

Az ipari ökológia klasszikusai^{1,2}

Gyártási stratégiák

Az egyik ipari folyamatból származó hulladék nyersanyagként szolgálhat egy másik folyamatban, ezáltal csökkentve az ipar hatását a környezetre.

Robert A. Forsch és Nicholas E. Gallopoulos

Frosch, RA, N. Gallopoulos (1989) - Scientific American 261 (3) :144-152

Az emberek új technológiákat és iparágakat hoznak létre, hogy az emberi szükségleteket hatékonyabban és alacsonyabb költséggel elégítsék ki. A haladás egyik fő hajtóereje az innováció, de az újítók hiányos ismeretei egyes esetekben nemkívánatos mellékhatásokat okoznak. Az új találmányok ilyen előre nem látható következményei nem egyedülállóak a 19. és a 20. század lázas iparosításában. Az ókori görög mítoszok szerint Pandora doboza tele volt csapásokkal, Prométheuszt büntették, mert ellopta a tüzet az istenektől, és Ikarusz lezuhant az égből, amikor a Nap hője megolvasztotta szárnyain a viaszt. A történelmi időkben az áttérés nyersbőrrel a cserzett bőrre - bár a belőlük készült ruhák és eszközök sokkal tovább tartottak, és kényelmesen viselhetők és használhatók voltak - bűzt és a betegséget hozott, ezért a cserzőüzemeket el kellett különíteni a közösségektől, amelyeket szolgáltak.

Ma az ilyen nemszándékolt hatásoknak lehet akár globális következménye is. Vegyük például a klórozott fluorozott szénhidrogének felfedezését. A CFC 1930-as évekbeli kifejlesztése előtt a hűtőszekrények kompresszorai ammóniát vagy kén-dioxidot tartalmaztak. Mindkét vegyület toxikus, így ha szivárgás fordult elő, az sok ember sérülését vagy halálát okozta. A CFC-vel megmentettek életet, pénzt takarítottak meg, valamint lehetővé tették, hogy a légkondicionált épületek és a tartós élelmiszerek a modern életünk részévé váljanak. A légkörkutatók csak később állapították meg, hogy a CFC-k hozzájárulnak a globális felmelegedéshez, és az ózon bontásával befolyásolják a felső atmoszféra összetételét.

1 A szerzők által javasolt eredeti cím "Gyártás - az ipari ökoszisztéma szemlélet", de nem fogadták el!

2 Utánnyomás engedéllyel. Szerzői jog 1989 Scientific American, Inc. Minden jog fenntartva.

Ezek a kudarcok nem kisebbítik azt a tényt, hogy a technológia mindenhol nagy fejlődést jelentett sokaknak. A világnak számos részén jobb ma az életszínvonal, mint volt 20 vagy 30 évvel ezelőtt. Az iparosodás okozta számos káros hatást további technológiai alkalmazásokkal tartják kordában. Mégis, ahogy a világ népessége és az életszínvonal emelkedik, néhány régi megoldás az ipari szennyezések és a mindennapi hulladékok kezelésére már nem működik. Ugyanis gyakran nincs „másik fele a településnek”, ahová a cserzőműhelyek modern megfelelőit telepíteni lehetne; és nincs már üres terület a falu határain túl, ahová a hulladékot károközás nélkül el lehetne helyezni.

2030-ra vélhetőleg 10 milliárd ember él ezen a bolygón; és ideálisan mindenki olyan ipari demokráciák életszínvonalán él, mint az Egyesült Államok vagy Japán. Ha a pótolhatatlan természeti erőforrásainkat, mint például a rezet, kobaltot, molibdént, nikkelt és az olajat olyan ütemben fogyasztják, mint jelenleg az USA, és ha új erőforrásokat nem fedeznek fel, vagy helyettesítőket nem fejlesztenek ki, akkor egy ilyen ideális helyzet legfeljebb egy évtizedig tarthatna. A könyvelés hulladék oldalát tekintve, az USA jelenlegi ütemében ez a 10 milliárd ember 400 milliárd tonna szilárd hulladékot termelne évente, ami elegendő Los Angeles 100 méter mély betemetéséhez.

Ezek a számítások nem egy komor jövő lefestését szolgálják. Ellenkezőleg, szeretnék felhívni a figyelmet a visszaforgatás, a takarékoság és az alternatív anyaghasználatra való átállás fontosságára. Ez vezet a felismeréshez, hogy a hagyományos ipari tevékenység modelljét, amelyben egyedülálló gyártási folyamatok során a bekerült nyersanyagból eladásra váró termékeket valamint ártalmatlanításra kerülő hulladékot állítanak elő, át kell alakítani egy integrált modellé: ez az ipari ökoszisztéma. Egy ilyen rendszerben az anyag és energiafogyasztás optimális, a keletkező hulladék minimális, és ami az egyik folyamatból kikerül, legyen az akár olajfinomítás elhasznált katalizátora, villamos energiatermelés pernyéje és hamuja, vagy valamilyen fogyasztói termék eldobott műanyag palackja, az egy másik folyamat nyersanyagaként szolgál.

Az ipari ökoszisztéma úgy működne, mint egy biológiai ökoszisztéma hasonmása. (A növények által szintetizált tápanyagokat a növényevők elfogyasztják, majd ők a húsevők táplálékláncába kerülnek, végül a húsevők hulladékai és tetemei a növények következő generációit táplálják.) Az ideális ipari ökoszisztémát soha nem lehet elérni a gyakorlatban, de ahhoz, hogy minél jobban megközelíthessük, mind a gyártóknak, mind a fogyasztóknak meg kell változtatniuk szokásaikat, ha az iparosodott világ szeretné megőrizni életszínvonalát, és a fejlődő országok is egy hasonló szintet kívánnak elérni káros környezeti hatások okozása nélkül.

Robert A. Forsch és Nicholas E. Gallopoulos

Ha az iparosodott és a fejlődő országok mind felkarolják a változásokat, akkor lehetővé válik egy zártabb ipari ökoszisztéma kialakítása, amely fenntarthatóbb módon kezeli a nyersanyagkészletek csökkenését, és a hulladékok, a környezetszennyezés növekvő problémáját. Az iparosodott nemzeteknek a jelenlegi gyakorlatukhoz képest kisebb-nagyobb változtatásokat kell majd végrehajtaniuk.

