

Ipari ökológia és hulladékfeldolgozás

Szépvolgyi János, igazgató

Magyar Tudományos Akadémia Kémiai Kutató Központ, Anyag- és Környezetkémiai Intézet
1025 Budapest, Pusztaszeri út 59-67.

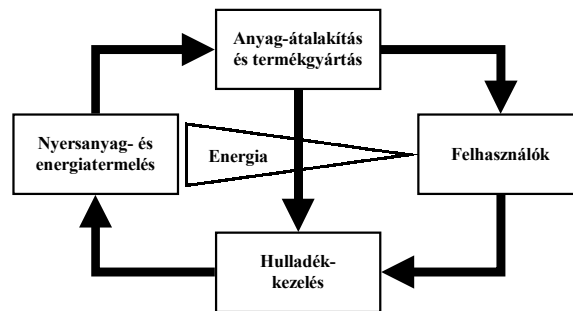
A cikk első része az ipari ökológia általános elveivel foglalkozik. Ezt követi az ipari technológiákban keletkező hulladék rendszerelméleti értékelése és a hulladékcsökkentés lehetőségeinek az értékelése, majd a hulladék csökkentést kiemelt szempontként kezelő környezet orientált folyamat tervezés feladatainak az áttekintése. A ma is létező ipari technológiák esetében az ipari ökológia fő feladata, hogy segítse a hulladékcsökkentés és átalakítás hatékony módszereinek a kidolgozását és megvalósítását. A cikk további része a hulladék feldolgozásának, átalakításának a módszereit tárgyalja, kiemelt figyelmet szentelve a hőplazma rendszereknek, amelyek sokféle hulladék feldolgozási problémára, így a veszélyes hulladékok feldolgozásának problémájára is megoldást jelentenek, valamint példákat mutat be különböző ipari hulladékok a hőplazma módszerrel történő feldolgozására.

Bevezetés

Az ipari ökológia a természeti környezetet és az ipari termelést egyazon rendszer egymással kölcsönhatásban álló részeinek tekinti, és az egész rendszer költséghatékonyságának, teljesítményének és környezeti hatásának optimalizálására (Beck, 1988) törekszik. Az ipari ökológia (i) az anyag- és energiafelhasználás minimalizálásával, (ii) az elfogadható emberi életminőség biztosításával, (iii) az emberi tevékenység környezeti hatásának a természeti környezet fenntarthatóságát biztosító szintre történő korlátozásával, (iv) a rendszerek gazdasági életképességének megőrzésével dinamikus, rendszeralapú keretet nyújt a fenntartható emberi tevékenység számára. Az ipari ökoszisztéma alapvető sajátossága (Garner, 1995):

- az ipari és környezeti rendszerek kölcsönhatásainak rendszerszemléletű vizsgálata;
- az anyag- és energiaáramok, és ezek átalakulásainak együttes figyelembe vétele;
- a technológiai és környezeti problémák multidiszciplináris megközelítése;
- a lineáris (nyitott) rendszerek átalakítása ciklikus (zárt) rendszerekké, úgy, hogy az egyik technológiában képződő hulladék egy másik technológiában alapanyagként hasznosul;
- törekvés az ipari folyamatok környezeti hatásainak csökkentésére;
- az ipari rendszerek és a környezet működésének összehangolása; az ipari rendszereknek a fenntartható környezeti rendszerekhez való hasonlatossá tétele.

Az ipari ökológiai rendszerek bármilyen termelésből, feldolgozásból és fogyasztásból állhatnak. Az ilyen rendszerek öt fő alkotóelemét érdemes megkülönböztetni. Ezek (i) a nyersanyag és alapanyag termelés, (ii) az energiaforrás(ok), (iii) az anyagok átalakításával, feldolgozásával és a termékek gyártásával foglalkozó szektor, (iv) a hulladék feldolgozó szektor és (v) a felhasználó/fogyasztó szektor. Az ilyen rendszerek négy fő csomópontja közötti anyagáramlás erőteljes, s a rendszer minden alkotóeleme abba az irányba fejlődik, amely biztosítja, hogy a rendszer egészének anyag- és energiafelhasználása optimális legyen.



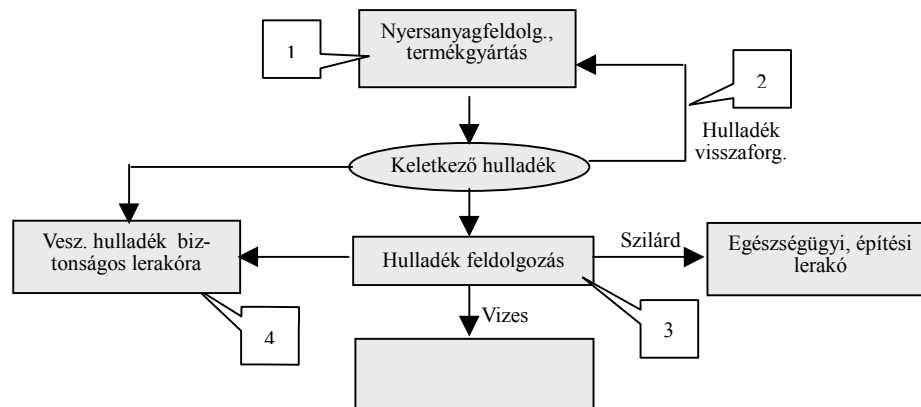
1. ábra Az ipari ökorendszerek fő elemei

Ennek az anyagnak az a célja, hogy elemezzük az ipari ökorendszerek hulladék-feldolgozó részének bizonyos általános problémáit és különleges feladatait. Az említett három témakör (i) ipari ökológia és hulladékképződés csökkentése, (ii) hulladék csökkentése mint az üzemtervezés elválaszthatatlan része, valamint (iii) az ipari hulladék kezelése és feldolgozása.

