ترجمه شوند.



شکل ۱. مرز پیشنهادی مطالعهٔ کارخانهٔ پلی‌استر پلی‌ال از PET بازیافتی — تحلیل مفهومی؛ منبع: تدوین پژوهشگر بر پایهٔ قرارداد سفارش.

شکل ۱ نشان می‌دهد که فناوری اصلی تنها یکی از اجزای سامانه است. یوتیلیتی، خدمات تولید و مدیریت پسماند نیز درون مرز کارخانه قرار دارند، زیرا حذف آن‌ها از موازنه فنی و اقتصادی موجب کم‌برآوردی هزینه و فضای لازم می‌شود. پهنای پیکان‌ها در این شکل بیانگر مقدار جریان نیست و شکل هیچ بازده، ظرفیت یا شرایط واکنش را اثبات نمی‌کند.

اهمیت و ضرورت پژوهش

اهمیت پژوهش در پیوند دادن سه حوزه است: مدیریت پسماند PET، فناوری پلی‌استر پلی‌ال و طراحی صنعتی کارخانه. تبدیل PET به ماده واسطه‌ای با ارزش افزوده می‌تواند تقاضایی متفاوت از بازار PET بازیافتی مکانیکی ایجاد کند. بااین‌حال، ارزش افزوده فقط زمانی محقق می‌شود که محصول دارای مشخصات قابل تکرار و مشتری واقعی باشد. بنابراین، «بازیافتی بودن» به‌تنهایی مزیت رقابتی کافی نیست؛ کیفیت، قیمت، قابلیت تحویل و خدمات فنی نیز باید با گزینه‌های جایگزین مقایسه شوند.

از دیدگاه مهندسی صنایع، طرح باید جریان مواد، ظرفیت، گلوگاه، موجودی، نیروی انسانی، ایستگاه‌های کاری، تعمیرات، کنترل کیفیت و هزینه را یکجا ببیند. این رویکرد مانع آن می‌شود که تصمیم ظرفیت صرفاً از اندازه راکتور یا یک پیش‌بینی خوش‌بینانه بازار استخراج شود. ظرفیت مطلوب باید از حداقل چند قید عبور کند: بازار قابل دسترس، خوراک قابل قرارداد، قابلیت فرایند، محدودیت خدمات زیربنایی، سرمایه در دسترس و سطح ریسک پذیرفتنی.

هدف اصلی و اهداف فرعی

هدف اصلی، تدوین طراحی مفهومی و چارچوب امکان‌سنجی کارخانه تولید پلی‌استر پلی‌ال از PET بازیافتی است، به‌گونه‌ای که تصمیم‌های بعدی طراحی پایه و سرمایه‌گذاری بر داده‌های قابل ردیابی متکی باشند.

اهداف فرعی شامل تعریف محصول و بازار هدف؛ تعیین معیارهای پذیرش PET؛ مقایسه مسیرهای تبدیل؛ تدوین بلوک‌های فرایندی؛ شناسایی تجهیزات و یوتیلیتی‌ها؛ طراحی نظام کنترل کیفیت؛ ارائه روش ظرفیت‌سنجی؛ پیشنهاد معیارهای مکان‌یابی و چیدمان؛ تعیین روش برآورد نیروی انسانی و زمان استاندارد؛ شناسایی الزامات ایمنی، محیط‌زیست و مجوز؛ و تدوین مدل مالی و تحلیل حساسیت است.

پرسش‌های پژوهش

پرسش نخست آن است که چه ترکیبی از مشخصات فنی، بازار هدف و قیمت، محصول کارخانه را تعریف می‌کند. پرسش دوم به کیفیت و مقدار PET قابل تأمین مربوط است. پرسش سوم می‌پرسد کدام مسیر تبدیل و سطح خالص‌سازی با محصول هدف سازگارتر است. پرسش چهارم، تجهیزات، زیرساخت، فضای استقرار و نیروی انسانی لازم را بررسی می‌کند. پرسش پنجم درباره شرایط اقتصادی و نقاط شکنندگی طرح است. پرسش نهایی آن است که چه شواهدی برای عبور از طراحی مفهومی به سرمایه‌گذاری لازم است.

