

POLİMER İSTEHSALINDA SƏNAYE QAZ TULLANTILARININ TƏKRAR EMALININ TEXNOLOJİ VƏ EKOLOJİ ASPEKTLƏRİ

Cəlal Rauf oğlu NOVRUZOV 
Sumqayıt Dövlət Universiteti, magistrant
E-mail: j.r.novruzov@gmail.com

Received: 12 January 2025

Revised: 13 February 2026

Accepted: 20 March 2026

UOT: 330.34

DOI: <https://doi.org/10.32010/SVEH9049>

Xülasə: Məqalənin məqsədi polimer istehsalı zamanı formalaşan sənaye qaz tullantılarının yalnız zərərsizləşdirilməsi deyil, həm də təkrar emal olunaraq texnoloji dövrəyə ikinci xammal kimi qaytarılması imkanlarını sistemli şəkildə qiymətləndirməkdir. Polimer müəssisələrində uçucu üzvi birləşmələr, reaksiya verməmiş monomerlər, həlledici buxarları, inert purj qazları, hidrogenlə zəngin axınlar və CO₂ tərkibli yanma qazları müxtəlif tərkib və risk profili yaradır. Tədqiqatda BAT sənədləri, VOC bərpası üzrə elmi mənbələr, membran və adsorbsiya texnologiyaları, həmçinin karbon tutma və istifadə yanaşmaları əsasında analitik-texnoloji icmal aparılmışdır.

Nəticələr göstərir ki, yüksək konsentrasiyalı və tərkibcə stabil axınlarda kondensasiya, adsorbsiya, membran ayrılması və PSA kombinasiyası xammal bərpası baxımından daha səmərəli ola bilər; aşağı konsentrasiyalı və dəyişkən axınlarda isə enerji sərfi, təhlükəsizlik və məhsul keyfiyyəti məhdudlaşdırıcı amillərdir. Məqalədə tullantı qazların mənbə üzrə seqreqasiyası, ilkin analitik nəzarət, texnologiya seçimi və təkrar istifadə üçün keyfiyyət təminatı mərhələlərini birləşdirən qərar modeli təklif edilir. Ekoloji baxımdan əsas nəticə ondan ibarətdir ki, xammal kimi istifadə yalnız həyat dövrü üzrə emissiya azalması və əlavə enerji yükünün balanslaşdırılması sübut olunduqda dayanıqlı hesab edilə bilər.

Açar sözlər: polimer istehsalı; tullantı qazlar; VOC bərpası; membran ayrılması; karbon tutma və istifadə; dairəvi iqtisadiyyat.

Giriş

Polimer materialların istehsalı müasir sənayenin ən dinamik sahələrindən biri olmaqla qablaşdırma, tikinti, nəqliyyat, elektrotexnika, tibb və məişət sektorlarında geniş tətbiq olunur. Lakin bu istehsal zənciri yüksək enerji intensivliyi, neft-kimya xammalından asılılıq və müxtəlif qaz emissiyalarının formalaşması ilə müşayiət edilir. Poliolefin, PVC, polistirol, PET, sintetik kauçuk və digər polimerlərin istehsalında reaktor ventləri, degazasiya xətləri, qurutma qurğuları, həlledici bərpa sistemləri, ekstruder və saxlama əməliyyatları tullantı qazların əsas mənbələri kimi çıxış edir. Avropa İttifaqının polimer istehsalı üzrə BAT sənədində həm nöqtəvi, həm də diffuz emissiyaların nəzərə alınması, istehsal mərhələlərinə uyğun texniki həllərin seçilməsi və emissiya səviyyələrinin ümumi sistem kimi qiymətləndirilməsi xüsusi vurğulanır [1].

Ənənəvi yanaşmada tullantı qazların idarə olunması əsasən “son boru” prinsipi ilə, yəni termik oksidləşmə, katalitik oksidləşmə və ya məşəldə yandırma kimi zərərsizləşdirmə prosesləri vasitəsilə həyata keçirilirdi. Bu üsullar təhlükəsizlik və emissiya limitlərinə uyğunluq baxımından zəruri olsa da, qaz axınında olan monomer, həlledici, hidrogen, yüngül karbohidrogen və CO₂ kimi komponentlərin resurs dəyərini itirir. Dairəvi iqtisadiyyat və aşağı karbonlu sənaye konsepsiyası isə tullantı qazları yalnız çirkəndirici deyil, həm də potensial xammal axını kimi nəzərdən keçirməyi tələb edir. Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector adlı 2023-cü il BREF sənədində kimya sənayesində kanalizasiya edilmiş və diffuz hava emissiyalarının idarə edilməsi, monitorinqi və texniki seçimi sistemli yanaşma kimi təqdim edilir [2].

Polimer istehsalında qaz tullantılarının tərkibi vahid deyil. Bir müəssisədə etilen, propilen, vinilxlorid monomeri, stiro, butadien, akrilonitril, izosianatlar, aseton, toluol, metanol və digər uçucu üzvi birləşmələr üstünlük təşkil edə bilər; başqa bir istehsal xəttində isə karbon dioksid, karbon monoksid, azot oksidləri, su buxarı, hidrogen və inert qazlar ön plana çıxır. Bu səbəbdən təkrar emal strategiyası universal qurğu seçimi ilə məhdudlaşa bilməz. Əsas məsələ axının kimyəvi tərkibinin, konsentrasiyasının, temperaturunun, təzyiqinin, yanma və partlayış hədlərinin, katalizator zəhərləyicilərinin, nəmlik və toz yükünün, habelə istehsal prosesinin xammal spesifikasiyalarının eyni vaxtda təhlil edilməsidir.