Ipari ökológia és a hulladékképződés csökkentése

Az utóbbi években a környezeti hatások sokkal nagyobb mértékben befolyásolják az új folyamatok és technológiák tervezését, mint annak előtte. A környezetbarát folyamattervezés feladatának lényege olyan technológiák fejlesztése, amelyek a technológiai alapfolyamatok elválaszthatatlan részeként kezelik a környezetvédelmi szempontokat. Ehhez elvben az anyagfeldolgozó folyamatok optimális kiválasztására van szükség, a műszaki, gazdasági és környezetvédelmi funkciók és korlátok szakszerű és megalapozott meghatározása alapján.

Az ipari ökológia az anyagok hatékony felhasználásáról szól. Egy ipari ökológiai rendszer jellegénél fogva a hulladék csökkentésének és mérséklésének rendszere is. A hulladékok mennyiségének csökkentése során fontos megvalósítani a lehető legtágabb megközelítést. Ennek az az oka, hogy a hulladékképződéssel összefüggő egyik probléma elkülönített kezelése egy másik probléma keletkezésével járhat. A levegő és a víz tisztaságának védelmében idejekorán tett erőfeszítések az ipari tevékenységektől elszigetelt veszélyes hulladék okozta környezetszennyezést eredményeztek. Az ipari ökológiai kulcsfontosságú elemeinek egyike az ipari rendszerekre mint egységes egészre vonatkozó megközelítés; ezért az ipari ökológia rendszere elsősorban és mindenekelőtt egy olyan rendszer, amely a hulladék képződésének megelőzésével igyekszik csökkenteni a képződő hulladék mennyiségét (2. ábra).



2. ábra A hulladékfeldolgozás módszereinek hatékonysági sorrendje a leghatékonyabbtól (1) a legkevésbé hatékonyig (4)

A veszélyes hulladékkal összefüggő számos probléma idejekorán megelőzhető a hulladék képződésének forrásainak a hulladék képződésének megelőzése tette intézkedésekkel (hulladék csökkentése), és olyan kezelési eljárások alkalmazása, amelyek végleges elhelyezést igénylő hulladékok mennyiségeinek csökkentését szolgálják.

A hulladékok mennyiségek többféle módon csökkenthető, többek között a hulladékok forrásainak felszámolásával, a hulladékok leválasztásával és koncentrációjával, az erőforrások visszanyerésével, és a hulladék újrafeldolgozásával. A hulladékok mérséklésének leghatékonyabb módszerei a gyártás körültekintő megszervezése, a kibocsátások figyelembe vétele és a gyártás minden egyes folyamatánál a hulladékképződés csökkentésére kínálkozó lehetőségek maradéktalan kihasználása körül csoportosulnak. A folyamat egészének áttekintésének gyakorta teszi lehetővé a hulladék forrásának azonosítását. miután a forrást azonosították, sokkal egyszerűbb megtenni az intézkedéseket a hulladék megszüntetésére vagy csökkentésére. A hulladékok csökkentésének leghatékonyabb módszere annak megértése és megértetése, hogy a hulladék korlátozása elválaszthatatlan része az üzem és a folyamat tervezésének.

Környezetközpontú folyamat tervezés

Az utóbbi időben az új folyamatok és technológiák fejlesztése során a korábbiaknál lényegesen komolyabban veszik figyelembe a környezetvédelmi megfontolásokat. A környezetközpontú folyamattervezés feladatának lényege a technológiák fejlesztése során a környezetvédelmi technológiák figyelembe vétele és beágyazása a technológia alaplépéseibe. Ehhez elvben arra van szükség, hogy a megfelelő műszaki, gazdasági és környezetvédelmi célfunkciók és korlátozások alapján optimálisan válasszuk meg az anyagok feldolgozásának egyes lépéseit.

Az anyagok átalakítására alkalmas folyamatok és a szükséges termelőeszközök kiválasztása, valamint az anyag-, energia- és információáramlás tervezése rendkívül összetett feladat. A problémák összetett jellegének forrásai a következők:

- különböző célokat kell mérlegelni, és ezek általában egymással ellentmondásosak és egymással nem összehasonlíthatóak,
- tekintettel kell lenni a hierarchia (üzem, gazdaság) magasabb szintjein elhelyezkedő rendszerek optimális megépítéséből keletkező korlátokra,
- az egyik kulcsfontosságú tényező a potenciális környezeti hatások értékelése, ily módon a környezetvédelem a folyamattervezés alapvető céljainak egyike.

Amint arról korábban már szóltunk, az iparban a környezetvédelmi hangsúlyok elmozdultak a hulladékképződés csökkentése felé. Legfontosabb eszközeinek egyike az elsődleges anyagok feldolgozása során képződő hulladékanyagok és hulladékenergiák újrafeldolgozása az anyagok és energia átalakítási folyamatainak integrációjával a teljes technológiába.

