

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi kar
Környezettudományi Centrum

Napelemes rendszerek teljes életciklus elemzése

Tudományos Diákköri dolgozat

Készítette:

Manek Enikő
környezettan alapszakos hallgató

Témavezető:

Farkas Zénó
tudományos munkatárs
ELTE eScience Regionális Egyetemi Tudásközpont

Budapest, 2008

Összefoglaló

Dolgozatomban áttekintem az életciklus elemzés alapelveit és módszereit, a legfontosabb fogalmakat, irányelveket és környezeti károsodási kategóriákat, majd bemutatok néhány, napelemes rendszereken végzett esettanulmányt. Kutatásom részét képezte önálló számítások elvégzése is, melyeket az Ecoinvent adatbázison alapuló GaBi 4 életciklus elemző szoftver segítségével készítettem el. A teljes életciklus elemzés (LCA) egy környezeti teljesítmény értékelő módszer, melynek célja egy termék vagy szolgáltatás környezeti hatásainak pontos meghatározása annak létrejöttétől az életciklusa végéig. Az LCA objektív és dokumentált, lehetővé teszi különböző termékek relatív összehasonlítását, tudatformáló hatású, és a környezetkímélő termékfejlesztés alapját képezi. Az Ecoinvent adatbázis kemikáliák, építőanyagok, mezőgazdasági anyagok, valamint az energiaellátás és hulladékkezelés adatait tartalmazza, melyek forrása elsősorban a svájci és német ipar. Az Ecoinvent Európában a legrészletesebbnek és legpontosabbnak tekintett adatbázis. A GaBi 4 teljes életciklus elemző szoftver segítségével megbecsülhetőek egy termék vagy szolgáltatás teljes élete során felmerülő költségek, anyag és energia áramok, emberi egészségre és a környezetre gyakorolt káros hatások. A program egyszerűbbé teszi a folyamatok optimalizálását, a termékmenedzsmentet és az eredmények grafikus megjelenítését. Napjainkban a napelemek gyártása és alkalmazása rohamosan növekszik. A napelemes rendszerek a fényenergiát közvetlenül villamos energiává alakítják át, így lehetővé teszik a megújuló napenergia hasznosítását. A napelemek működésük során gyakorlatilag nem terhelik a környezetet szennyezőanyag áramokkal, így alkalmazásuk mindenképpen környezetbarát megoldásnak tűnhet. Ahhoz azonban, hogy helyesen ítéljük meg hasznosságukat, figyelembe kell vennünk az előállításukhoz szükséges alapanyagokat és energiamennyiséget, az energia megtérülési idejüket és az elhasználódásuk után keletkezett hulladék kezelésének problémáját is. Dolgozatomban arra törekszem, hogy szakirodalmi adatok, valamint egy önállóan felállított, egyszerű modell alapján kiemeljem azokat a tényezőket, melyek jelentős hatást gyakorolnak egy napelem környezeti mérlegére és energia megtérülési idejére. Legfontosabb eredményem, hogy a budapesti napsugárzási viszonyok mellett a vizsgált napelemes rendszer környezeti hatás ill. energia megtérülési idejére 3-3,5 év adódott.

Tartalomjegyzék

1. A teljes életciklus elemzés alapjai.....	4
1.1. Irányelvek.....	4
1.2. Az analízis eszközei.....	4
1.3. Az életciklusokban gondolkodás gyakorlatba való átültetésének legfontosabb elemei..	5
1.4. Az eljárás eszközei.....	6
1.5. LCIA felezőponti és károsodási kategóriák.....	8
2. Napelemes rendszerek életciklus vizsgálatának irodalmi áttekintése.....	10
2.1. Kristályos szilícium napelemek életciklus vizsgálata a svájci Ecoinvent adatbázissal	10
2.2. Kristályos szilícium napelemek gyártásának környezeti hatásai - multikristályos, monokristályos és szalag technológiák összehasonlítása.....	19
2.3. Napelem modulok újrahasznosításának életciklus analízise.....	21
3. Napelemes rendszer vizsgálata hazai körülmények között.....	23
3.1. A vizsgált hipotetikus rendszer tulajdonságai.....	23
3.2. Az elemzéshez használt szoftver.....	23
3.3. Magyarországi napsugárzás adatok.....	24
3.4. Teljes életciklus elemzés.....	25
3.5. Eredmények.....	27
3.6. Tovább lépési lehetőségek.....	29
Irodalomjegyzék.....	30
Függelék: Rövidítések és fordítások jegyzéke.....	31

1. A teljes életciklus elemzés alapjai

Az életciklus vizsgálat során általános alapelv, hogy az alkalmazott analízisnek sokkal gyakorlat orientáltabbá kell válnia, a gyakorlatban pedig nagyobb tudományos megalapozottság szükséges.