Tullantı qazlardan xammal kimi istifadə ideyası üç səviyyədə əsaslandırıla bilər. Birinci səviyyə birbaşa bərpadır: reaksiya verməmiş monomerlər və həlledici buxarları ayrı-ayrılıqda təmizlənir və prosesə qaytarılır. İkinci səviyyə komponent bərpasıdır: hidrogen, etilen, propilen, C2-C5 fraksiyaları və digər qiymətli fraksiyalar membran, adsorbsiya, kondensasiya və kriogen ayırma ilə seçilir. Üçüncü səviyyə kimyəvi çevrilmədir: CO₂ və CO tərkibli axınlar metanol, dimetil efir, sintez qazı, karbonatlar və bəzi polimer ara məhsulları üçün karbon mənbəyinə çevrilir. Bu səviyyələr ekoloji effekt, texnoloji mürəkkəblilik və iqtisadi geri dönüş baxımından fərqli nəticələr verir.

Məqalənin elmi problemi ondan ibarətdir ki, polimer müəssisələrində qaz tullantılarının təkrar emalı çox vaxt ayrı-ayrı avadanlıq səviyyəsində müzakirə olunur, halbuki xammal kimi istifadə üçün inteqrasiya olunmuş qərar modeli tələb edilir. Belə model tullantı mənbələrinin seqreasiyasını, analitik monitorinqi, təhlükəsizlik meyarlarını, ayrılma texnologiyalarının seçimini, məhsul keyfiyyətini, enerji balansını və həyat dövrü üzrə ekoloji nəticəni eyni məntiqdə birləşdirməlidir. Bu məqalədə məqsəd polimer istehsalında sənaye qaz tullantılarının təkrar emalının texnoloji və ekoloji aspektlərini ümumiləşdirmək, mümkün texnologiya marşrutlarını müqayisə etmək və praktiki tətbiq üçün qərar çərçivəsi təklif etməkdir.

Metodlar

Tədqiqat eksperimental laboratoriya işi kimi deyil, analitik-texnoloji icmal və konseptual proses dizaynı kimi qurulmuşdur. Metodoloji

baza dörd mərhələdən ibarətdir. Birinci mərhələdə polimer istehsalında yaranan qaz tullantılarının mənbə və tərkib üzrə təsnifatı aparılmış, BAT sənədlərində göstərilən polimer istehsalı və ümumi kimya sənayesi emissiya yanaşmaları əsas götürülmüşdür [1,2]. İkinci mərhələdə VOC bərpası və zərərsizləşdirilməsi üzrə klassik və müasir elmi ədəbiyyat təhlil edilmiş, bərpa əsaslı və destruksiya əsaslı texnologiyalar arasında fərq müəyyənləşdirilmişdir [3]. Üçüncü mərhələdə membran ayrılması, təzyiqli dəyişməli adsorbsiya, kondensasiya, absorbsiya və hibrid ayırma sistemləri tullantı qazın xammal kimi istifadəsi baxımından qiymətləndirilmişdir [4-7]. Dördüncü mərhələdə CO₂ və karbon tərkibli qaz axınlarının kimyəvi utilizasiyası və həyat dövrü qiymətləndirilməsi üzrə mənbələr əsasında ekoloji qərar meyarları formalaşdırılmışdır [8-11].

Qiymətləndirmədə üç əsas analitik sualdan istifadə edilmişdir: birincisi, hansı tullantı qaz axınları polimer istehsalında real xammal və ya yarıxammal dəyəri daşıyır; ikincisi, hansı ayırma və təmizləmə texnologiyaları həmin axınların prosesə qaytarılmasını texniki baxımdan mümkün edir; üçüncüsü, bu təkrar istifadə marşrutları ekoloji baxımdan həmişə müsbət nəticə verirmi, yoxsa əlavə enerji sərfi və ikinci dərəcəli emissiyalar səbəbindən məhdudlaşır. Bu sualların cavablandırılması üçün məqalədə keyfiyyət əsaslı texnologiya matrisi və konseptual proses zənciri hazırlanmışdır.

Tullantı qazın xammal kimi yararlılığı aşağıdakı sadə material göstəriciləri ilə izah edilmişdir. Bərpa səmərəliliyi $\eta = (m_{\text{bərpa}} / m_{\text{giriş}}) \times 100\%$ formasında, prosesə qaytarılan karbon payı isə $K_c = m_{\text{qaytarılan karbon}} / m_{\text{tullantı karbon}} \times 100\%$ kimi qəbul edilmişdir. Enerji yükü $E_r = E_{\text{ayırma}} + E_{\text{sıxma}} + E_{\text{qurutma}} + E_{\text{təmizləmə}}$ göstəricisi ilə, ekoloji məqsədə uyğunluq isə bərpa nəticəsində azalan emissiya və əlavə enerji istehlakından yaranan emissiya arasındakı fərq kimi şərh edilmişdir. Bu göstəricilər məqalədə dəqiq sənaye ölçmələri kimi deyil, qərar vermə çərçivəsini izah edən konseptual göstəricilər kimi istifadə edilir.