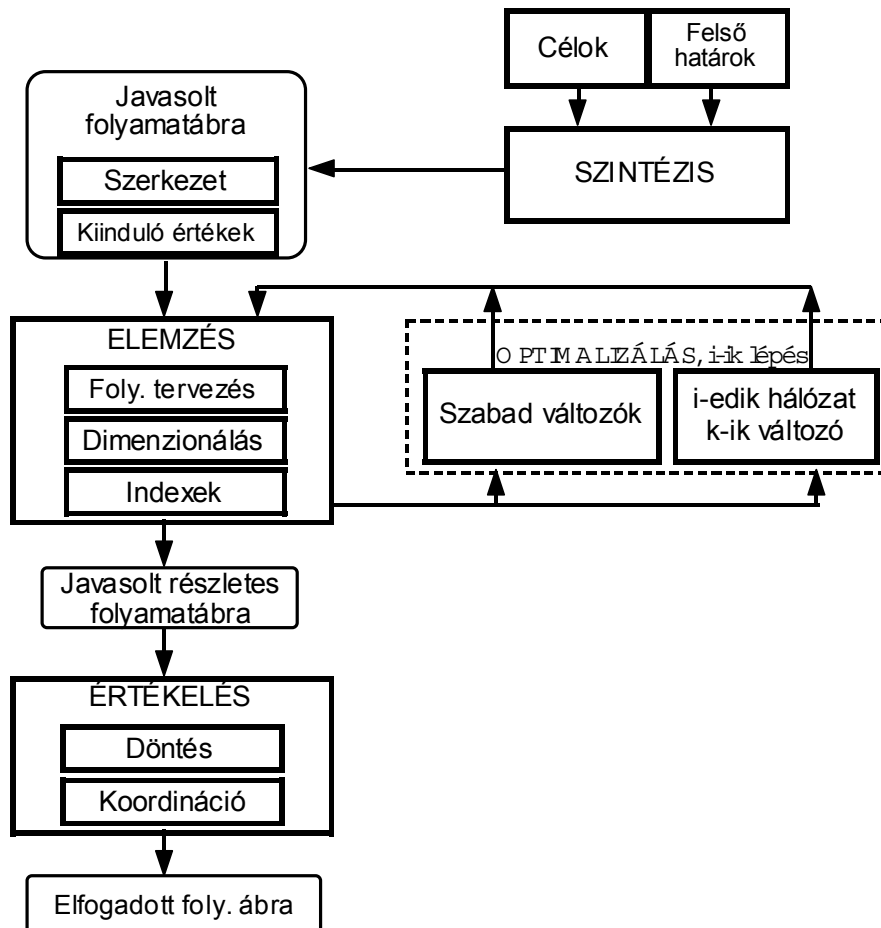
A környezetbarát folyamattervezés legfontosabb lépései a szintézis, az elemzés, az optimalizálás és az értékelés (3. ábra). Új folyamatok tervezésénél azonban a szintézis szerepe meghatározó.

A szintézis jellegű feladatok megoldása során a szimulációhoz és folyamatszabályozáshoz képest új elméletekre és módszerekre van szükség. A szintézis során az alábbi tételeket kell figyelembe venni és mérlegelni: a folyamat elemeinek száma, jellege, régiók és a tervezés kezdeti változóinak eredeti értékei, a folyamat egyes elemeit összekapcsoló anyag- és energiaáramlások kezdeti és végpontjai, és az egyes konkrét áramlások régiói és kezdeti értékei.

A 3. ábra szemlélteti a hierarchikus folyamattervezés további lépéseit. A tervezés a rendszer legbelsőbb része, a kémiai reaktor fejlesztésével veszi kezdetét. A következő lépés a recirkuláció tervezése, ezt követi az energiaáramlások tervezése és a kisegítő anyagok

mozgásainak tervezése. Végül figyelembe veszik a környezetvédelmi kapcsolódási pontokat. Ez azt jelenti, hogy a folyamatot rendszerszerűen, a döntési szintek hierarchiájának megfelelően építik fel. Ebben az eljárásban a folyamat egyre több részletét dolgozzák ki, ehhez felhasználják a hierarchikus szabályokat. Ezt követi a gazdasági indexek kalkulációja, elemzése és értékelése. A hierarchikus szabályok alapjai a következők:

- egyszerű tudományos és gazdasági ismeretek és tapasztalatok,
- minőségi műszaki tervezési megfontolások, valamint
- mennyiségi megfontolások és számszerű vizsgálatok.



3. ábra A környezetközpontú folyamattervezés sémája

Korábban a célzott funkció és korlátjai alapvetően gazdasági megfontolások alapján alakultak ki, miközben a többi szempontot, például a folyamatszabályozást, a működőképességet, a megbízhatóságot, a biztonságot és a környezetvédelmi rendelkezéseket csak a gazdasági paraméterek kiegészítőiként mérlegelték. Napjainkban azonban a környezetvédelem a folyamattervezés szabályozó elveként működik. Az érvényesítés legfontosabb eszközei:

- átállás hulladékszegény technológiákra,
- az elkerülhetetlen hulladék újrafeldolgozása és hasznosítása,
- hulladékanyagok és hulladékenergiák célzott felhasználása a hulladékoknak az anyag- és energia átalakítás folyamatába történő integrációjával.

A környezetközpontú folyamattervezés célja nem csupán a tervezési problémák kombinatorikus kezelése, hanem a hulladékszegény vagy elhanyagolható mennyiségű

hulladék képződésével járó integrált folyamatok fejlesztése. Ily módon a hulladék felszámolása mellett számottevő gazdasági haszon is képződik.