1.1. Irányelvek

- Fenntartható fejlődés: a teljes életciklus vizsgálat végső célja a gazdasági fejlődés, az emberi jólét és a környezettudatosság egyesítése.
- Életciklusokban gondolkodás: az összes emberi tevékenységet a kezdetektől a legvégső állomásig kell végigkövetni.
- Ipari ökológia: az ipari rendszerek, gazdasági tevékenységek és ezek természeti rendszerekhez való kapcsolódásának tudománya. Az ipari ökológiában gyakran alkalmaznak életciklus vizsgálatokat.
- Az anyagszükséglet csökkentése: a felhasznált alapanyagok és energia mennyiségének csökkentése, a szolgáltatás minőségének növelésével párhuzamosan.
- Öko-hatékonyság: versenyképes árú termékek és szolgáltatások létrehozása, valamint az ökológia hatások és természeti erőforrások felhasználásának csökkentése.
- Előrejelzések, kockázat és szennyezés kérdései: ezek a szempontok egymással szorosan összekapcsolódnak. Az életciklus vizsgálatok eredményei alapján meghatározhatók a lehetséges hatások és könnyebben elkerülhetők a környezeti és társadalmi károk. Ide tartozik a kockázatok és a szennyezések minimalizálása is.

1.2. Az analízis eszközei

- Életciklus elemzés (life-cycle analysis, LCA): célja egy termék vagy szolgáltatás környezeti hatásainak pontos meghatározása annak létrejöttétől az életciklusa végéig. Lépései:
 1. A tanulmány céljának meghatározása.
 2. LCI: az ipari folyamatok során az inputok és outputok leltárba vétele.
 3. LCIA: hatáselemzés, az LCI-ben meghatározott elemek számbavétele a környezetre gyakorolt hatásuk szerint, pl. környezeti probléma szerinti

osztályozásuk: savasodás, globális felmelegedés, emberre gyakorolt mérgező hatás.

4. Életciklus értelmezése.

- Környezeti kockázat vizsgálat (ERA): az emberekre és ökoszisztémákra gyakorolt hatások vizsgálata, több szempontból is a veszélyesnek tekintett vegyszerekre koncentrálnak.
- Input/output analízis és környezeti input/output analízis (IOA és env. IOA): a gazdasági szektorok közti pénzügyi folyamatok mozgásának vizsgálata. Az env. IOA ezeken kívül kiegészül még az eredet és kibocsátások tanulmányozásával.
- Életciklus árkalkuláció (LCC): egy termék, szolgáltatás vagy tevékenység teljes életciklusa során felmerülő összes költségek számítása (általában az externális költségek nélkül).
- Teljes költségszámítás (TCA): a módszerrel számításba vehetők az externális költségek is (amelyeket nem közvetlenül a cég fizet).
- Környezet-menedzsmenti elszámolás (EMA): egy gyártási folyamat során felmerülő környezeti költségek teljes spektrumának azonosítása és mérése, valamint az eljárás során felméri a szennyezés megelőzésének és a tisztítási eljárásoknak a gazdasági előnyeit is.
- Költséghatékonyság.

1.3. Az életciklusokban gondolkodás gyakorlatba való átültetésének legfontosabb elemei

Az ide tartozó államigazgatási programok létrejöttét maguk a kormányok kezdeményezik. A végrehajtáshoz jogi, pénzügyi, kommunikációs és strukturális eszközök állnak a rendelkezésükre, valamint lényeges szerepet kapnak az önkéntes megegyezések. A tízéves keretprogram a fenntartható fogyasztásról és termelésről kimondja, hogy a termelés és fogyasztás mintázatainak megváltoztatása nélkülözhetetlen kívánalma a fenntartható fejlődésnek.

A fenntartható fogyasztás akkor valósul meg, ha a termékek és szolgáltatások megfelelnek az alapvető szükségleteknek, de jobb életminőséget is hordoznak. A termelés során minimalizálni kell a természetes források és toxikus alapanyagok használatát, a szemét és a különféle szennyezők kibocsátását, úgy hogy közben ne veszélyeztessük az eljövendő nemzedékek szükségleteit.