Təhlükəsizlik meyarları ayrıca nəzərə alınmışdır. Polimer istehsalında vent qazları çox vaxt alışqan və partlayıcı komponentlər daşdığı üçün hər bir bərpa sistemi aşağı partlayış həddi,

oksigen tərkibi, statik elektrik riski, inhibitor və stabilizator tələbi, kompressor öncəsi kondensasiya və fəvqəladə boşaltma ssenariləri ilə birlikdə layihələndirilməlidir.

Cədvəl 1.

Polimer istehsalında tullantı qaz mənbələrinin xammal potensialı üzrə təsnifatı

Mənbə	Tipik komponentlər	Xammal kimi potensial	Əsas məhdudiyət
Reaktor ventləri və purj xətləri	Reaksiya verməmiş monomer, inert qaz, H ₂ , yüngül karbohidrogenlər	Yüksək: monomer və fraksiya bərpası mümkündür	Partlayış riski, kompozisiya dəyişkənliyi
Degazasiya və qurutma mərhələləri	Monomer qalıqları, həlledici buxarları, su buxarı	Orta-yüksək: kondensasiya və adsorbsiya ilə geri qaytarma	Nəmlik, aşağı konsentrasiya, məhsul keyfiyyəti
Həlledici əsaslı proseslər	Toluol, heksan, asetat, keton və spirt buxarları	Yüksək: həlledici bərpası və təkrar istifadəsi	Qarışıq həlledici tərkibi və təmizləmə dəyəri
Yanma və enerji qurğuları	CO ₂ , CO, NO _x , O ₂ , N ₂ , su buxarı	Orta: CCU və karbonat/methanol marşrutları	CO ₂ -nin aşağı reaktivliyi və enerji tələbi
Saxlama və yükləmə əməliyyatları	Diffuz VOC, monomer buxarları	Orta: buxar bərpa sistemləri ilə mümkündür	Diffuz xarakter və axın sabitliyinin zəifliyi

Mənbə: müəllif tərəfindən elmi ədəbiyyat və BAT sənədləri əsasında tərtib edilmişdir.

İlkin nəticələr

Təhlil göstərir ki, polimer istehsalında tullantı qazların xammal kimi istifadəsi üçün ən real başlanğıc nöqtəsi qaz axınlarının mənbə üzrə ayrılmasıdır. Bütün vent və havalandırma axınlarını ümumi kollektor xəttinə vermək emissiya idarəçiliyi baxımından sadə görünə bilər, lakin resurs bərpasını çətinləşdirir. Konsentrasiyası yüksək olan monomer və həlledici axınları aşağı konsentrasiyalı havalandırma qazları ilə qarışdıqda həm ayrılma enerjisi artır, həm də təkrar istifadə üçün tələb olunan saflıq səviyyəsinə çatmaq çətinləşir. Buna görə “qarışdırmadan əvvəl ayırma” prinsipi tullantı qazların xammala çevrilməsinin əsas texnoloji şərtidir.

VOC tərkibli axınlarda bərpa və destruksiya texnologiyaları arasında seçim komponentin iqtisadi dəyəri, konsentrasiyası, axının həcmi və yanma təhlükəsi ilə müəyyən edilir. Khan və Ghoshal VOC nəzarət texnologiyalarını bərpa və məhəvmə qruplarına ayıraraq kondensasiya, adsorbsiya, absorbsiya və membran ayrılmasını bərpa əsaslı metodlar kimi təqdim etmişlər [3]. Polimer sənayesində xammal kimi istifadə məqsədi məhz bu bərpa yönümlü texnologiyalara üstünlük verilməsini tələb edir. Lakin axın çox seyrək, çirkəndiricilərlə qarışıq və ya qeyri-sabit olduqda termik və katalitik oksidləşmə ekoloji uyğunluq üçün daha etibarlı ola bilər.

Kondensasiya yüksək buxar təzyiqinə malik və nisbətən yüksək konsentrasiyalı həlledici və monomer buxarları üçün daha uyğun hesab edilir. Soyutma və ya təzyiq artırılması nəticəsində üzvi buxarlar maye fazaya keçirilir, daha sonra distillə və ya filtrasiya ilə prosese qaytarılır. Kondensasiyanın üstünlüyü məhsulun birbaşa bərpa olunmasıdır; zəif cəhəti isə aşağı konsentrasiyalı axınlarda soyutma enerjisinin yüksək olması və donma, nəmlik, korroziya kimi problemlərin yaranmasıdır. Bu səbəbdən kondensasiya çox vaxt adsorbsiya və ya membranla birlikdə ön-bərpa mərhələsi kimi tətbiq edilir.

Adsorbsiya texnologiyaları aktivləşdirilmiş karbon, zeolit, silikagel və xüsusi sorbentlər vasitəsilə VOC, monomer və bəzi CO₂ axınlarının tutulmasına imkan verir. Adsorbentin regenerasiyası buxar, inert qaz, vakuum və ya temperatur dəyişməsi ilə aparıla bilər. Adsorbsiya üstünlüyü ondan ibarətdir ki, seyrək axınlardan da qiymətli komponentləri konsentrasiya edə bilər. Bununla yanaşı, regenerasiya mərhələsində ikinci qaz axını yaranır və bu axın ayrıca kondensasiya, rektifikasiya və ya oksidləşmə tələb edə bilər. Adsorbent seçimi məhsul keyfiyyətinə təsir etdiyindən təkrar istifadə ediləcək monomer və həlledici üçün desorbsiya məhsulunun analiz nəzarəti vacibdir.