Ipari hulladékok feldolgozása

A hulladékkal kapcsolatos problémák kezelésében megjelenő új módszerek ellenére, a hulladék feldolgozásának és újrahasznosításának legelterjedtebb gyakorlata napjainkban az anyagfeldolgozás. Az újrafeldolgozás és feldolgozás olyan széles körben terjedt el, hogy egy gazdasági rendszerben akár egy különálló hulladék-feldolgozó ágazatról is beszélhetünk. Ide tartoznak olyan cégek, amelyek kifejezetten az újra feldolgozható anyagok gyűjtésével, elkülönítésével és feldolgozásával, illetve a végfelhasználók közötti elosztásával foglalkoznak. Az ilyen tevékenységet végezhetik magánvállalkozások, de elképzelhető valamilyen együttműködés állami vállalatokkal. Ezt a tevékenységet gyakorta határozzák meg olyan törvények és rendeletek, amelyek büntetni rendelik a használt tételek és anyagok eldobását és pozitív gazdasági és szabályzó intézkedésekkel ösztönzik az újrafeldolgozást.

Egy valódi és teljes ipari ökorendszer ismérve, hogy az anyagok közel 100%-át újra feldolgozzák. Tekintettel arra, hogy az összes szükséges elem és a képződő hulladékenergia szállítása véges, az alapvetően teljes újrafeldolgozás elvben elérhető. Az ipari ökológia legfontosabb célja olyan hatékony újra feldolgozó technológiák fejlesztése, amelyek a lehető legkisebb mértékre csökkent az eredeti alapanyagok iránti igényt. Egy másik cél olyan változtatások végrehajtása a folyamatban, amelyek kizárják a mérgező anyagok, többek között nehézfémek disszipációs felhasználását.

Az újrafeldolgozás mérlegelése során az ügyeket négy különböző kategóriába sorolhatjuk. Az elsőbe tartoznak az bőségesen és természetesen, a fogyasztási cikkeknel alapvetően korlátlan mennyiségben előforduló elemek. A fogyasztásra szánt termék az élelmiszer. Az újra feldolgozható anyagoknak ebbe a kategóriájába sorolható anyagok kikerülnek a környezetbe és természetes folyamatokon keresztül újrahasznosulnak, mint például a termőtalaj trágyázásához használt derítési iszap.

Az újrahasznosítható anyagok második kategóriájába sorolandók az olyan elemek, amelyekből nincs ugyan hiány, de az anyagok különösen könnyen elérhetőek az újrafeldolgozás számára. Az ebbe az osztályba sorolandó árucikkek legszemléltetőbb példája a papír. A világ papírtermelésének több mint egyharmadát napjainkban újra feldolgozott alapanyagokból állítják elő, és ennek az arálynak az elkövetkező néhány évtizedben el kell érnie az 50%-ot. A papír újrafeldolgozását ösztönző legfontosabb tényező nem a papír előállításához szükséges fa hiánya, sokkal inkább a papírhulladék elhelyezéséhez szükséges személtlerakó, tároló kapacitás hiánya.

Az újrahasznosítható anyagok harmadik kategóriája azok az anyagok, alapvetően fémek, amelyekből a világon rendelkezésre álló tartalékok, készletek alacsonyak. Az ilyen anyagokhoz tartozik a nemesfémek platina csoportja. Az újrafeldolgozás lehető legerőteljesebb ösztönzése mellett is feltételezhető, hogy az ilyen anyagok eredeti forrásaiból olyan hiány keletkezik, amely a közeljövőben újrafeldolgozással nem pótolható.

Az újrafeldolgozásra érdemes és ilyen szempontból mérlegelendő anyagok negyedik kategóriája a hulladékok, az alkatrészek és az elhasznált eszközök, például autóalkatrészek. Az ilyen alkatrészek számos esetben felújíthatók és újrahasznosíthatók. Még akkor is azonban, ha ez nem így van, a felvásárlási kötelezettség alá tartozó jelentős készletek és az eddiginél szigorúbb környezetvédelmi rendeletek ösztönözhetik az újrafeldolgozást.

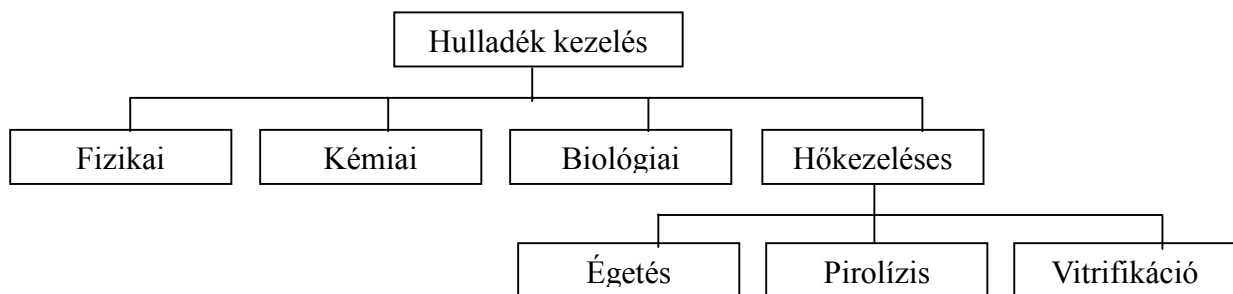
Érdemes említést tenni arról is, hogy az újrafeldolgozás önmagában is környezetvédelmi aggályokat vet fel. A legnagyobbak egyike az újra feldolgozott anyagok szennyezése veszélyes és mérgező anyagokkal.

A hasznos anyagok esetenként hulladékbányászatnak nevezett kiaknázása bizonyos jelentős, eddig kihasználatlan lehetőségeket kínál az elsődleges alapanyagok felhasználásának

csökkentéséhez. A hulladékbányászat gyakorta kihasználhatja azt a kétségtelen gazdasági előnyt, hogy a hulladékok, például a füstgázok kezelése során szükségszerűen különböző költségek merülnek fel. Miután napjainkban rendelet írja elő, hogy a keletkező füstgázból el kell távolítani a kéndioxidot, a kén nem hasznosításával szemben a kén visszanyerésének többletköltsége gazdaságossá teheti a kén visszanyerését.