محدوده و محدودیت‌ها

موضوع پژوهش، تولید پلی‌استر پلی‌ال از PET بازیافتی است؛ تولید پلی‌یورتان، جمع‌آوری شهری پسماند و ساخت تجهیزات فرایندی در محدوده عملیاتی کارخانه قرار ندارند. بااین‌حال، مشخصات مورد انتظار مصرف‌کننده و شرایط زنجیره تأمین ورودی‌های طراحی محسوب می‌شوند.

محدودیت اصلی، نبود داده تأییدشده درباره ظرفیت، مکان، قیمت‌ها، قرارداد خوراک، فرمولاسیون و نتایج پایلوت است. همچنین، متن استخراج‌شده از شیوه‌نامه بارگذاری‌شده در بخش‌هایی مخدوش بوده است؛ بنابراین از بخش ناخوانا قاعده‌ای استنباط نشده است. کدهای محصول یا طبقه‌بندی ذکرشده در اطلاعات سفارش نیز تا زمان تأیید در سامانه رسمی، مبنای حقوقی یا بازارسنجی تلقی نمی‌شوند.

فصل دوم: مبانی نظری و مرور شواهد

ساختار PET و منطق بازیافت شیمیایی

PET از واحدهای تکرارشونده حاوی پیوند استری تشکیل شده است. وجود این پیوندها امکان واکنش‌هایی مانند هیدرولیز، متانولیز و گلیکولیز را فراهم می‌کند. انتخاب مسیر به محصول مطلوب، خلوص مورد نیاز، فشار و دما، بازیافت حلال، خوردگی، دسترسی مواد و اقتصاد مقیاس وابسته است. مرورهای علمی، گلیکولیز را یکی از مسیرهای پرمطالعه معرفی می‌کنند، اما بر نقش کاتالیست، انتقال جرم و ناهمگنی اولیه سامانه تأکید دارند [۱]، [۲].

در گلیکولیز، مولکول گلیکول به پیوند استری حمله می‌کند و تبادل استری رخ می‌دهد. در مراحل نخست، واکنش در سطح ذرات جامد PET انجام می‌شود؛ با پیشرفت واکنش، تورم و حل‌شدن یا تبدیل ذرات افزایش می‌یابد. ازاین‌رو، اندازه ذره، اختلاط، نسبت مایع به جامد و دما بر نرخ ظاهری اثر می‌گذارند [۱]. محصول نهایی تابع آن است که هدف، مونومر نسبتاً خالص یا مخلوط الیگومری مناسب برای پلی‌ال باشد. این دو هدف لزوماً یک طراحی یکسان ندارند.

پلی‌استر پلی‌ال و رابطه ساختار و عملکرد

پلی‌ال ماده‌ای است که چند گروه هیدروکسیل واکنش‌پذیر دارد. در تولید پلی‌یورتان، گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ال با گروه‌های ایزوسیانات واکنش می‌دهند. جرم مولکولی، عاملیت، عدد هیدروکسیل، عدد اسیدی، ویسکوزیته، مقدار آب و ترکیب شیمیایی پلی‌ال بر فرایندپذیری و خواص محصول پایین‌دستی اثر دارند [۴]، [۵]. بنابراین، نام تجاری «پلی‌استر پلی‌ال» برای طراحی کافی نیست و باید به مجموعه‌ای از حدود پذیرش قابل اندازه‌گیری تبدیل شود.

ساختار آروماتیک به‌جامانده از PET می‌تواند سختی و پایداری ابعادی را افزایش دهد، ولی ممکن است ویسکوزیته یا شکنندگی را نیز تحت تأثیر قرار دهد. این اثر تابع فرمولاسیون کامل پلی‌یورتان است و نباید بدون آزمون کاربردی به همه محصولات تعمیم داده شود [۴]. کارخانه باید محصول را برای یک خانواده کاربردی مشخص طراحی کند؛ برای مثال، پلی‌ال مناسب فوم سخت الزاماً برای چسب، الاستومر یا پوشش مناسب نیست.