- Tisztább termelés: egy megelőző jellegű környezeti stratégia folyamatos bevezetése a folyamatokba, az emberi és környezeti kockázatok redukálása, a nyersanyagok, víz és energia megőrzése, a veszélyes és mérgező anyagok megsemmisítése.
- Fenntartható beszerzések: a program keretében a szervezetek és kormányok stimulálják azon a termékek és szolgáltatások fogyasztását, amik teljesítik a fenntartható fejlődés kritériumait.
- Integrált termék politika: egy termék teljes élete során okozott hatások (bányászat, termelés, terjesztés, használat, szemét) csökkentésére irányuló keretprogram.
- Vegyi anyagok termelés politikája: hatásaik és újrahasznosításuk kérdései.
- Kiterjesztett termelői felelősség: pl. hulladékkezelés, munkavédelem, újrahasználat, újrahasznosítás.
- Integrált hulladék és nyersanyag menedzsment: pl. kevesebb alapanyagot igénylő termékek tervezése, kevesebb hulladékot termelő technikák használata és a hulladék hasznossá tétele.
- Szervezeti programok
- Életciklus menedzsment.
- Szolgáltató lánc menedzsmentje.
- Életciklus végének kezelése: pl. a gyártók kényszerítése az üvegek visszaváltására, vagy a termék funkcionális életének lejártakor a visszavételre.
- Termékgondozás: az életciklus összes szereplőjének igazgatása úgy, hogy a környezetre a lehető legkisebb hatást gyakorolja az adott termék.
- Integrált alapanyag menedzsment: pl. újrahasznosítás, visszavétel.

1.4. Az eljárás eszközei

- Környezeti menedzsment rendszer.
- Öko-dizájn: az ilyen termékek minimális környezeti kárt okoznak az életük során.
- Környezeti tanúsítás és biztosítás rendszere.
- Környezeti hatás kiértékelés: környezeti, gazdasági és társadalmi hatások, a tervezés korai szakaszában a hatások előrejelzése, a tervek helyi környezetnek megfelelő átformálása, a lehetőségek és előrejelzések bemutatása a döntéshozóknak.
- A fenntarthatóságról szóló jelentések: szervezetek által elért eredmények bemutatása.

Egy életciklus vizsgálat három legfontosabb eleme az LCM, valamint az LCA két fő lépése: az LCI és az LCIA. Az életciklus menedzsment azért nagy jelentőségű, mert egy széles területet átívelő, közös testületi program, az életciklus elemzés pedig a leggyakrabban használt analitikai eszköz egy termék vagy szolgáltatás életciklusa során érintett állomások vizsgálatára, illetve a nem fenntartható fogyasztási és termelési mintázatok megváltoztatására. A LCM, LCI és LCIA fejlettségi foka nagyrészt a SETAC által elért eredmények függvénye, de a kis- és középvállalatok, illetve a fejlődő országok esetében fontos szerepet kapnak a tapasztalatok, valamint az UNEP Tisztább Termelésért Programmal és az UNEP Fenntartható Fogyasztás Programmal való kapcsolat is.

Az LCI és LCIA analitikai eszközök alkalmazásának lényeges szempontjai és fejlesztésre szoruló területei a következők:

- *LCI adatok elérhetősége és érvényesítése.* Az LCI-t alkalmazó ipari és kormányzati szereplők, kutató intézetek és konzultációs irodák jelenleg főleg olyan adatbázisokra hagyatkoznak, melyek átláthatósága, következetessége és összehasonlíthatósága problémás, és igen kevés az általános, nyilvánosan hozzáférhető adatbázis.
- *LCI módszertani következetesség.* A nemzetközi szabványok, mint például az ISO, számos irányelvet mutatnak a LCA elvégzéséhez, ugyanakkor teret engednek sok más módszernek is. Ahhoz, hogy az LCI során megkapjuk a kívánt eredményeket, elengedhetetlen a rendszer határainak megfelelő meghúzása. Háromféle elhatárolás szükséges:
 - a rendszer és környezetének elkülönítése: meg kell állapítani, hogy mely gazdasági és környezeti folyamatok képezik részét az adott rendszernek, és melyek nem.
 - a vizsgált rendszer és egyéb, kapcsolódó rendszerek közötti határ meghúzása: szerteágazó folyamatok esetén el kell dönteni, hogy a vizsgálat csak egyetlen, esetleg néhány vagy az összes termékre terjedjen-e ki.
 - a tárgyra vonatkozó és a nem odatartozó folyamatok elkülönítése: bizonyos folyamatok eltávolítása, melynek oka lehet egyszerűsítés, a minősítést akadályozó adathiány vagy nem szignifikáns környezeti hatás.
- *LCIA keretrendszer és terminológia.* Az LCIA hatáselemzés során az összes kibocsátás és forrásfelhasználás környezeti hatását analizáljuk.