Számos előnye van annak, ha sikerül hulladékból visszanyerni egy hasznos erőforrást. Az egyik, hogy a primer forrásból kevesebb erőforrásra van szükség, így a hulladékforrások hasznosításával meg lehet óvni a jövő számára az elsődleges forrást. Egyes esetekben a hulladékok „energiabankoknak” is tekinthetők; ilyenek például az alumíniumtartalmú hulladékok. A másik kétségtelen előny, hogy egy erőforrás kivonása a hulladékból csökkentheti a hulladék potenciális környezetkárosító hatását.

A hulladékfeldolgozásnak elvben négy fő módszere létezik, többek között a fizikai, a vegyi, a biológiai és a hőtechnikai módszer (lásd 4. ábra). Ebben az anyagban elsősorban a hulladék hőkezeléses feldolgozásával kívánunk foglalkozni, különös tekintettel a hőplazmák mint hőforrások hasznosítására.



4. ábra A hulladékkezelés módszerei

A hulladékfeldolgozás hőkezeléses módszere

A hulladékfeldolgozás termikus módszerei három csoportba sorolhatók. Ezek: az égetés, a pirólízis és a vitrifikáció.

Az égetéshez hozzátartozik többek között a hulladékok oxidatív viszonyok között, a 300 °C és 1200 °C közötti hőmérséklettartományban történő hőkezelése. Ilyen feltételek mellett a hulladékok az oxidáció hatására felbomlanak, és egyszerűbb vegyi összetételű gázok, folyadékok és szilárd halmazállapotú anyagok keletkeznek. Időközben a szilárd halmazállapotú rész tömege és térfogata számottevően csökken. Az égés szilárd halmazállapotú termékei között megtalálható többek között a pernye és a salak, ezek az anyagok azonban számos esetben veszélyesebbek az eredeti hulladékoknál, mivel a hulladékok legveszélyesebb elemeit koncentrálnak. Az égés melléktermékeként keletkező füstgázok káros gázokat és szilárd halmazállapotú részecskéket tartalmazhatnak. Ezért az égetési technológia elválaszthatatlan része minden esetben a hatékony gázkezelés.

A pirólízis az oxigén hiányában, hő hatására végbemenő kémiai bomlási folyamat. A pirólízis során a hulladékokat a sztoichiometrikai mennyiségeknél kevesebb oxigén jelenlétében nagyon gyorsan felmelegítik. A folyamat során az alkalmazott hő hatására a vegyi kötések felbomlanak. Az így képződő elemek lehűlés közben újraegyesülnek és egyszerűbb vegyületeket alkotnak. A felmelegítés és hűtés feltételeinek szakszerű beállításával lehetővé tesszük, hogy a legveszélyesebb hulladékokból környezeti szempontból kevésbé veszélyes anyagok keletkezzenek.

A vitrifikációs eljárás alapja, hogy a hulladékok szervesetlen alkotóelemeiből magas hőmérséklet hatására üvegszerű olvadék képződik. Az alkáli és alkáliföldfém oxidokat

tartalmazó adalékok elősegíthetik az olvadék képződését. A hűtést követően az olvadék egy olyan mátrixot képez, amelyben a hulladékok veszélyes fémösszetevői (pl. As, Cd, Pb) vegyi értelemben stabilak. A keletkező üveges salak egy mechanikai és kémiai értelemben stabil rendszer, amely a hulladék elhelyezése vagy hasznosítása során megakadályozza a fémeknek a rendszerből való kiszabadulását.

A magas hőmérsékletű hőplazma különösen alkalmas eszköznek tűnik a veszélyes hulladékok hőkezelésére. A plazma állapot az anyag negyedik állapota: szilárd, folyékony, gáz és plazma. A műszaki gyakorlatban széles körben alkalmazzák az elektronok, ionok és semleges részecskék elegyéből álló gáznemű plazmákat. A hőplazmák 10^4 K körüli hőmérsékleteket szabadítanak fel, jellemzőjük a magas energiasűrűség. A konkurenciát jelentő technológiákkal szemben a hőplazma-feldolgozás többféle előnnyel jár:

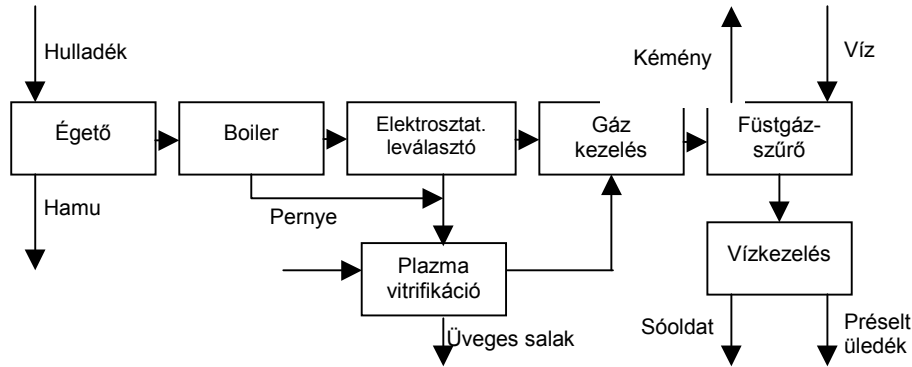
- A rendkívül magas fűtési sebességek és a hőplazmákban elérhető magas hőmérsékletek lehetővé teszik a szerves anyagok gyors és tulajdonképpen teljes bomlását.
- A hő hatására bekövetkező bomlás során képződő részecskék nagyon rövid idő alatt lehűlnek és eléri a plazma lángja körüli hőmérsékletet; a nem kívánatos rekombináció valószínűsége csekély, és ilyen viszonyok között különleges kémiai és fizikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok keletkeznek.
- A plazmareaktorok magas energiasűrűsége lehetővé teszi, hogy azonos hulladék-áteresztőképességnél kisebb berendezések készüljenek, így csökkennek a beruházási költségek, és ez a lehetőség kedvez a kis mobil egységek építésének.
- A hőplazma-reaktorok gáznemű anyagban számolt teljes áteresztőképessége viszonylag alacsony, aminek következménye a füstgáz kezelésére rendelkezésre álló csökkentett kapacitás.
- A hőplazmák ultraviola-sugárzása fokozza a szerves halogén vegyületek bomlását.