Membran ayrılması polimer və qeyri-polimer membranların seçiliyinə əsaslanır. Baker membran qaz ayırmasının sənaye tətbiqlərində

hidrogen bərpası, azot generasiyası, CO₂ ayrılması və üzvi buxarların ayrılması kimi istiqamətlərin əhəmiyyətini göstərmişdir [4]. Polimer istehsalında membranlar xüsusilə hidrogenlə zəngin purj qazlarının bərpası, olefin/parafin ayrılması, həlledici buxarlarının konsentrasiyası və CO₂ tərkibli axınların ilkin zənginləşdirilməsi üçün maraqlıdır. Membran prosesinin üstünlüyü modul quruluş, fasiləsiz iş və nisbətən kompakt avadanlıqdır; məhdudiyəti isə membran çirklənməsi, plastikləşmə, seçicilik-keçiricilik kompromisi və təzyiq fərqinə ehtiyacdır.

PSA və VSA sistemləri qaz qarışıqlarında hidrogen, CO₂, azot və metan kimi komponentlərin təmizlənməsində geniş tətbiq olunur. Sircar PSA texnologiyasını müxtəlif qaz qarışıqlarının ayrılması və təmizlənməsi üçün çevik sənaye metodu kimi izah etmişdir [5]. Grande isə adsorbent və proses mühəndisliyinin PSA performansında həlledici rol oynadığını vurğulamışdır [6]. Polimer müəssisələrində PSA hidrogenin reaktor sistemə qaytarılması, CO₂-nin tutularaq istifadəyə hazırlanması və inert qaz dövrlərinin təmizlənməsi üçün tətbiq edilə bilər. Bununla belə, PSA axınlarının dövrü xarakteri, kompressor tələbi və adsorbent regenerasiyası layihə optimallaşdırmasını zəruri edir.

Cədvəl 2.

Tullantı qazların təkrar emalı üçün texnologiya seçim matrisi

Texnologiya	Uyğun axın	Xammal bərpası üstünlüyü	Ekoloji və texniki risk
Kondensasiya	Yüksək konsentrasiyalı həlledici və monomer buxarları	Maye fazada birbaşa bərpa; prosesə qaytarma asandır	Soyutma enerjisi, nəmlik, buzlanma və korroziya
Adsorbsiya	Seyrək və orta konsentrasiyalı VOC axınları	Komponentləri konsentrasiya edir; regenerasiya ilə bərpa mümkündür	Sorbent doyması, regenerasiya qazı, yanğın riski
Membran ayrılması	H ₂ , CO ₂ , üzvi buxar və yüngül karbohidrogen qarışıqları	Modul və fasiləsiz bərpa; digər proseslərlə hibridləşmə	Seçicilik limiti, fouling, təzyiq itkisi
PSA/VSA	H ₂ , CO ₂ , N ₂ /CH ₄ və təmizlənmə bilən qaz qarışıqları	Yüksək saflıqda qaz məhsulu almaq mümkündür	Dövrü iş rejimi, adsorbent seçimi, kompressor enerjisi
Absorbsiya	Turş qazlar, polar VOC, CO ₂ və bəzi həlledici buxarları	Maye absorbentlə selektiv tutma	Solvent itkisi, regenerasiya enerjisi, korroziya
Katalitik/termik oksidləşmə	Bərpası səmərəsiz və ya təhlükəli aşağı dəyərli axınlar	Emissiya limitlərinə etibarlı uyğunluq	Xammal dəyəri itir; CO ₂ və əlavə enerji yükü yaranır

Mənbə: müəllif tərəfindən elmi ədəbiyyat və BAT sənədləri əsasında tərtib edilmişdir.

Hibrid ayırma sistemləri ayrı-ayrı texnologiyalardan daha yüksək potensial göstərir. Perez və həmkarları bir neçə neft emalı qazından H₂, C₂ fraksiyası, LPG və C₅+ məhsulların alınması üçün membran, PSA, səthi kondensasiya və distillə mərhələlərini birləşdirən hibrid proses dizayn etmiş və iqtisadi qiymətləndirmə aparmışlar [7]. Bu nəticə polimer müəssisələri üçün də mühüm mesaj verir: tərkibi mürəkkəb olan purj və vent qazlarında tək bir avadanlıqla həm yüksək saflıq, həm də

yüksək bərpa dərəcəsi almaq çətindir; buna görə mərhələli ayrılma daha real yanaşmadır.

CO₂ tərkibli qazların xammal kimi istifadəsi ayrıca kateqoriya təşkil edir. IEAGHG tərəfindən hazırlanmış hesabatda tutulan CO₂-nin tikinti materialları, kimyəvi maddələr, polimerlər və sintetik yanacaqlar üçün xammal kimi istifadəsinə artan maraq göstərilir [8]. Milli Akademiyalar da CO₂-nin kimyəvi istifadəsinin nəzəri baxımdan cəlbedici, lakin kinetik və termodinamik sabitliyə görə enerji tələb edən

proses olduğunu qeyd edir [9]. Bu o deməkdir ki, polimer istehsalında CO₂-nin xammal kimi istifadəsi yalnız “emissiyanı məhsula çevirmək” kimi sadə qəbul edilməməlidir. Hidrogenin mənbəyi, elektrik enerjisinin karbon intensivliyi, katalizatorun davamlılığı və məhsul bazarı nəticəni müəyyənləşdirir.