Mivel különbségek mutatkoznak az ISO standard és az Európai Környezeti Ügynökség terminológiájában, ezért az egységes keretrendszer mellé egységes szaknyelv is szükséges.

1.5. LCIA felezőponti és károsodási kategóriák

A javasolt keretrendszer a környezetre gyakorolt hatásokat két szinten tárgyalja: az első az adott gazdasági, gyártási folyamat kezdőpontja és a termék vagy szolgáltatás életciklusának vége (az okozott környezeti kár) közötti „felezőpont”, a második szint pedig maga a környezeti kár.

- A felezőponti kategóriák három nagy témakörbe csoportosíthatók:
 - természeti erőforrások és földhasználat: víz- és ásványkészletek, energiahordozók, talaj és erózió, szikesedés és kiszáradás, biotikus források.
 - toxikus hatások: ide tartoznak az ökológiai rendszereket és az embereket érintő mérgezések, valamint egyéb, közvetlen hatást gyakorló tényezők (például zaj, ionizáló sugárzások).
 - több kategórián átívelő hatások: klímaváltozás, légköri ózon koncentráció csökkenése, vízi és szárazföldi eutrofizáció és savasodás.
- Károsodási kategóriák:
 - Emberi egészség: az emberekre gyakorolt negatív környezeti hatásokat több nézőpont alapján is leírhatjuk, például lehetséges megközelítési mód az életkedv és a munkavégzésre való képesség csökkenésének, vagy az orvosi beavatkozások költségeinek vizsgálata.
 - Élő természeti környezet: ennél a kategóriánál az elemzés a populációdinamikára fókuszál, nem pedig az egyes egyedek jólétére, mint az emberi egészség kategória esetében. A károsodás mértékének indikátorként a fajok előfordulása és egyedszáma használható.
 - Abiotikus természeti források: az emberi tevékenység következtében az abiotikus természeti források kimerülnek, így a jövő számára már csak korlátozottan lesznek hozzáférhetőek. Jelenleg nincs olyan ismert indikátor, amely egyaránt kifejezi az erőforrások mennyiségének és elérhetőségének csökkenését is.
 - Az ember által létrehozott abiotikus és élő környezet: ebbe a kategóriába tartoznak a mezőgazdasági és erdészeti termények, vízi kultúrák, háziállatok, épületek, bányák, közlekedési struktúrák is. Indikátorként használható a kármegelőzésre, a termelés mennyiségének fenntartására vagy a javításra fordított költségek nagysága.

- Abiotikus természeti környezet: az ide sorolt természeti képződményeknek általában eszményi értékük van, és nem használják őket erőforrásként, pl. geológiai képződmények, gleccserek, vízesések

2. Napelemes rendszerek életciklus vizsgálatának irodalmi áttekintése

2.1. Kristályos szilícium napelemek életciklus vizsgálata a svájci Ecoinvent adatbázissal

Ebben a fejezetben a (JUNGBLUTH, N. 2004) tanulmányt ismertetem, mégpedig a többenél nagyobb részletességgel, ugyanis saját modelletem nagyrészt erre a dolgozatra alapoztam. Az életciklus leltár tartalmazza a kvarc redukciójának, a szilícium tisztításának, az ostyák, panelek és laminált napelemek gyártásának, valamint a konverter és a felszereléshez szükséges alkatrészek előállításának adatait. A tanulmányban tizenkét különböző, elektromos hálózatra csatlakoztatott, 3 kW_p teljesítményű napelemes rendszert vizsgáltak, melyek életidejét 30 évre becsülték. A leltár további elemei: az alapanyagok, a félkész termékek és energiahordozók szállítása, a gyártáshoz és az életciklus végéhez kapcsolódó hulladékok kezelése, infrastruktúra és a vele járó földhasználat, levegő- és vízszennyező anyagok.

2.1.1. A metallurgiai minőségű szilícium előállítása

A 99%-os tisztaságú MG-szilíciumot karbotermális redukcióval állítják elő a szilíciumhomokból; redukáló ágensként kokszot, faaprítékot vagy faszenet használnak. Az eljárás életciklus leltárának elemei: az villamos energia és a redukáló ágens igény, kvarc (homok) input, levegő- és vízszennyező anyagok (CO₂, SO₂ és SiO₂ por). A szilíciumgyártás főleg Norvégiában zajlik, ezért a norvég elektromos energia mixet vették figyelembe, melyben jelentős a vízenergia aránya.