A fejlődő országoknak át kell ugraniuk a régebbi, kevésbé környezetkímélő technológiákat és új módszereket kell bevezetniük, amelyek jobban összeegyeztethetőek az ökoszisztéma-alapú megközelítéssel.

Az anyagokat egy ideális ipari ökoszisztémában nem merítenék ki jobban, mint egy biológiai ökoszisztémában tennék; azaz egy acéldarab az egyik évben egy konzervdobozban jelenne meg, a következő évben egy autóban, és 10 évvel később akár egy épület vázszerkezetében. Az ipari ökoszisztéma gyártási folyamatai egyszerűen csak átalakítják a cirkuláló nyersanyagokat az egyik formából a másikba; ez a cirkuláló anyagmennyiség az elkerülhetetlen veszteség miatt csökken, és növekszik, hogy ki tudja szolgálni a növekvő népesség igényeit. Az anyag ilyen cirkuláltatásához is szükség van energia ráfordítására, és elkerülhetetlenül képződnek hulladékok és káros melléktermékek, de jóval kisebb mennyiségben, mint ma jellemzően.

Ma az ipari műveletek nem képeznek ideális ipari ökoszisztémát, és számos alrendszer és folyamat távol áll a tökéletestől. Vannak azonban olyan fejlesztések, amelyek okot adhatnak az optimizmusra. Néhány gyár már most alkalmazza az úgynevezett „tervezett hulladékot” vagy a „mesterséges törmeléket” fémek és műanyagok gyártása során: azaz a gyártási folyamat során keletkező hulladékmennyiséget alakítják, így az közvetlenül visszavezethető az adott folyamatba vagy egy másik hasonlóba. Más gyártók, ahol csak lehet, beépítik a visszaforgatott anyagokat az újonnan tervezett csomagolóanyagaikba, vagy olyan újszerű anyagokat alkalmaznak, amelyek eddig hulladéknak minősültek.

Három példán mutatjuk be az önfenntartó ipari folyamat-rendszerek fejlesztésének néhány eredményét: az ásványolaj származékok átalakítása műanyagokká, a vas átalakítása acéllá, továbbá a platinacsoport fémjeinek finomítása és katalizátorként történő felhasználása. Azért választottuk ezeket a példákat, mert mindegyik a zárt körfolyamatok ki-fejlődésének különböző szintjét képviselik. Megvizsgálva működésüket és hiányosságaikat, betekintést nyerhetünk abba, hogyan lehet egy al-rendszert úgy továbbfejleszteni, hogy ipari ökoszisztéma alakuljon ki.

A vas körfolyamat, melyben a visszaforgatás jól megalapozott és teljesen kiforrott folyamat több ezer évre visszanyúló múlttal, noha az acél

széleskörű termelése a 19. század előtt nem kezdődött el. A műanyag körfolyamat, amelyben az újrafelhasználás csak most kezd megjelenni, kevesebb, mint 100 éves. A bakelit, az első teljesen szintetikus műanyag röviddel a századforduló után jelent meg. A platinacsoport fémjeinek körfolyamata, amely mindennapi dolog az érintett anyagok magas ára miatt, még fiatalabb: az ipari nemesfém katalizátorok csak a korai 1950-es években váltak széles körben elterjedté, és a nemesfémek széles körű felhasználása az autók kipufogógázai szennyezésének csökkentésére kevesebb, mint 15 évre nyúlik vissza.

A műanyag rendszer nagyon hatékony lehet, de ezek kihasználása még olyan kihívásokat tartogat, melyekre nem válaszoltak. A műanyagok sokféle csoportba tartozó kémiaiailag összetett anyagok, amelyek használata exponenciálisan növekedett, így ez jelenleg egy növekvő hulladékártalmatlanítási probléma. A műanyagokat nagy számban alakítják végtermékeké, a különböző műanyag gyantákat nehéz megkülönböztetni. Ez a nehézség problémákat okoz az összegyűjtés, a szétválasztás és a visszaforgatás során. Sőt, a műanyagoknak az eredeti kémiai összetevőire bontása gyakran technológiailag megvalósíthatatlan vagy gazdaságilag nem vonzó.

A műanyagok hátrányait előnyeikhez képest kell újra latolgatni. A műanyag tartályok például biztonságosabbak, mint az általuk helyettesített üvegedények. Számptalan sérülés – kisebb vágásoktól a súlyos sérülésekig – megelőzhető, ha az üveget műanyaggal helyettesítik a tejedényektől és a fürdőszobai flakonokig, mint pl. a sampon. A műanyag tartályok általában könnyebbek, mint az üvegből vagy fémből készültek, így kevesebb energiát igényel a szállításuk, kevesebb energia kell az előállításukhoz, mint az üveg vagy fém tartályokhoz, különösen ha újra visszaforgatják őket. A Midwest Research Institute Kansas City-ben meghatározta, hogy összehasonlítva az üveg tartályokkal, egy fél gallonos polivinil-klorid (PVC) tartály előállításához és szállításához kevesebb, mint a fele energia szükséges, gyártásához huszad rész nyersanyag tömeg, és kevesebb, mint egyharmadnyi víz kell. Így aztán az üvegyártás hulladékának kevesebb, mint a fele keletkezik.

Minden fajta műanyag különböző problémákat vet fel, függően az egyéni összetételtől és a felhasználástól. A PVC, melyből csaknem 4 millió tonnát gyártanak évente az USA-ban, egy különösen drámai példája az összetett fenyegetésnek, amit a műanyag jelent a környezetre. A teljes műanyaggyártás egy hatodát a PVC teszi ki, ebből készítenek termékeket a csövektől kezdve az autó alkatrészekig és a samponos dobozig. A termeléshez klór és szénhidrogének szükségesek. (A klór a műanyagok környezetre gyakorolt hatását növeli a csak szén-hidrogéneket tartalmazókhöz, mint pl. a polietilénhez képest.) A földgáz a leggyak-

rabban használt nyersanyag az USA-ban a PVC gyártáshoz, ez máshol könnyűbenzin, egy ásványolaj frakció. Mindkét esetben a nyersanyagot alakítják etilénné, amelyet vinil-klorid-monomerré klóroznak, a monomer molekulákat azután összekapcsolják, hogy PVC-vé alakuljon.