CO₂-nin polimerlər üçün birbaşa və dolayı xammal kimi istifadəsi üç əsas istiqamətdə nəzərdən keçirilə bilər. Birinci istiqamət CO₂-nin epoksidlərlə reaksiyası əsasında siklik karbonatlar və polikarbonatlar istehsalıdır. İkinci istiqamət CO₂-nin metanola çevrilməsi və metanoldan olefinlərə keçid vasitəsilə poliolefin zəncirinə dolayı daxil edilməsidir. Üçüncü istiqamət CO₂-nin dimetil karbonat, diphenyl carbonate və poliuretan ara məhsulları üçün karbon mənbəyi kimi istifadəsidir. Artz və həmkarları CO₂ çevrilməsinin kataliz və həyat dövrü

qiymətləndirilməsi ilə birlikdə təhlil edilməsinin vacibliyini göstərmişlər [10].

Ekoloji nəticələr birmənalı deyil. Garcia-Garcia və həmkarlarının CCU texnologiyaları üzrə həyat dövrü icmalı göstərir ki, karbon istifadə marşrutlarının iqlim effekti prosesin enerji mənbəyindən, hidrogen istehsalından, məhsulun bazarda hansı məhsulu əvəz etməsindən və sistem sərhədlərindən asılıdır [11]. Buna görə polimer istehsalında tullantı qazdan xammal kimi istifadə yalnız lokal emissiyanın azalması ilə yox, həyat dövrü üzrə net ekoloji nəticə ilə qiymətləndirilməlidir. Məsələn, bir müəssisədə həlledici buxarının bərpası həm xammal alınmasını, həm də VOC emissiyasının azalmasını təmin edə bilər; lakin CO₂-dən metanol istehsalı karbon intensiv elektrik və boz hidrogenlə aparılırsa, ümumi emissiya azalması zəif və ya mənfəi ola bilər.

Cədvəl 3.

Xammal kimi təkrar istifadə üçün qərar meyarları

Meyar	Sual	Müsbət qərar şərti	Mənfəi qərar göstəricisi
Tərkib sabitliyi	Axının kimyəvi tərkibi sabitdirmi?	Komponent nisbətləri dar diapazonda dəyişir	Tez-tez piklər, naməlum çirkəndiricilər
Konsentrasiya	Qiymətli komponent ayrılmağa yetərlidirmi?	Monomer/VOC/H ₂ /CO ₂ payı bərpa dəyərini əsaslandırır	Seyrək axın və yüksək enerji tələbi
Təhlükəsizlik	LEL/O ₂ və toksiklik riski idarə olunurmu?	İnertləşdirmə, sensor, interlock və vent sistemi mövcuddur	Alışqan qarışıq, qeyri-sabit polimerləşmə riski
Məhsul keyfiyyəti	Bərpa olunan maddə spesifikasiyaya uyğundurmu?	GC/FTIR analizləri və inhibitor nəzarəti təmin edilir	Katalizator zəhərləyicisi və rəng/qoxu problemi
Enerji balansı	Bərpa prosesi resurs qənaətini üstələyirmi?	Enerji sərfi yeni xammal istehsalından aşağıdır	Soyutma/sıxma enerjisi çox yüksəkdir
LCA nəticəsi	Həyat dövrü üzrə emissiya azalırımı?	Net CO ₂ -ekvivalent azalma təsdiqlənir	Emissiya sadəcə başqa mərhələyə ötürülür

Mənbə: müəllif tərəfindən elmi ədəbiyyat və BAT sənədləri əsasında tərtib edilmişdir.

Müzakirə

Təkrar emalın texnoloji baxımdan uğurlu olması üçün ilk prinsip axınların seqreqasiyasıdır. Polimer zavodunda bütün qazların ümumi kollektor sisteminə yönəldilməsi yalnız emissiya nəzarəti baxımından əlverişli ola bilər. Xammal bərpası üçün isə reaktor purjları, həlledici buxarları, qurutma qazları, yanma qazları və diffuz VOC axınları ayrı saxlanmalıdır. Bu yanaşma bərpa mərhələsinin ölçüsünü kiçildir, qarışıq komponentlərin ayrılma mürəkkəbliyini azaldır və təkrar istifadə edilən məhsulun keyfiyyətini

yaxşılaşdırır. Əks halda bərpa prosesinin sonunda alınan qarışıq məhsul yenidən dərin təmizləmə tələb edir və iqtisadi məntiq zəifləyir.

İkinci prinsip “öncə bərpa, sonra destruksiya” məntiqidir. Əgər qaz axınında yüksək dəyərli komponent varsa və onu təhlükəsiz şəkildə ayırmaq mümkündürsə, destruksiya əsaslı oksidləşmə son variant kimi saxlanmalıdır. Bununla belə, bu prinsip mütləq qayda deyil. Bəzi axınlarda monomer polimerləşmə riski, toksiklik, oksigenlə partlayıcı qarışıq yaratma ehtimalı və ya katalizator zəhərlənməsi bərpanı təhlükəli və iqtisadi cəhətdən səmərəsiz edə bilər. Belə hallarda termik və ya katalitik oksidləşmə,

xüsusilə istilik bərpası ilə birləşdirildikdə, daha rasionel seçimdir. Regenerativ oksidləşmə texnologiyalarının VOC emalında tətbiqi üzrə müasir icmallar da bu sahədə enerji səmərəliliyinin və katalitik həllərin inkişaf etdiyini göstərir [12].