مسیرهای تبدیل PET به پلی‌ال

یک مسیر پیشنهادی، گلیکولیز مستقیم PET با گلیکول منتخب و سپس تنظیم محصول از طریق استریفیکاسیون یا اختلاط کنترل‌شده است. مسیر دیگر، تولید واسطه‌ای مانند BHET و استفاده از آن در سنتز بعدی است. مسیر مستقیم ممکن است تعداد مراحل و هزینه جداسازی را کاهش دهد، اما کنترل ترکیب الیگومری و رنگ دشوارتر باشد. مسیر خالص‌سازی‌شده انعطاف بیشتری در فرمولاسیون ایجاد می‌کند، ولی به تجهیزات، انرژی و مدیریت جریان‌های جانبی بیشتری نیاز دارد.

مطالعات، استفاده از اتیلن‌گلیکول، دی‌اتیلن‌گلیکول و گلیکول‌های دیگر و نیز طیفی از کاتالیست‌ها را گزارش کرده‌اند [۱]–[۴]. این تنوع نشان‌دهنده امکان فنی است، نه وجود یک نسخه عمومی برای کارخانه. انتخاب باید بر پایه آزمایش مقایسه‌ای انجام شود. معیارهای مقایسه عبارت‌اند از نرخ تبدیل، عدد هیدروکسیل، عدد اسیدی، ویسکوزیته، رنگ، پایداری انبارداری، مقدار گلیکول آزاد، قابلیت استفاده در فرمول پایین‌دستی، خطرات مواد، خوردگی و هزینه بازیافت یا تصفیه.

کیفیت خوراک بازیافتی

PET پسامصرف ممکن است حاوی پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، PVC، چسب، کاغذ، رنگ‌دانه، فلز، آب و بقایای محتویات قبلی باشد. هر ناخالصی رفتار متفاوتی دارد. پلی‌الفین‌ها ممکن است ذوب یا شناور شوند و به جداسازی نیاز داشته باشند. PVC در شرایط حرارتی می‌تواند محصولات خورنده ایجاد کند؛ بنابراین کنترل آن اهمیت ویژه دارد. رطوبت نیز بر موازنه واکنش و کیفیت محصول اثر می‌گذارد. PET رنگی یا چندلایه می‌تواند رنگ و ترکیب پلی‌ال را تغییر دهد.

بر این اساس، مشخصات خرید خوراک باید شامل منشأ، نوع بسته، حد آلودگی، رطوبت، درصد PET، دامنه رنگ، اندازه پرک و روش نمونه‌برداری باشد. حدود عددی فقط پس از آزمایش فرایند و توافق با تأمین‌کننده تعیین می‌شوند. پذیرش محموله نباید صرفاً بر مشاهده ظاهری استوار باشد؛ نمونه مرکب، اندازه‌گیری رطوبت و آزمون شناسایی پلیمر باید جزئی از نظام ورودی باشند.

شواهد کاربرد در پلی‌یورتان

مرورهای جدید گزارش کرده‌اند که محصولات هیدروکسیل‌دار حاصل از بازیافت PET در تولید انواع مواد پلی‌یورتانی، از جمله فوم و چسب، بررسی شده‌اند [۴]. این نتیجه، قابلیت تحقیق و توسعه را تأیید می‌کند؛ اما تضمین نمی‌کند که محصول کارخانه پیشنهادی بدون اصلاح فرمول در سامانه هر مشتری جایگزین پلی‌ال متعارف شود. پذیرش صنعتی مستلزم ساخت نمونه، اندازه‌گیری خواص، آزمون پایداری و تأیید مشتری است.

در ارزیابی بازار باید میان «بازار کل پلی‌یورتان» و «بازار قابل دسترس پلی‌ال مشخص» تفاوت گذاشت. پلی‌یورتان‌ها خانواده بزرگی از مواد هستند و هر کاربرد به پلی‌ال و ایزوسیانات و افزودنی‌های

متفاوت نیاز دارد [۵]. بنابراین، استناد به وسعت بازار کلی پلی‌یورتان برای پیش‌بینی فروش پلی‌ال بازیافتی کافی نیست.