A hőplazma folyamatok összes felsorolt előnyére való tekintettel nincs semmi meglepő abban, hogy világszerte számtalan olyan fejlesztés van folyamatban, amelynek célja a hőplazmák alkalmazása a hulladékfeldolgozásban.

A hőplazmák alkalmazása a hulladékfeldolgozásban az elmúlt két évtizedben nagymértékben átalakult. Az alkalmazás kezdeti szakaszában az összetételük vagy külső megjelenésük miatt más módszerekkel nem kezelhető veszélyes hulladékokat, például azbesztport, különböző fémtartalmú porokat és az egészségügyben képződő hulladékokat hőplazmákban dolgozták fel.

A pernye vitrifikációja (üvegesítése)

A közelmúltban kiemelt problémává nőtte ki magát az önkormányzati hulladékégetőkben képződő pernye vitrifikációja. Világszerte égetéssel csökkentik a kommunális hulladék térfogatát és tömegét. A hagyományos hulladékégetők működtetése azonban műszaki és környezetvédelmi értelemben két súlyos gonddal jár. Az első probléma abból ered, hogy egy hatékony égetési technológiához jelentős levegő (oxigén) többletre van szükség. Hatalmas mennyiségben képződnek füstgázok, és az egyre több és szigorúbb emissziós szabvány érvényesítéséhez meg kell oldani ezeknek a füstgázoknak a hatékony kezelését. Ehhez jelentős gázfeldolgozó kapacitások létesítésére van szükség. A másik nehézség abból a tényből ered, hogy minden tonna elégetett önkormányzati hulladék után 30-50 kg pernye képződik, amely mérgező fémeket tartalmaz. Az eredeti hulladékban fellelhető higany 25%-a, kadmium 90%-a, ólom 40%-a és cink 50%-a a pernyében is fellelhető. Ezért a pernye rendkívül súlyos környezeti veszélyt jelentő melléktermék.



5. ábra Az EUROPLASMA égetőművi pernye vitrifikációjának folyamata

A pernye stabilizációja hőplazma-technológiával megfelelő környezetvédelmi megoldásnak tűnik. Az EUROPLASMA (5. ábra) kifejlesztett egy technológiát a pernye vitrifikációjára, plazmaéggő alkalmazásával. A folyamatot beépítették a Bordeaux közelében, Franciaországban működő égetőműbe. Az EUROPLASMA eljárás fő sajátosságai a következők:

- Az égetőmű kemencéjében és az elektronikai leválasztóban leválasztott pernyét közvetlenül adagolják a vitrifikáló egységbe, ahol 1200-1500 °C hőmérsékleten nagyon rövid időn belül olvadékká alakul át.
- Adalékok, többek között mész, kovásva és alumínium segíti a vitrifikáció folyamatát.
- A pernye jelentős mennyiségben tartalmaz különböző sókat, amelyek a gőzfázisban érintkezésbe lépnek a nehézfémekkel és illékony vegyületeket hoznak létre. Ezt a nehézfémek ellenőrzött oxidációjával és magas olvadáspont jellemezte oxidok képződésével lehet kiiktatni.
- A pernye minősége széles határértékek között változhat; rugalmas melegítésre van szükség. Ezért ebben a rendszerben egy átvitt ívplazma-éggőt, illetve plazmagázként levegőt alkalmaznak.

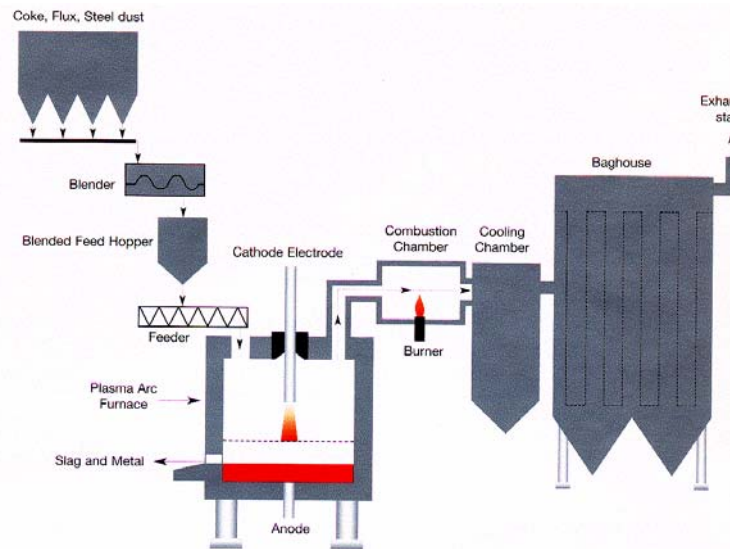
A plazmatechnológiát a pernye összes mennyiségének kezelésére fejlesztették ki. Ugyanakkor az égetés mérgező maradványa nem szállítható. Az üzem üzemeltetése optimális, hiszen az üzem személyzete a vitrifikációs egység működtetéséért is felelős. A vitrifikációs egység naponta 10 tonna pernye feldolgozására képes, így módon 200 kg üvegesített salakot állítanak elő. A folyamat energiafogyasztása 1 kg pernyére vetítve kevesebb mint 1 kWh. A vitrifikált salak jellegét több vizsgálat során ellenőrizték. Az összes eredmény alatta volt a környezetvédelmi rendeletekben engedélyezett határértékeknek.