A termelési folyamat hatékonysága már javult. Például a gyárak hatékonyabb membrán cellát fejlesztettek ki a NaCl elektrolíziséhez, a szükséges klór termeléséhez. (A NaCl-t, vagyis a közönséges asztali sót feloldják cellákban, amelyen keresztül villanyáramot vezetnek, a Na-ionok az egyik elektródra vándorolnak, és a Cl-ionok a másikra. A membrán választja el a két elektródot.) A membrán cellákból kihagyják az azbesztet és a higanyt, amit a régebbi elektrolizáló cellákhoz használtak, ezáltal csökkentik a veszélyes hulladékokat.

Ennek ellenére a PVC termelési folyamata jól szemlélteti a szennyezőanyagok csökkentésére szolgáló klasszikus „csővégi” intézkedéseket. A vinil-klorid monomer kibocsátást a gyártás során szigorúan ellenőrzik, ezt a gyakorlatot akkor vezették be, amikor ismertté vált, hogy a monomer egyaránt mérgező és rákkeltő. A reagálatlan vinil-kloridot a kész PVC-ből általában alacsony nyomású gőzzel mossák ki. Így a monomerek többségét kinyerik és visszaforgatják, de sokszor a koncentráció túl alacsony ahhoz, hogy egyszerűen kivonják és visszaforgassák, helyette lebontásra égetőműbe küldik. A sósavat gáztisztító berendezés távolítja el a kiáramló gázból.

A PVC visszaforgatása a gyártás során meglehetősen egyszerű. A PVC-t gyártó üzemek tipikusan visszaforgatják az összes gyáron belüli hulladékot. Például a General Motors-nál hulladék keletkezik az olyan PVC alkatrészek gyártása során, mint a díszítő szegély, az ülészetek és a műszerfal, ezeket elkülönítik szín szerint, újraőrlik, megolvasztják, és az új PVC-vel együtt felhasználják.

Egy műanyag visszaforgatása, ha a fogyasztói piacra kerül, lényegesen komplikáltabbá válik. A fogyasztók által elhasznált PVC hulladéknak csak körülbelül 1 százalékát forgatják vissza. A termékek széles skálája a PVC-n belül is felfedezhető, ami miatt a gyűjtés és visszanyerés nehezebb, de ez érdekes lehetőségeket is biztosít. Például, a lehetséges egészségügyi veszélyek és felelősség miatt a visszaforgatott műanyagot nem építik be olyan edényekbe, ahol a műanyag az élelmiszerhez hozzáfér; a visszaforgatott műanyag palackokból szennyvízelvezető csöveket lehet készíteni.

Más, nem könnyen visszaforgató vinil termékeket el lehet égetni hő vagy villamos energia termelésére. A PVC nagyjából annyi energiát tartalmaz, mint a papír vagy a fa, de a klorid-tartalom problémákat vet fel: a hulladékégetőkben, ahol PVC-t égetnek, gázmosó kell, hogy meg-

előzzék a sósav kibocsátást, ami hozzájárul a savas esőkhöz. Az égés során a klorid dioxinokat képezhet kis mennyiségben, amelyek erősen rákkeltők. Ennek eredményeként az eldobott PVC elégetését ellenzik. Bár a legutóbbi vizsgálatok szerint a New York-i State Energy Research and Development Authority azt mutatja, hogy megfelelően kialakított és működtetett égetők nem bocsátanak ki jelentős mennyiségű sósavat vagy dioxinokat, de a környezetvédőket és szabályozókat nem győzte meg, hogy a hulladékégetők a gyakorlatban ilyen alacsony kibocsátási szintet érnének el.

A klórtartalma miatt a PVC a problémák legrosszabb esete, amit műanyagok okozhatnak. Más polimerek, mint a polipropilén és a polietilén kevesebb környezeti veszélyt hordoznak. Ezek fizikai tulajdonságai hasonlóak a PVC-hez, de ezek nem tartalmazznak klórt. A polietiléntereftalát (PET), amelyből a szénsavas üdítők palackjait készítik, kilenc államban újra vissza kell forgatni, mert kötelező betéti jogszabályok írják elő: Kalifornia, Connecticut, Delaware, Maine, Massachusetts, Michigan, New York, Oregon és Vermont. Ezen államokban a PET gyanta előállításához a palackok összegyűjtése az összesen 750 millió fontból (340 millió kg-ból) 150 milliót (68 millió kg-t) tesz ki minden évben. Az PET visszaforgatása tonnánként 100-140 dollárba kerül, így ez az alumínium után a második legértékesebb eleme a települési szilárd hulladéknak. A PET-et újraformálják gyantává, hogy fröccsöntéssel készítsenek termékeket az autó alkatrészekről az elektromos eszközökig, vagy poliészter szálakat sodorjanak, amely párnákba, bútorokba, szigetelt ruhákba és szőnyegekbe kerül.

Ahogy a PET és más fogyasztói műanyag gyűjtésére és válogatására szolgáló infrastruktúra nő, a visszaforgatási arányt jelentősen növelni kell. A jelenleg évente kb. 100 millió fontnyi PET-et visszaforgató Wellman Inc. of Shrewsbury, N.J., szerint a visszaforgatott műanyagok piacát az összegyűjtés hatékonysága korlátozza, és nem az igények.