پیامدهای محیط‌زیستی

بازیافت شیمیایی می‌تواند استفاده از پسماند و مواد اولیه فسیلی را کاهش دهد، ولی خود به مواد شیمیایی، حرارت، برق، آب و تصفیه نیاز دارد. برتری محیط‌زیستی باید با مرز، واحد کارکردی و داده‌های موجودی روشن ارزیابی شود. استاندارد ISO ۱۴۰۴۰ ارزیابی چرخه عمر را در چهارچوب تعریف هدف و دامنه، موجودی چرخه عمر، ارزیابی اثر و تفسیر قرار می‌دهد [۶]. در این طرح، ادعای کاهش قطعی انتشار یا انرژی مطرح نمی‌شود؛ چنین ادعایی نیازمند مقایسه مبتنی بر داده میان محصول بازیافتی و مسیر مرجع است.

فصل سوم: روش پژوهش و چارچوب طراحی

طرح روش‌شناختی

روش این پژوهش از دو لایه تشکیل شده است. لایه نخست، مرور ساختاریافته شواهد فنی و مدیریتی است. لایه دوم، تبدیل شواهد به تصمیم‌های طراحی مفهومی است. واحد تحلیل در مرور علمی، مطالعه‌ای است که مسیر تبدیل PET، مواد، شرایط، محصول و حداقل یک شاخص قابل سنجش را گزارش کند. اسناد استاندارد و راهنما نیز برای ایمنی، محیط‌زیست و طراحی سامانه استفاده می‌شوند.

فراتحلیل در معنای آماری فقط هنگامی مجاز است که چند مطالعه سؤال مشابه، پیامد هم‌تعریف، واحد قابل تبدیل و اطلاعات کافی درباره پراکندگی داده داشته باشند. در موضوع حاضر، تفاوت گلیکول‌ها، کاتالیست‌ها، نسبت‌ها، شکل خوراک و روش اندازه‌گیری سبب ناهمگنی بالاست. ازاین‌رو، خروجی حاضر فراتحلیل آماری ساختگی ارائه نمی‌کند و از تلفیق کیفی استفاده می‌کند.

راهبرد جست‌وجو و معیارهای ورود

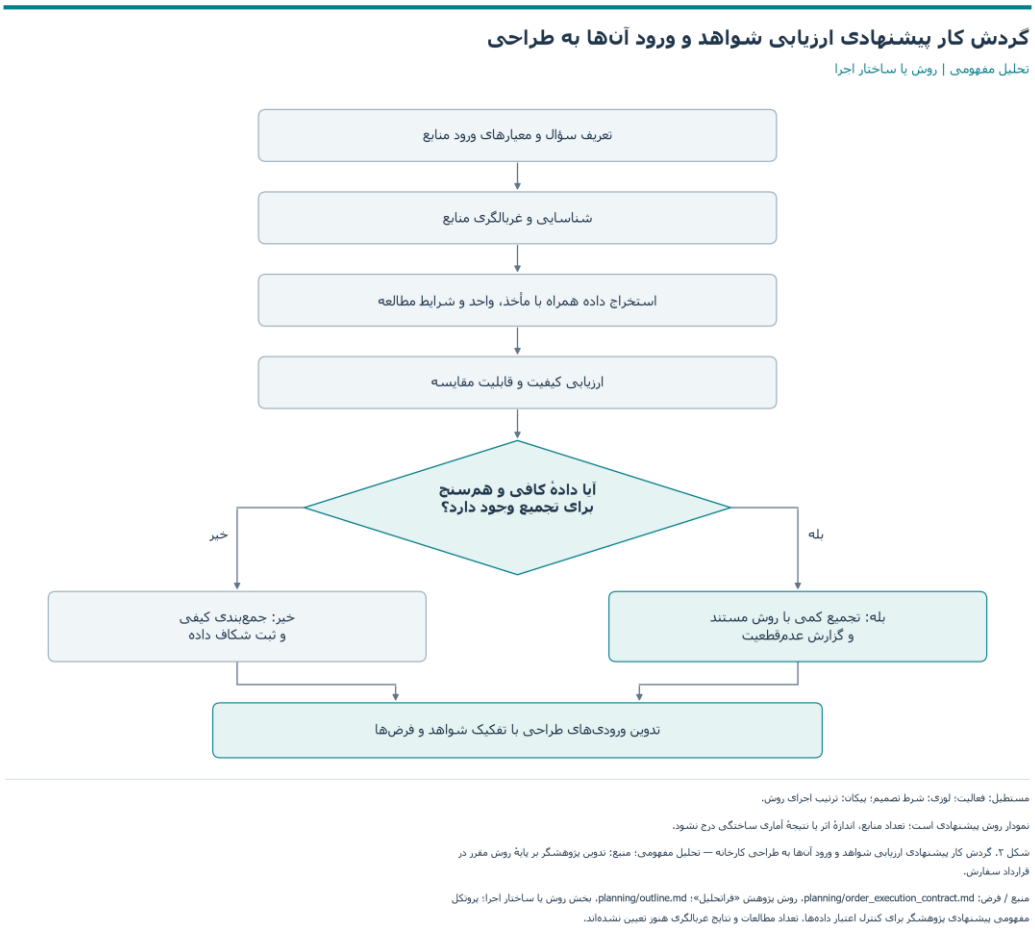
کلیدواژه‌های اصلی شامل PET glycolysis، recycled PET polyol، polyester polyol، polyurethane، chemical recycling، process design و techno-economic assessment هستند. اولویت با مقاله داوری‌شده، استاندارد، سند رسمی و راهنمای مؤسسه معتبر است. منبعی وارد تحلیل می‌شود که هویت کتابشناختی روشن و ارتباط مستقیم با تصمیم طراحی داشته باشد. مطالب تبلیغاتی فروشندگان صرفاً برای دریافت مشخصات پیشنهادی تجهیزات قابل استفاده‌اند و نباید جایگزین آزمون عملکرد یا مرجع علمی شوند.