A DUNAFERR Magyarország, üzemében acélgégyártás során képződő por feldolgozása

A kohászati hulladékok feldolgozására alkalmas első plazmakemencét az Egyesült Államokban, Angliában, Svédországban és Dél-Afrikában helyezték üzembe a hetvenes évek végén. A kezelt hulladékok a vaskohászatban és színesfémkohászatban és az öntödei technológiában képződő különböző porokat, autóiparban alkalmazott katalizátorokat és poros krómércet tartalmaztak.

A DUNAFERR Rt., a legnagyobb magyarországi vas- és acélműben évente közel 30 000 tonna por képződik. Ez a por 19 500 tonna vasat, 1300 tonna cinket, valamint 100 tonna ólmot, tartalmaz. Cink- és ólomtartalma miatt ez az anyag az acélművekben nem használható, ezért ezt veszélyes hulladékként kell elhelyezni. Jelentős mennyiségű cinket tartalmazó egyéb kohászati hulladékok képződnek a DUNAFERR galvanizálójában, ezek mennyisége közel 300 tonna/év.

Intézetünk a DUNAFERR megbízásából megvalósított egy K&F projektet, amelynek célja egyrészt meghatározott hulladékok vitrifikációs technológiájának fejlesztése, másrészt ezeknek az anyagoknak értékes termékekké történő átalakítása.



6. ábra A DUNAFERR kohászati hulladékokat vitrifikáló technológiája

A TETRONICS közreműködésével kifejlesztett vitrifikációs technológia lényegét a 6. ábrán szemléltetjük. A technológia fő egysége egy ívplazma-kemence, amelynek elektromos bemenő teljesítménye 5 MW. Az acéltiparban képződő finom port összekeverik a tüzi horganyzás során képződő salakkal, koksszal és üvegekészítő adalékokkal (elsősorban kvarchomokkal), majd ez az elegy bekerül a plazmakemencébe. Ily módon a plazmatechnológiai feldolgozás csökkentett értékek, feltételek mellett történik. Létrejön egy króm- és molibdéntartalmú vasötvözet. A másik fő termék egy ömlesztett, olvasztott salak, amely alkalmas különböző vitrifikációs (üveg-) termékek előállítására (7. ábra). Az elkészült termékeket széles körben lehet alkalmazni az építőiparban.



7. ábra Kohászati hulladékból hőplazma eljárással nyert üvegtermékek

A technológia előnyei az alábbiakban foglalhatók össze:

- Ez egy nagyteljesítményű, a világ több mint 30 acélművében alkalmazott technológia.
- A technológia az üvegesített termékek forgalmazásának köszönhetően gazdasági szempontból megvalósítható.

- Lehetőség van a különböző nagyságú szemcsékből álló porok előzetes agglomeráció nélküli feldolgozására.
- A plazmakemence magas energiasűrűséggel, azaz nagy teljesítménnyel működik; az üzem nagysága és a beruházási költségek kisebbek nem éri el az egyéb hőtechnológiákra jellemző nagyságrendet. A folyamat feltételei könnyen és pontosan szabályozhatók.
- A hulladék cinkoxid-tartalma a füstgázzal elpárolog; a porleválasztó egységben visszanyerhető és finom porként a festégyártásban újrahasznosítható.
- Az acélgégyártás technológiájában képződő és az acélművekben képződő porban előforduló szerves szennyezőanyagok, például a dioxin és a furánok lebomlanak, és a bomlás termékei veszélytelenek.
- A fémösszetevők nem választhatók le az üvegszerű termékektől; ezek a termékek minden vonatkozásban megfelelnek a legszigorúbb környezetvédelmi előírásoknak.

Laboratóriumi és kísérleti vizsgálatok alapján a magyarországi viszonyok között is elvégeztük a technológia megvalósíthatósági elemzését. A kalkuláció és elemzés fő eredményei az alábbiakban foglalhatók össze:

- Az üzem teljesítménye: 40 000 tonna/év
- Beruházási költségek: 10 000 000 USD
- Működési költségek: 75 USD/tonna por
- Jövedelmek: 232 USD/tonna por (beleértve a hulladék-elhelyezési költségek kiiktatásával elért megtakarításokat)
- A tőke megtérülésének időtartama: kevesebb mint 2 év