Üçüncü prinsip hibrid proses dizaynıdır. Tullantı qaz axınları çoxkomponentli olduğu üçün yalnız kondensasiya və ya yalnız membran qurğusu ilə ideal nəticə gözləmək düzgün deyil. Daha səmərəli sxemlərdə ön soyutma ilə ağır VOC və həlledici fraksiyası tutulur, membranla hidrogen və ya üzvi buxar zənginləşdirilir, PSA ilə yüksək saflıqda məhsul alınır, qalıq axın isə katalitik oksidləşməyə göndərilir. Bu ardıcılıq həm xammal bərpasını, həm də emissiya limitlərinə uyğunluğu təmin edə bilər. Əsas dizayn sualı texnologiyaların hansı ardıcılıqla və hansı sərhəd kompozisiyalarında tətbiq edilməsidir.

Dördüncü prinsip keyfiyyət təminatıdır. Bərpa olunan monomer və həlledici prosesə qaytarılmadan əvvəl yalnız miqdar baxımından deyil, həm də keyfiyyət baxımından təsdiqlənməlidir. Polimerləşmə proseslərində katalizatorlar çox vaxt iz miqdarda su, oksigen, kükürd, xlorlu birləşmələr, ağır metallar və oksidləşmiş üzvi komponentlərə həssasdır. Buna görə bərpa olunan axın üçün GC, GC-MS, FTIR, nəm analizatoru, oksigen analizatoru və lazım gəldikdə on-line proses analitikası tətbiq edilməlidir. Keyfiyyət nəzarəti olmadan təkrar istifadə məhsul keyfiyyətinin dəyişməsinə, rəng və qoxu problemlərinə, katalizator aktivliyinin azalmasına və avadanlıq çirklənməsinə səbəb ola bilər.

Beşinci prinsip proses təhlükəsizliyidir. Polimer istehsalında qaz tullantılarının xammal kimi istifadəsi, əslində, vent qazının yenidən sıxılması, soyudulması, təmizlənməsi və reaktora və ya xammal hazırlama xəttinə qaytarılması deməkdir. Bu prosesdə partlayışdan qorunma, inertləşdirmə, alov tutucular, təzyiqdən mühafizə, fəvqəladə boşaltma, LEL sensorları, oksigen limitləri və idarəetmə interlockları layihənin ayrılmaz hissəsi olmalıdır. Xüsusilə etilen, propilen, butadien, vinilxlorid, stirel və həlledici buxarları olan axınlarda

təhlükəsizlik meyarları iqtisadi meyarlardan əvvəl gəlir.

Ekoloji aspektdə ən mühüm məsələ “tullantısız istehsal” ifadəsinin sadələşdirilmiş qəbul edilməməsidir. Tullantı qazın bərpası lokal emissiyaları azalda bilər, lakin bərpa prosesi üçün elektrik, buxar, soyuducu, vakuum və kompressor enerjisi tələb olunur. Əgər bu enerji yüksək karbon intensivliyinə malikdirsə, həyat dövrü üzrə nəticə zəifləyə bilər. Buna görə hər bir layihədə baza ssenarisi və bərpa ssenarisi müqayisə edilməlidir: baza ssenarisində qaz oksidləşdirilir və yeni xammal alınır; bərpa ssenarisində isə qaz ayrılır, təmizlənir və xammalı əvəz edir. Net ekoloji üstünlük yalnız ikinci ssenarinin ümumi CO₂-ekvivalent, VOC, enerji və xammal göstəriciləri daha yaxşı olduqda təsdiqlənir.

Polimer sənayesində ən tez iqtisadi nəticə verə biləcək marşrutlar həlledici və monomer bərpasıdır. Bu marşrutlarda tutulan maddə eyni istehsal xəttində birbaşa istifadə oluna bildiyi üçün nəqliyyat, bazar riski və əlavə çevrilmə mərhələsi məhduddur. Hidrogen və yüngül karbohidrogen bərpası daha çox inteqrasiya olunmuş neft-kimya kompleksləri üçün uyğundur, çünki alınan məhsulların təzyiq, saflıq və logistika tələbləri mövcud infraquruluşla bağlıdır. CO₂-nin xammal kimi istifadəsi isə strateji və uzunmüddətli istiqamətdir; burada əsas maneə karbonun tutulması deyil, onun aşağı karbonlu enerji və yaşıl hidrogenlə dəyərli məhsula çevrilməsidir.

Tətbiq baxımından müəssisələr üçün mərhələli yol xəritəsi daha məqsədəuyğundur. Birinci mərhələdə qaz axınlarının inventarlaşdırılması və on-line/off-line analiz sistemi qurulmalıdır. İkinci mərhələdə yüksək dəyərli və stabil axınlar seçilərək pilot bərpa sistemi sınaqdan keçirilməlidir. Üçüncü mərhələdə bərpa məhsulunun prosesə təsiri, məhsul keyfiyyəti və təhlükəsizlik göstəriciləri yoxlanılmalıdır. Dördüncü mərhələdə enerji və həyat dövrü təhlili aparılmalı, yalnız müsbət nəticə təsdiqləndikdən sonra tam miqyaslı tətbiqə keçilməlidir. Bu mərhələli yanaşma həm texnoloji riskləri, həm də kapital xərclərini idarə etməyə imkan verir.