A vasipari rendszer eltérő képet mutat. A visszaforgatási technológiák jól megalapozottak, a hulladék gyűjtésére erős infrastruktúrája van. Mégis, az eldobott fémek továbbhalmozódnak a szemételepeken és szerte az USA-ban is, mert nincs elég kereslet rájuk. A modern élet gerincét az elemi vas képezi, ez a fő összetevő az acélban és az öntött vasban egyaránt: használják utakban, autókban az utak felett és az épületekben. Az USA-ban a vastermékek gyártása ott kezdődik, mikor az ércet kibányásszák hatalmas nyitott gödrökből, melyek mélysége 100 méter vagy több. Az ércet dúsítják és pelletekké alakítják a bányákban, majd a nagyolvasztóban vasöntvényé átalakítják, ahol koksszal, mészkővel és levegővel hevítik. A koks szénttartalmú anyagokat ad a

Robert A. Forsch és Nicholas E. Gallopoulos

keverékhez, a mészke és levegő oxigénje reagál az érc szennyeződései-vel, így salakká alakítják, amit eltávolítanak. Kevés egyéb adalék elem acélt eredményez, amit önthetnek, hengerelhetnek vagy kovácsolhat-
nak bugákká, lemezekké, gerendákká vagy lapokká.

Miután a vasból terméket formáltak, majd végül eldobtak, tulajdon-
ságaik (főleg ferromágnesességük) segítik az azonosítást és a szétválo-
gatást. A hatalmas mennyiségű forgalomban lévő vas a visszaforgatást
viszonylag könnyűvé és gazdaságilag vonzóvá teszi. Nem meglepő tehát,
hogy ezért minden évben sokmillió tonna hulladékot kevernek össze
vasércel, hogy acél termékeket gyártsanak. A hulladékot autóból ki-
szerelt acél részek, pl. motor blokk vagy más öntvények is alkotják.
Mind a négy öntőde, amit a GM működtet, teljesen támaszkodhat más
GM tevékenységből származó acélhulladéokra, és a hulladék vasra, ami
az öntési folyamat során keletkezik.

Habár a vas visszaforgatása viszonylag egyszerű folyamat, a rendszer
nem alkot egy zárt hurkot. Sok hulladékot az eldobált fogyasztói ter-
mékekből nem kapnak vissza, hanem ezek szétszóródnak a környéken,
ahol minden évben egy kicsit továbbrozsdásodik, és inkább rozsdának
tartják, mintsem értéknek. 1982-ben a visszanyerhető vas hulladék
mennyisége 610 millió tonna volt; 1987 végére ez a szám több mint 750
millióra nőtt. A növekedés fő oka, hogy az USA vas és acél termelése e
periódus alatt a legalacsonyabb volt a második világháború vége óta. Az
acélgyártás céljára szolgáló vashulladék kereslete csökkent, amíg a vas
és acél termékek folyamatosan a korábbi ütemben váltak hulladékká.

Mind az Egyesült Államokban és szerte a világon az acélgyártó mód-
szerek átalakulása felelős a megnövekedett vashulladékért. A finom
tettes az acélgyártás technológia váltása a nyitott kohókemencéről az
LD-eljárásra (angolszász szóhasználattal: alap oxigén kemencére). Az
LD-eljárásnál a nagyolvasztóban csak 25 tonna acélhulladékot kell
hozzáadni minden 100 tonna nyersvashoz, ezzel szemben a nyitott ko-
hónál közel egyenlő arányban kellett ezeket összekeverni.

Az USA-ban az áttérés az LD-eljárásra 1958 körül kezdődött, és ma
a nyílt kemencék a termelés kevesebb, mint 3 százalékát teszik ki. A
nyílt kemencéket lecserélték a gyártási hatékonyság javítása és a leve-
gőszennyezés csökkentése érdekében, de ezek eltűnése vezetett a vas
visszaforgatás csökkenéséhez. Ezt a váltást végrehajtva a vasgyártók
nem dolgoztak ki gazdasági mechanizmust, amely kimutatná a hulla-
dék felhalmozódás ártalmas környezeti hatásait vagy a lehetséges hosz-
szú távú hatást, mert több vasércet fogyaszt minden egységnyi acél.

Újabbán kisüzemek épültek, amelyek elektromos ívkemencéket hasz-
nálnak, és szinte kizárólag acélhulladékot fogyasztanak. Ezek a kis tel-

jesítményű üzemek növelik részesedésüket az USA acél termelésében, de nem eléggé, hogy kiegyenlítsék az eltűnt keresletet a hulladékra, amit a nyitott kohókemencék igényeltek. Továbbá, a kisüzemek csak korlátozott acél termékskálát állítanak elő, és sok ilyen terméket nagyon kevés szennyeződést tartalmazó vashulladékból kell készíteni. A hulladék, ami feleslegben tartalmaz rezet, pl. nem használható acéllemez készítésére, mert az ilyen lemez túl rideg lenne, hogy terméké lehessen alakítani. Ha az elektromos ívkemencék jelentősen előre akarnak törni az amerikai vashulladék készletek feldolgozásában, a termékek szélesebb skáláját előállító termelő berendezésekkel kell összedolgozniuk, és jobb technikákat kell kifejleszteni a szennyezett vashulladék használatához.

A platinacsoport fémjei (platina, palládium, ródiom, ruténium, irídium és ozmium) az 1970-es évek közepétől egy nagyon hatékony ipari rendszer részét alkották. Ezeket a fémeket egykor 85 százalékos vagy jobb hatásfokkal visszaforgatták, de megjelenésük az autók katalizátoraként megrázkódtatta a rendszert, a visszaforgatási arányok csak most kezdenek helyreállni.

A platinacsoport fémjeinek visszaforgatását nem annyira az ártalmatlanítás környezeti hatásai diktálják, hanem a korlátozott kínálat, a bányászás és tisztítás nehézségei. Az ércek csak körülbelül 7 ppm koncentrációban tartalmazzák vegyesen a platinacsoport fémjeit, így évente 20 millió tonna ércet kell finomítani 143 tonna tisztított fém előállításához – ez a mennyiség, ami nagyjából egy két méteres oldalhosszúságú kockába befér.

A bányászott platina fémek kb. 60%-át alakítják olyan fém-termékké, mint ékszerek, nemesfémrúd befektetésre és edényekké kémiai reakciókhoz, ezeket a termékeket végül szinte teljes hatékonysággal tudják visszaforgatni. A maradékot reagensként és katalizátorként használják kémiai üzemekben, olajfinomítóknak és autókban. A katalizátorok a felületükre adszorbeálják a molekulákat és elősegítik a kémiai reakciókat azáltal, hogy a molekulákat összekapcsolja egymással, vagy széttördeli őket kisebb darabokra. Az autók katalizátorai, amelyek csökkentik a kipufogott szénhidrogén, szén-monoxid és nitrogén-oxidok kibocsátását, a platinacsoportbeli fémek leggyorsabban növekvő felhasználása, a fogyasztás az 1975. évi 11,5 tonnáról 1988-ra kb. 40 tonnára növekedett. Jelenleg az autók felelősek a legtöbb platinacsoportbeli fém állandó éves elfogyasztásáért.