Veszélyes szerves hulladékok feldolgozása hőplazmákban

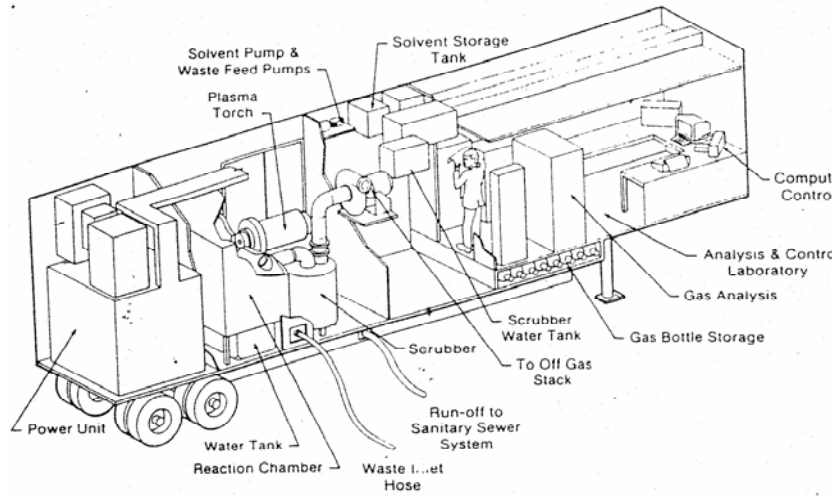
Az ipari eredetű szerves hulladékot, például az elhasznált oldószereket korábban égetéssel semmisítették meg. A hagyományos hulladékégetők azonban 1200 °C-nál alacsonyabb hőmérsékleten működnek. Ezért a klórtartalmú szerves hulladékok, például a PCB maradéktalan bomlása ezekben a létesítményekben meg megoldható, ezért az innen kikerülő gázok jóval a rendeletekben előírt értékeknél nagyobb mennyiségben tartalmaznak klórszármazékokat. Emellett a nem teljes égés termékei részt vehetnek a heterogén módon katalizált reakciók a pernyerészececské felületén. Ezekben a reakciókban erősen mérgező vegyületek, például poliklorinált dibenzo-p-dioxinok (PCDD) és poliklorinált dibenzofuránok (PCDF) képződhetnek. A folyamat kritikus paraméterei a szerves kloridok jelenléte és a 800 °C és 300 °C közötti hőmérséklettartományban ható hűtő reaktív vegyületek tartózkodási ideje.

A PCDD és a PCDF jelentette kockázat a hőplazmában a hulladék megsemmisítésével kezelhető. A hőmérséklet elegendő $1000 \text{ K}\cdot\text{ms}^{-1}$ teljes megsemmisítéséhez és nagyon gyors hűtéséhez a plazmarendszerekben; ez az eljárás elhanyagolható mértékre csökkenti a PCDD/PCDF képződését.

A WESTINGHOUSE Co. által kifejlesztett PYROPLASMA technológiában a szerves oldószerekkel összekevert poliklorozott szerves hulladékokat egy plazmareaktorba injektálják. A forró plazmagázban, ahol fenntartják az oxidáció feltételeit, végbemegy a PCB teljes bomlása. A füstgázt lúgos kezelésnek vetik alá. Kiderült, hogy a plazmaegységek képesek elérni vagy meghaladni a legtöbb szerves vegyület kezelésére érvényes, 99,9999%-os megsemmisítési és eltávolítási hatékonyságot (DRE).

A PYROPLASMA technológia prototípusát egy mobil egységen installálták (8. ábra). Ez a megoldás hulladékszállítás nélkül is lehetővé teszi a helyi szennyezések felszámolását. Az

ötlet különösen vonzóknak tűnik a magyar viszonyok között: az ország területén számos távoli veszélyes hulladék-lerakóhely található.



8. ábra Mobil plazmareaktor veszélyes hulladék feldolgozására (PYROPLASMA)

Következtetések

Szinte bizonyosra vehető, hogy az ipari ökológia koncepciója az ipar és a környezetvédelem összekapcsolásának leginkább megvalósítható modellje. Az iparban rendkívül gyors elmozdulás bontakozott ki a környezetre vonatkozó új értékek felé. Az ipari ökológia kínalta előnyök lényege, hogy ez a technológia koherens kerettel szolgál az ipar környezetvédelemmel összefüggő kérdéseinek teljes spektrumára vonatkozó gondolkodás és intézkedések meghatározásához.

Napjainkban az ipar legfontosabb feladatainak egyike az alkalmazott technológiák környezetvédelmi hatásainak a csökkentése. A stratégia egyik kulcsfontosságú tényezője a hulladékok, különösen a veszélyes hulladékok feldolgozása.

A hőplazma-technológiák egyedülálló megoldást kínálnak a hulladékfeldolgozás számos problémájára, különösen a veszélyes hulladékok kezelésére. A napjainkban alkalmazott megoldásokon túl a hőplazma-technológiák jövőben hasznosítható lehetőségei alapvetően három tényezőtől függenek: az egyik az energiafogyasztás csökkentése, a másik a környezetvédelmi rendeletek kritériumainak változása, és a harmadik a gazdasági feltételek.

A hulladékfeldolgozásra vonatkozó hőplazma-technológia megvalósítása a közép-európai régióban különösen jelentős előrelépést jelentene a környezetvédelemben. Ezt csak az érdekazonosság alapján, az állam és a magántőke együttműködésével lehet megvalósítani.

Felhasznált irodalom

Beck, D., Boyack, K. and Berman, B.: *Industrial Ecology – Prosperity Game®* Technical Report, Scandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1998. pp. 1-186.

Fonyó, Zs., Szépvölgyi, J., Harangozó G.: *Preventive methods of environmental protection in the Hungarian chemical industry* (in Hungarian). Institute of Environmental Science, Budapest University of Economics, Budapest, 2002. pp. 1-81.

Garner, A. and Keoleian, G. A.: *Industrial Ecology: An Introduction*. National Pollution Prevention Center, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1995. pp. 1-27.

Manahan, S.: *Environmental Chemistry*, 7th Edition, Lewis Publishers, Boca Ranton, London, 2000. pp. 1-898.