Cədvəl 4.

Polimer müəssisəsində qaz tullantılarının xammal kimi istifadəsi üçün mərhələli tətbiq modeli

Mərhələ	Əsas fəaliyyət	Gözlənilən nəticə	Nəzarət göstəricisi
1. İncəlaşdırma	Bütün vent, purj və diffuz emissiya mənbələrinin xəritələndirilməsi	Tullantı qaz pasportu formalaşır	Axın həcmi, tərkib, temperatur, təzyiq
2. Seqreqasiya	Yüksək dəyərli axınların ümumi kollektorla qarışmasının qarşısı alınır	Bərpa üçün daha konsentrasiya xammal alınır	Mono-mer/VOC/H ₂ /CO ₂ payı
3. Pilot bərpa	Kondensasiya, adsorbsiya, membran və ya PSA sınağı aparılır	Texniki işlək sxem seçilir	Bərpa dərəcəsi, saflıq, enerji sərfi
4. Keyfiyyət təsdiqi	Bərpa olunan maddənin proses spesifikasiyası yoxlanılır	Prosesə qaytarma riski azalır	GC, nəm, O ₂ , inhibitor və çirkləndirici analizi
5. LCA və iqtisadiyyat	Baza və bərpa ssenariləri müqayisə edilir	Net ekoloji və iqtisadi əsaslandırma alınır	CO ₂ -ekvivalent, xammal qənaəti, geriödəmə müddəti
6. Tam miqyaslı tətbiq	Avtomatlaşdırılmış təhlükəsizlik və monitoring sistemi ilə inteqrasiya edilir	Dairəvi istehsal elementi formalaşır	Emissiya azalması, iş dayanıqlığı, məhsul keyfiyyəti

Mənbə: müəllif tərəfindən elmi ədəbiyyat və BAT sənədləri əsasında tərtib edilmişdir.

Nəticə

Polimer istehsalında sənaye qaz tullantılarının təkrar emalı və xammal kimi istifadəsi ekoloji modernləşmə, resurs səmərəliliyi və dairəvi iqtisadiyyat baxımından mühüm istiqamətdir. Lakin bu istiqamət yalnız emissiya borusuna əlavə qurğu quraşdırmaqla həll edilmir. Tullantı qazların real xammala çevrilməsi üçün mənbə üzrə seqreqasiya, dəqiq analitik monitoring, təhlükəsizlik analizi, uyğun ayırma texnologiyası, məhsul keyfiyyəti nəzarəti və həyat dövrü qiymətləndirilməsi bir sistem kimi işləməlidir.

Araşdırmanın nəticələri göstərir ki, ən yüksək potensial yüksək konsentrasiyalı monomer və həlledici buxarlarının kondensasiya, adsorbsiya və hibrid ayırma ilə bərpasında müşahidə olunur. Hidrogen və yüngül karbohidrogen tərkibli purj qazları membran və PSA sistemləri ilə daha dəyərli məhsula çevrilə bilər. CO₂ tərkibli axınların polimer və kimyəvi xammal kimi istifadəsi isə texniki baxımdan mümkün olsa da, aşağı karbonlu enerji, yaşıl hidrogen və effektiv katalitik sistemlər olmadan həmişə ekoloji üstünlük yaratmır.

Məqalədə təklif olunan inteqrasiya olunmuş qərar modeli polimer müəssisələrinə tullantı qaz axınlarını "emissiya problemi" kimi deyil, "şərti xammal portfeli" kimi qiymətləndirməyə imkan

verir. Bu modelin əsas ideyası sadədir: stabil və dəyərli axınlar bərpa olunmalı, prosesə qaytarılmadan əvvəl spesifikasiyaya uyğunlaşdırılmalı, bərpası səmərəsiz və təhlükəli axınlar isə istilik bərpası və aşağı emissiyalı oksidləşmə ilə idarə edilməlidir. Belə yanaşma həm xammal sərfini azalda, həm də VOC və istixana qazı emissiyalarının idarə olunmasını gücləndirə bilər.

Gələcək tədqiqatlarda real polimer müəssisəsi üzrə qaz axınlarının kütlə balansı, on-line tərkib monitoringi, pilot membran/adsorbsiya sınaqları və həyat dövrü üzrə müqayisəli qiymətləndirmə aparılması məqsədəuyğundur. Xüsusilə Azərbaycanın neft-kimya və polimer istehsalı mühitində belə yanaşma enerji təhlükəsizliyi, sənaye ekoloji siyasəti və xammal səmərəliliyi baxımından praktik əhəmiyyət daşıya bilər.

ƏDƏBİYYAT SİYAHISI:

1. European Commission. Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers. European Commission; 2007. https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf. Accessed 12 May 2026.

2. Daginnus K, Marty T, Trotta NV, Brinkmann T, Whitfield A, Roudier S. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for

Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector. Joint Research Centre; 2023. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC131915>. Accessed 12 May 2026.

3. Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000;13(6):527-545. doi:10.1016/S0950-4230(00)00007-3.

4. Baker RW. Future directions of membrane gas separation technology. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002;41(6):1393-1411. doi:10.1021/ie0108088.

5. Sircar S. Pressure swing adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002;41(6):1389-1392. doi:10.1021/ie0109758.