Az ipari gyakorlatban a platinacsoport fémjeit elég hatékonyan visszaforgatják. Minden gyárnál jelentős mennyiségű katalizátort használnak, így az, hogy a visszaforgatás kifizetődő, világosan látható. A használt katalizátorokat néhány havonta visszaforgatják, amely egy nagy, folyamatos anyagáramot biztosít a visszanyerő-üzemeknél a feldolgozáshoz. Vegyipari és gyógyszeripari gyáraknál például a katalizátorokat kevesebb, mint évenként forgatják vissza, és a bennük lévő platinacsoporthoz tartozó fémek 85 %-át visszanyerik. Néhány olajfinomító ennél is sikeresebb, a nemesfémek visszanyerése eléri akár a 97 százalékot.

A gépjárműgyártók nemesfém felhasználási szokása éles ellentétben áll a feldolgozóiparával: tízmilliószámra vannak katalizátorok, amelyek mindegyike csupán néhány gramm platinacsoport fémot tartalmaz (például kevesebb, mint két gramm platinát), és mivel egy autó átlagos élettartama mintegy 10 év, a visszaforgatható anyagok forgalma sokkal lassabb. Ennek eredményeként a katalizátorok platinacsoport fémjeinek jelenleg csak a 12 %-át forgatják vissza.

A gépjármű-katalizátorok igen alacsony visszaforgatási arányainak egyik oka csaknem teljesen az, hogy hiányzik a megfelelő eszköz a kimerült katalizátorok összegyűjtésére. A platinacsoport fémjeinek visszaforgatására alkalmazott technológia már jól ismert; 1984-ban a használt katalizátorokból a platina 90 százalékát, a palládium 90 százalékát és a ródiium 80 százalékát nyerték vissza a Texasgulf Minerals & Metals (Alabama állam, USA) vállalatnál. Mindazonáltal több millió darab különálló katalizátor található szétszórva a több ezer roncstelepen és a közel 2000 autóroncs visszaforgató telep valamelyikén.

A konverterek megtalálásának, összegyűjtésének és kiürítésének, majd a katalizátornak az újrafeldolgozó üzembe szállításának ára elég magas ahhoz, hogy az újrahasznosítás ne legyen nyereséges a legtöbb finomító üzemeltetéséhez, hacsaknem a platina unciánkénti ára meghaladja az 500 \$-t.

A katalizátorok visszaforgatásának kilátásai javulnak. Most, hogy az első generációs katalizátorral felszerelt autók legtöbbje már az Egyesült Államok valamelyik roncstelepére került, ez egy nagy mennyiségű, folyamatos nyersanyagáramot biztosít a visszaforgatók számára. Még ennél is fontosabb, hogy jelenleg a kimerült katalizátorok problémájának megoldására egy visszagyűjtő infrastruktúra kiépítése folyik. Japán cégek, mint például a Nippon Engelhard, már visszagyűjtő szervezeteket hoztak létre az USA-ban, hogy az összegyűjtött gépjármű-katalizátorok azután Japánban kerüljenek újrafeldolgozásra. Emellett Európában eddig nem volt kötelező a katalizátorok használata, de a szigorúbb emissziós rendelkezések bevezetése növelni fogja a platinacsoport fémjeire a keresletet, és így a visszaforgatás is jövedelmezőbb lesz.

A műanyagok, a vas és a platinacsoportba tartozó fémek életciklusa néhány fontos kérdést illusztrál a fenntartható ipari rendszerek kialakítása felé vezető úton. Ugyanilyen fontos az, hogy az egyedi ipari folyamatok bemenő és kimenő áramai milyen módon kapcsolódnak össze a teljes ipari ökoszisztémán belül. Ez a kapcsolat rendkívül fontos a zárt, vagy majdnem zárt rendszer létrehozásánál.

Egy hatékony ipari ökoszisztémán belül az egyedi gyártási folyamatok, a biológiai párjukhoz hasonlóan az egész rendszert optimális működéséhez járulnak hozzá. Olyan eljárásokra van szükség, amelyek minimálisra csökkentik a visszaforgathatatlan hulladék képződését (beleértve a hulladékhőt is), továbbá ugyanúgy kell minimalizálni a szűkös anyagi és energiaforrások állandó fogyasztását. Az egyedi gyártási folyamatokat nem szabad elszigetelten tekintenünk. Kívánatosabb lesz egy olyan folyamat, amely viszonylag nagy mennyiségű, de más folyamatokban felhasználható hulladékot termel, mint egy olyan, amelyben kevesebb, de használhatatlan hulladék keletkezik.

Jó példa erre a gyártott termékek dematerializációjának finomságai, amikor a termék tömegének csökkentése érdekében műanyagokat, kompozitokat és nagy szilárdságú ötvözeteket használnak. Az utóbbi években a dematerializáció egyre nagyobb figyelmet kap. 1975 óta például egy autó átlagos tömege 400 kg-mal csökkent; ebből körülbelül 100 kg-ot az acélnek műanyaggal és alumíniummal történő helyettesítésével érték el. Könnyebb autók kevesebb benzint fogyasztanak. De míg az acélt könnyű volt visszaforgatni, az öt helyettesítő műanyag kompozitok ellenállnak a visszaforgatásnak. Az eredmény összességében az üzemanyag fogyasztás azonnali csökkenése, viszont általánosságban növekszik a hulladékok mennyisége és a természeti erőforrások felhasználása.