برای هر منبع، نوع PET، پیش‌تیمار، عامل گلیکولیز، کاتالیست، شرایط عملیات، روش جداسازی، شاخص‌های محصول و محدودیت‌ها ثبت می‌شود. داده‌ای که واحد، شرایط یا روش اندازه‌گیری ندارد، به عدد طراحی تبدیل نمی‌شود. همچنین، مقدار به‌دست‌آمده در مقیاس آزمایشگاهی بدون ضریب اطمینان و بررسی مقیاس‌پذیری مستقیماً برای تعیین ظرفیت تجهیز استفاده نمی‌شود.

ارزیابی کیفیت شواهد

کیفیت شواهد بر اساس شفافیت روش، وجود تکرار، گزارش روش آزمون، قابلیت ردیابی خوراک، بسته‌شدن موازنه و ارتباط با محصول هدف ارزیابی می‌شود. مطالعه‌ای ممکن است از نظر شیمی معتبر باشد ولی برای طراحی کارخانه اطلاعات کافی درباره انتقال حرارت یا جداسازی نداشته باشد. بنابراین، کیفیت باید نسبت به کاربرد داده سنجیده شود.

گردش کار شکل ۲ نقطه تصمیم میان تجمیع کمی و جمع‌بندی کیفی را نشان می‌دهد. این تفکیک از تولید میانگین‌هایی جلوگیری می‌کند که از ترکیب داده‌های ناهمگن حاصل شده‌اند و معنای صنعتی ندارند.



شکل ۲. گردش کار پیشنهادی ارزیابی شواهد و ورود آن‌ها به طراحی کارخانه — تحلیل مفهومی؛ منبع: تدوین پژوهشگر بر پایهٔ روش مقرر در قرارداد سفارش.

مطابق شکل ۲، هر ورودی طراحی باید برچسب «شاهد»، «فرض» یا «نیازمند تأیید» داشته باشد. تعداد مطالعات غربال‌شده و اندازه اثر در این پژوهش گزارش نشده است، زیرا پایگاه ثبت‌شده‌ای از فرایند غربالگری در اسناد ورودی وجود ندارد. این محدودیت به‌جای پنهان شدن، در تصمیم مرحله‌ای طرح لحاظ می‌شود.