6. Grande CA. Advances in pressure swing adsorption for gas separation. *ISRN Chemical Engineering*. 2012;2012:1-13. doi:10.5402/2012/982934.

7. Perez JAS, Cheng A, Ruan X, Jiang X, Wang H, He G, Xiao W. Design and economic evaluation of a hybrid membrane separation process from multiple refinery gases using a graphic synthesis method. *Processes*. 2022;10(5):820. doi:10.3390/pr10050820.

8. IEAGHG. CO₂ as a Feedstock: Comparison of CCU Pathways. IEAGHG Technical Report 2021-02; 2021. [https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2021-02%20CO₂%20as%20a%20Feed-](https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2021-02%20CO2%20as%20a%20Feed-)

[stock%20Comparison%20of%20CCU%20Pathways.pdf](#). Accessed 12 May 2026.

9. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs. The National Academies Press; 2019. doi:10.17226/25232.

10. Artz J, Müller TE, Thenert K, Kleinekorte J, Meys R, Sternberg A, Bardow A, Leitner W. Sustainable conversion of carbon dioxide: an integrated review of catalysis and life cycle assessment. *Chemical Reviews*. 2018;118(2):434-504. doi:10.1021/acs.chemrev.7b00435.

11. Garcia-Garcia G, Fernandez MC, Armstrong K, Woollass S, Styring P. Analytical review of life-cycle environmental impacts of carbon capture and utilization technologies. *ChemSusChem*. 2021;14(4):995-1015. doi:10.1002/cssc.202002126.

12. Yang P, Li X, Zhang Y, Wang J. Regenerative oxidation technology for VOC treatment. *Energies*. 2025;18(13):3430. doi:10.3390/en18133430.

13. Podder J, Singh B, Pal P, Kumar A. A review of carbon capture and valorization technologies. *Energies*. 2023;16(6):2589. doi:10.3390/en16062589.

14. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. ISO; 2006.

TECHNOLOGICAL AND ECOLOGICAL ASPECTS OF INDUSTRIAL GAS WASTE RECYCLING IN POLYMER PRODUCTION

Jalal Rauf NOVRUZOV

Sumgait State University, Master's Student

E-mail: j.r.novruzov@gmail.com

Abstract: The purpose of this article is to systematically assess the possibilities of not only neutralizing industrial gas emissions generated during polymer production but also recycling them and returning them to the technological cycle as secondary raw materials. In polymer manufacturing facilities, volatile organic compounds (VOCs), unreacted monomers, solvent vapors, inert purge gases, hydrogen-rich streams, and CO₂-containing combustion gases create diverse compositions and risk profiles.

The study presents an analytical and technological review based on Best Available Techniques (BAT) documents, scientific sources on VOC recovery, membrane and adsorption technologies, as well as carbon capture and utilization approaches.

The results indicate that for high-concentration and compositionally stable streams, the combination of condensation, adsorption, membrane separation, and Pressure Swing Adsorption (PSA) may be more efficient in terms of raw material recovery. For low-concentration and variable streams, however, energy consumption, safety considerations, and product quality requirements remain limiting factors.

The article proposes a decision-making model integrating source-based segregation of waste gases, preliminary analytical control, technology selection, and quality assurance procedures for reuse. From an environmental perspective, the main conclusion is that the use of waste gases as raw materials can be considered sustainable only when a reduction in life-cycle emissions and a balance of the additional energy burden have been clearly demonstrated.

Keywords: polymer production; waste gases; VOC recovery; membrane separation; carbon capture and utilization; circular economy.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРОВ

Джалал Рауф оглы НОВРУЗОВ

Сумгаитский государственный университет, магистрант

E-mail: j.r.novruzov@gmail.com

Аннотация: Цель данной статьи заключается в систематической оценке возможностей не только обезвреживания промышленных газовых выбросов, образующихся в процессе производства полимеров, но и их переработки с последующим возвратом в технологический цикл в качестве вторичного сырья. На предприятиях по производству полимеров летучие органические соединения (ЛОС), непрореагировавшие мономеры, пары растворителей, инертные продувочные газы, потоки, обогащённые водородом, а также дымовые газы, содержащие CO₂, формируют выбросы различного состава и уровня риска.

В исследовании представлен аналитико-технологический обзор, основанный на документах по наилучшим доступным технологиям (ВАТ), научных источниках по улавливанию и восстановлению ЛОС, мембранных и адсорбционных технологиях, а также подходах к улавливанию и использованию углерода.

Результаты показывают, что для потоков с высокой концентрацией компонентов и стабильным составом сочетание конденсации, адсорбции, мембранного разделения и технологии адсорбции при переменном давлении (PSA) может быть наиболее эффективным с точки зрения возврата сырья. Для потоков с низкой концентрацией и переменным составом ограничивающими факторами остаются энергопотребление, требования безопасности и качество продукции.

В статье предложена модель принятия решений, объединяющая отдельный сбор отходящих газов по источникам образования, предварительный аналитический контроль, выбор технологии переработки и обеспечение качества при повторном использовании. С экологической точки зрения основной вывод заключается в том, что использование отходящих газов в качестве сырья может считаться устойчивым только в случае доказанного снижения выбросов на протяжении жизненного цикла и компенсации дополнительной энергетической нагрузки.

Ключевые слова: производство полимеров; отходящие газы; восстановление ЛОС; мембранное разделение; улавливание и использование углерода; циркулярная экономика.