Az amerikai gyárak hulladék-csökkentésre irányuló tevékenységét segíti az 1970-es években bevezetett veszélyes hulladék elhelyezésével kapcsolatos szabályozás. A szabályozás, ami a hosszú távú környezeti költségeket tükrözte, kevesebb, mint tonnánkénti 20 \$-ról több mint 200 \$-ra emelte a hulladéklerakón való elhelyezés költségét, így a lerakás mellett gazdaságossá váltak más megoldások is. Sok vállalat számára jövedelmező, hogy hulladékukat nyersanyagként adják el. Például egy középnyugati acél feldolgozó vállalatnál, a Meridian National-nál Ohio államban, az acéllemezek tisztítására használt kénsavat visszaforgatják, a savat újrahasználik, a vas-szulfátot pedig egy magnószalag gyártó vállalatnak adják el.

Ha meg kell szüntetni a hasznosíthatatlan hulladékok képződését, hasonló lépéseket kell tenni a gyártási folyamatokból nagy tömegáramokból kis mennyiségben képződő melléktermékekkel kapcsolatosan. Annak ellenére, hogy az egyes gyártási folyamatokban ezek emissziója relatíve kicsi, együttvéve komoly szennyezési problémákat okozhatnak. A számtalan kisebb kibocsátás minimalizálása egyesével egy összetett és valószínűleg költséges feladat.

A feladat részben megoldható számos, viszonylag kis változtatás bevezetésével. Néhány vegyipari üzem és olajfinomító a veszélyes hulladék mennyiségének jelentős csökkenését érte el úgy, hogy egyszerűen megváltoztatták a mosófolyadékok és más kis mennyiségben használt vegyszerekkel kapcsolatos vásárlási és tárolási szokásaikat. Így szüktelenné vált a megmaradt vegyszerek elhelyezésnek megoldása.

Az ARCO los angeles-i olajfinomító üzeme egy sor viszonylag alacsony költségű változtatást hajtott végre, és ezáltal az évente képződő hulladék mennyiségét a korai 1980-as évekből 12 000 tonnáról 3400 tonnára csökkentette, így körülbelül évi 2 millió \$ ártalmatlanítási költséget takarított meg. A cég a kimerült alumínium katalizátorát az Allied Chemical vegyi üzemnek, a kimerült szilícium-katalizátorát pedig egy cementgyárnak adja el. Korábban ezek az anyagok veszélyes hulladéknak minősültek, melyeket a vállalatnak kötelező volt lerakón elhelyeznie akár 300 \$/tonna áron.

Egy olajfinomító vizlágyítójából származó lúgos karbonát-iszapot egy néhány mérföldre lévő kénsavgyárba vezetik, ahol a savas szennyvizet semlegesítik vele. (A savgyár korábban tiszta nátriumhidroxidot vásárolt ebből a célból.) Csupán néhány kimenő csövet áttelepítettek a szállítás javításának érdekében, és az üzem dolgozóinak nyomon kell követniük az iszap pH-jának változását, de a teljes beruházás minimális volt.

Egy új, 1 millió dolláros visszaforgató berendezés segítségével az ARCO olajfinomító elkezdte visszanyerni a belső elfolyásokból és egyéb hulladékokból származó olajat. Amikor a visszaforgató berendezés már teljes üzemben fog működni, várhatóan további 2 000 tonnával csökken majd a hulladék mennyisége. Külső kezelésre vagy hulladéklerakón történő elhelyezésre továbbra is szükség lesz különféle hulladékok, például oldószerek, spray-palackok és az évente eltávolított sok száz tonna azbesztes szigetelés esetében.

Az ARCO helyzete nem egyedülálló, más nagy finomítók és vegyipari gyártók hasonló erőfeszítéseket tesznek. Például a Ciba-Geigy Toms River-i üzemében New Jersey-ben technológiai változásokra és visszanyerő berendezésekre 300 000 \$-t fektettek be, amivel 1985 és 1988 között 1,8 millió \$-ral csökkentették az ártalmatlanítási költségeiket.

A Dow Chemical vállalat külön egységet létesített a feleslegben lévő sósav visszanyerésére; az így kapott sósavat a sav-felhasználó folyamatokba vezetik vissza, vagy a szabadpiacon eladják. A művelettel évente milliótonnányi savat nyernek vissza, 20 millió dollár nyereséggel.

Melléktermékek és szennyvizek a gyártás során csupán az ipari ökoszisztéma kínálati oldalán jelentkeznek. A keresleti oldalt a fogyasztók jelentik, akik megveszik a termékeket és hulladékot bocsátanak ki, ami nyersanyag lehet a termelés következő ciklusában. Ha az ipari ökoszisztéma megközelítés széles körben elterjed, akkor a termelés megváltozását össze kell hangolni a fogyasztók keresletével és az egyszer már megvásárolt és elhasznált termékek kezelésével.

A fogyasztók magatartása az USA-ban ma torznak minősül, mind időben és térben. Míg egy tipikus new york-i például 2 kg szilárd hulladékot dob ki a szemétkébe naponta, egy hamburg-i vagy római lakos csupán a felét annak, amit egy new yorki a századfordulón. Sőt, az USA-ban a fogyasztói szokások és hulladékkezelési módszerek egy olyan komplex rendszert alakítottak ki, ami hátráltatja a hulladék keletkezésének csökkentésére és a kommunális hulladéklerakók tehermentesítésére tett erőfeszítéseket. A kommunális hulladék nagy részét szerves anyagok és műanyagok teszik ki, melyeket viszonylag könnyen lehet komposztálni, visszaforgatni vagy energiatermeléshez elégetni, de ehelyett hulladéklerakókra viszik, amelyek földterületéhez korábban könnyen és olcsón jutottak hozzá.

Ma, amikor szerte az Egyesült Államokban a hulladéklerakók kapacitása közel kimerült, sok közösség kezdeményezett szemét-válogató programokat a visszaforgatatlan hulladékok mennyiségének csökkentésére, amit valószínűleg több kezdeményezés fog követni. Néhány más ország már meglehetősen bonyolult gyűjtési és kezelési gyakorlatot alakított ki, és így a kívánalmaknál jóval magasabb szinten végzik a hulladékok válogatását és visszaforgatását. Japán, Svédország és Svájc elem-gyűjtő központot létesített, ahová a hordozható rádiókból és egyéb fogyasztói termékekből várják a kimerült elemeket. Ezek az elemek nehézfémeket tartalmaznak, így ha a komposztált hulladékba kerülnek, akkor az trágyázására már nem hasznosítható; további probléma, hogy a hulladékegetőkben elszennyezik a pernyét és hamut, így ezeket veszélyes hulladékként kell elhelyezni.

Az ipari ökoszisztémák hatékonyságát képes jelentősen növelni egy, a különböző hulladékfajtákra kialakított, hatékony gyűjtő és válogató hálózat. Az amerikai fogyasztóknak abba kellene hagyniuk az észnélküli, válogatatlan hulladékhegyek létrehozását úgy, hogy ez ne befolyásolja az Egyesült Államokban az életszínvonalat. Sőt, a kommunális hulladéklerakók ugyanolyan gyorsan fogynak ki a szabad kapacitásból,

mint az ipari hulladéklerakók, így a fogyasztók is hamarosan szembe találják magukat ugyanazokkal a hulladékmennyiséget csökkentő gazdasági ösztönzőkkel, mint amelyekkel ma a gyártók szembesülnek.

Egy fenntartható ipari ökoszisztéma létrehozása igen kívánatos környezetvédelmi szempontból, és egyes esetekben igen jövedelmező is. Mindazonáltal számos akadály nehezíti annak sikeres bevezetését. A vállalati és lakossági szemléletmódot kell megváltoztatni az ökológiai megközelítés elősegítéséhez, és a kormányzati szabályozást kell rugalmasabbá tenni, nehogy szükségtelenül akadályozzák a visszaforgatási és egyéb hulladékminimalizálási stratégiákat.

A szövetségi (amerikai) veszélyes-hulladék szabályozás is idevágó eset. Ezek néha a hulladékcsökkentést nehezebbé teszik, mint a lerakását. A veszélyes hulladéknak minősített hulladékok kezelésére és dokumentációjára vonatkozó szigorú követelmények miatt sok vállalat inkább a hagyományos csatornákon keresztül vásárolja a nyersanyagait, nehogy belekerüljenek a szabályozott folyamatba. Néhány államban viszont tényleg támogatják az innovatív hulladékkezelést: Kalifornia például két évente kiad egy katalógust, amelyben a hulladéktermelők megtalálhatják azokat a hulladék felvásárlókat, akiknek éppen az ő általuk termelt hulladékra van szükségük. 1987-ben körülbelül fél millió tonna veszélyes hulladékot forgattak vissza, ami egyébként hulladéklerakókba ment volna. Egy tucat más állami és regionális hulladék cserepiac működik az USA-ban és Kanadában.

Az innovatív hulladékminimalizálási tervek mellett a kormánynak a fenntartható gyártást elősegítő közgazdasági ösztönzőkre is összpontosítania kell. A hulladék lerakási költségek növelésével elérték, hogy a társaságok fejlesszék ipari folyamataikat és csökkentsék a visszaforgathatatlan hulladékok képződését; de sok kis kibocsátás szabályozására továbbra is a klasszikus „csővégi” előírások vonatkoznak, amelyek pontosan meghatározzák, hogy az egyes szennyező anyagokból mennyi kerülhet ki a környezetbe. A vállalatoknak meg kell felelniük a szabályozási követelményeknek, de nincs semmilyen közvetlen előnyük, ha visszatartják és kezelik a kis anyagáramokat, vagy ha egy kevésbé káros melléktermékű gyártási technológiára állnak át. A hagyományos gazdasági módszerek a termelési döntéseknek csak a közvetlen hatását veszik figyelembe. Például, ha egy termelő egyutas palackokat gyárt, az adófizetők mind viselik a megnőtt hulladéklerakási költségeket; ha egy erőmű csökkenti kibocsátását, ami savas esőt okoz, valószínűleg máshol lévő közösségek élvezik ennek előnyeit. A haszon visszajutása a gyártóhoz vagy a közüzemekhez általában közvetett.

A szennyezés csökkentésére a direkt szabályozás helyett a közzgazdászok már régóta pénzügyi ösztönzőket szorgalmaznak. Ezek közé tartoznak a beruházási és kutatási hitelek, az adókedvezmény, vagy a gyártókra a termelt veszélyes anyag mennyisége és jellege szerint kivetett díjak vagy adók. Ezek az intézkedések segíthetnek megfizetni a kezelést, illetve az ártalmatlanítást, vagy ami még fontosabb, a vállalatokat úgy ösztönzi a gyártási folyamatok megváltoztatására, hogy csökkentsék a veszélyes hulladékok termelését. A szennyezési díjak és adók a környezeti költségeket internalizálják, és így ezeket a költségeket figyelembe tudják venni a vállalati döntések meghozatalakor.

A szennyezési díjak nagy ellenkezést váltottak ki a környezetvédők és iparosok képviselőiből. Az előbbieket szerint ez egy „engedély a szennyezésre”, az utóbbiak szerint pedig „torzítja a piacot”. Mindkét kritika jogos. Ha a díjak túl alacsonyak, akkor a vállalat az üzlet részeként kezeli, és áthárítja a fogyasztókra; ha túl magas, akkor a vállalat csak az adott szennyezőanyag kibocsátását fogja csökkenteni, tekintet nélkül az egyéb környezeti hatásokra vagy a pénzügyi terhekre.

Alkalmasan megállapított díjak vagy ösztönzők a gyártók hatékony eszközei lehetnek arra, hogy beépítsék a szennyezés és a hulladék társadalmi költségeit saját költségelszámolási rendszerükbe. Akárcsak a veszélyes hulladékok növekvő hulladéklerakási díjai a lerakásnál és az ártalmatlanításnál vonzóbbá tették a problémák megoldását a forrásnál. Ezek a díjak lehetővé teszik, hogy a vállalatok részesedjenek a veszélyes hulladékok csökkenéséből származó általános gazdasági megtakarításokból. Feltéve, ha a pénzügyi ösztönzők hatására a vállalatok a költségek csökkentésének érdekében bevetik képességeiket. Valóban, azok a gyártók, akik figyelmen kívül hagyják ezt a kényszert, távoznak a piacról, pedig a helyzet addig nem változik meg, amíg a vállalatok a szennyezés társadalmi költségét nem osztják fel egymás között.

A gazdasági ösztönzők önmagukban azonban nem elegendők az ipari ökoszisztéma szemlélet általánossá válásához. A hagyományos gyártási folyamatok során a gyártóknak és az egyes termékek fogyasztóinak közvetlen hasznát maximalizálják, és nem az egész gazdasági rendszer hasznát. Holisztikus megközelítésre van szükség, ha a szigorúan meghatározott gazdasági előnyök és környezeti igények között megfelelő egyensúlyt kell elérni. (Tág értelemben véve természetesen a gazdasági és a környezeti célok megegyeznek: rossz lakóhelyek nem jó piacok.)

Az ipari ökológia fogalmát és a rendszerek optimalizálását szélesebb körben kell tanítani. Jelenleg a mérnöki és műszaki oktatás vagy teljesen kihagyja ezeket a fogalmakat, vagy olyan korlátozott módon tárgyalja őket, hogy azok csekély hatást gyakorolnak a gyártással kapcsolatos környezeti problémák megközelítéseinél.

Robert A. Forsch és Nicholas E. Gallopoulos

A műszaki tananyag megváltoztatása azonban nem lesz elég. Az állami tisztségviselőknek, az ipari vezetőknek és a médiának kell az ipari ökológia koncepcióját megismerni és jelentőségét értékelni. Ezeket be kell építeni a közgondolkodásba, és a kormánynak éppen úgy el kell fogadnia, mint az iparnak.

A kibocsátások kormányzati szabályozásának helyi, nemzeti és nemzetközi szintjén továbbra is fontos szerepet kell játszania az átmenetben a gyártás hagyományos módszereiről az ipari ökoszisztéma-megközelítésre. Az átmenetet az ökoszisztéma-megközelítésre gyorsíthatná a gazdasági ösztönzők mielőbbi beépítése a szabályozási rendszerbe.

Ahhoz, hogy szabályozás a lehető leghatékonyabb legyen, a hatóságoknak a politikáikat értelmes technikákra kell alapozniuk, és támogatniuk kell a technológiai változásokat. A szabályokat úgy kell kialakítani, hogy elősegítsék (vagy legalább ne akadályozzák) az olyan alternatív technológiák és innovatív módszerek fejlesztését, amelyek az ipari melléktermékek kezelésére szolgálnak. Szabályalkotóknak ki kell használniuk az ipar technológiai szakértelmét annak érdekében, hogy elkerüljék az ellentétes hatású intézkedéseket. Egy ilyen bölcs szabályozási keretet szinte lehetetlen kialakítani, hacsaknem a kormány, az ipar és a környezetvédelmi csoportok feladják a jelenlegi ellenségeskedő kapcsolatukat, és együtt oldják meg ezt a mindnyájukat érintő problémát.

Még az ipari ökoszisztéma-alapú szemlélettel sem könnyű a döntés, hogy hogyan osszuk el az erőforrásokat. A kőolaj például nem csak energiaforrás, hanem nélkülözhetetlen alapanyag is vegyszerek, műanyagok és egyéb anyagok gyártásához. Egyes elemzők úgy érveltek, hogy csak nyersanyagként és nem energiahordozóként szabad használni. Hasonló érvet lehetne felhozni a szén használatával nyersanyagként, tüzelőanyag helyett. Az output oldalt tekintve a műanyagokat energiatermelés céljából elégethetjük, visszaforgathatjuk új termékek gyártásához, vagy akár elemi kémiai alkotóikra bonthatjuk szét, de nem világos, hogy melyik választás egyértelműen jobb. A következmények alapos elemzéséhez „ipari ökológusokra” lesz szükség, hogy válaszoljanak ezekre a kérdésekre.

Az ideális ökoszisztémát, amelyben az energia és az anyagok használata optimális, a hulladék és a szennyezés minimális, és minden termékgyártási folyamat gazdaságilag életképes, nem lehet elérni a közeljövőben. A jelenlegi technológia gyakran alkalmatlan a feladatra, és hiányzik a szükséges tudás, hogy a problémákat teljes mértékben meghatározzák. Az ipari ökoszisztéma bevezetésének nehézségei ijesztőek, különösen, ha figyelembe vesszük a probléma összetettségét, hogy a globális ipari fejlődés vágyait kell a környezeti biztonság igényeivel összhangba hozni.

Ennek ellenére optimisták vagyunk. Az ipar motivációja tiszta: a vállalatok képesek lesznek csökkenteni költségeiket, és versenyképesek maradni, miközben ragaszkodnak a globális költségekkel és hasznokkal számoló racionális gazdasági megközelítéshez. Ugyanilyen nyilvánvaló előnyei vannak a társadalom számára: az embereknek esélyük lesz a látható életszínvonaluk növelésére anélkül, hogy rejtett környezeti büntetéseknek tennék ki magukat, amelyek hosszú távon rontanák életminőségüket. Jusson eszünkbe, hogy az emberek és az általuk kidolgozott technológiák a természetes világ részei, és lehetséges utánozni a biológiai ökoszisztémák legjobb működését, és létrehozni olyan mesterségeket, amelyek hosszú távon fenntarthatóak.

Javasolt olvasnivalók:

RESOURCE & ENVIRONMENTAL PROFILE ANALYSIS OF PLASTICS AND NONPLASTICS CONTAINERS. Robert G. Hunt and Richard O. Welch. Midwest Research Institute, 1974

PLATINUM-GROUP METALS. J. Roger Loebenstein in Mineral Facts and Problems, U.S. Bureau of Mines Bulletin No. 675, U.S. Department of the Interior. U.S. Government Printing Office, 1985.

THE MAKING, SHAPING, AND TREATING of STEEL. Edited by William T. Lankford, Jr., et al. Association of Iron and Steel Engineers, 1985.

TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT. Edited by Jesse H. Ausubel and Hedy E. Sladovich. National Academy Press, 1989.

INPUT MANAGEMENT OF PRODUCTION SYSTEMS. Eugene P. Odum in Science, Vol. 243, No.4888, pages 177-182; January, 13, 1989.