2.1.2. A szilícium tisztítása

Az MG-szilíciumot a Siemens eljárás segítségével alakítják át elektronikai minőségű szilíciummá, triklór-szilánon keresztül. A tisztítási lépés leltár adatai egy németországi gyárból kapott információkon alapulnak, így nem tekinthetőek általánosan alkalmazhatónak. Az eljárás során felhasznált elektromos energia földgáz-, illetve vízerőműből származik.

A tisztítási lépésben során három különböző terméket állítanak elő, így az eljárás környezeti hatásai is ezen három termék között oszlanak meg. A felosztásra megoldást kínálnak például az ISO szabványok. Az egyik megoldás szerint az anyagáramokat a termékekhez tartozó bevétel szerint osztják fel, így a legdrágább terméknek lesz a legnagyobb

a környezetre gyakorolt káros hatása. A másik megoldás az, hogy tömeg szerint osztályozzák az anyagáramokat. Ebben az esetben a hidrogén-kloridot a szilícium-tetraklorid gyártásához kell sorolni. Számos LCA tanulmányban az MG-szilícium tisztítási lépés bemenő és kimenő áramait az EG-szilíciumhoz tartozónak tekintik, mert gazdasági szempontból ez tekinthető fő terméknek. Jelen tanulmányban mind a kimenő, mind a bemenő áramokat a három termék között osztják fel. Az MG-szilíciumhoz és a hidrogén-kloridhoz szükséges nyersanyag input a választott végtermékben lévő kémiai elemek (például Si, H) tömege alapján számítható. A betáplált és emittált energiát a két tisztított termékhez sorolják gazdasági megfontolásból. Az egyszerűsítés kedvéért úgy tekintik, hogy az off-grade szilícium kizárólag az EG-szilícium tisztítása során keletkezik, és nem veszik figyelembe, hogy a CZ-szilícium előállítása és a lapkák darabolása is veszteséggel jár. Az off-grade szilíciumot értékesíthető, mert felhasználható az öntéshez.

2.1.3. Az SoG-szilícium előállítása

Az SoG-szilícium a napelemek gyártásához megfelelő minőségű alapanyagot jelenti, melyet a jövőben valószínűleg elterjedten fognak használni. A folyamat energia fogyasztása a különböző források szerint 15-90 kWh/kg, a tanulmányban ezt az értéket 30 kWh/kg-ra becsülték. A jövőben az SoG-szilícium és az off-grade szilícium aránya 50-50%-ra becsülhető az öntvénykészítésben és a Cz-szilícium előállításában.

2.1.4. Öntés

Az EG- és off-grade szilícium (illetve a jövőben SoG-szilícium) olvadékokat újrahasználatos formákba öntik. Az így előállított polikristályos tömbök már közvetlenül alkalmasak ostyák gyártására. Az öntésre vonatkozó leltárban az olvasztáshoz szükséges energia mennyiséget és bizonyos anyagáramokat vettek figyelembe.

2.1.5. A Czochralski monokristályos szilícium előállítása

Az eljárás során az olvadt EG-szilíciumból lassan növekedő kristály válik ki. A folyamat energia igényét 120 kWh-nak vették kilogrammonként. Mivel ezen monokristályos anyag gyártását több európai országban végzik, az UCTE energia mixet használták a számításokhoz.

2.1.6. A tömbök szeletelése

A szilícium oszlopokat 300 mikrométer vastagságú lapkákra szeletelik. A folyamat életciklus leltárában szerepel például a felhasznált elektromos energia, a víz, az argon gáz, a rozsdamentes acél a pengékhez és a sósav. Szintén figyelembe vették a keletkező hulladékot, és az eljárásra jellemző víz- és levegőszennyező anyagokat. A vizsgált gyárban salétromsavas maratást alkalmaztak, ehhez pedig NO_x-et és nitrátot használtak fel. Máshol NaOH-al vagy KOH-al maratnak, vagy száraz maratást végeznek. Így a kapott adatok nem használhatóak általánosan, viszont ebben az esetben fontos szempont a nitrátok figyelembe vétele.

2.1.7. Napelem cellák gyártása

A 10x10 cm-es cellák gyártása magába foglalja a tisztítás és a maratás lépéseit is. Maratás után elhelyezik a lapkák két oldalán az érintkezőket. A lépés leltárának elemei: a felhasznált alapanyagok (savak, oxigén, nitrogén, víz) és energia, valamint a keletkezett hulladék és víz- illetve levegő szennyező anyagok (főként szénhidrogének és savak).

2.1.8. Panelek és laminált napelemek gyártása

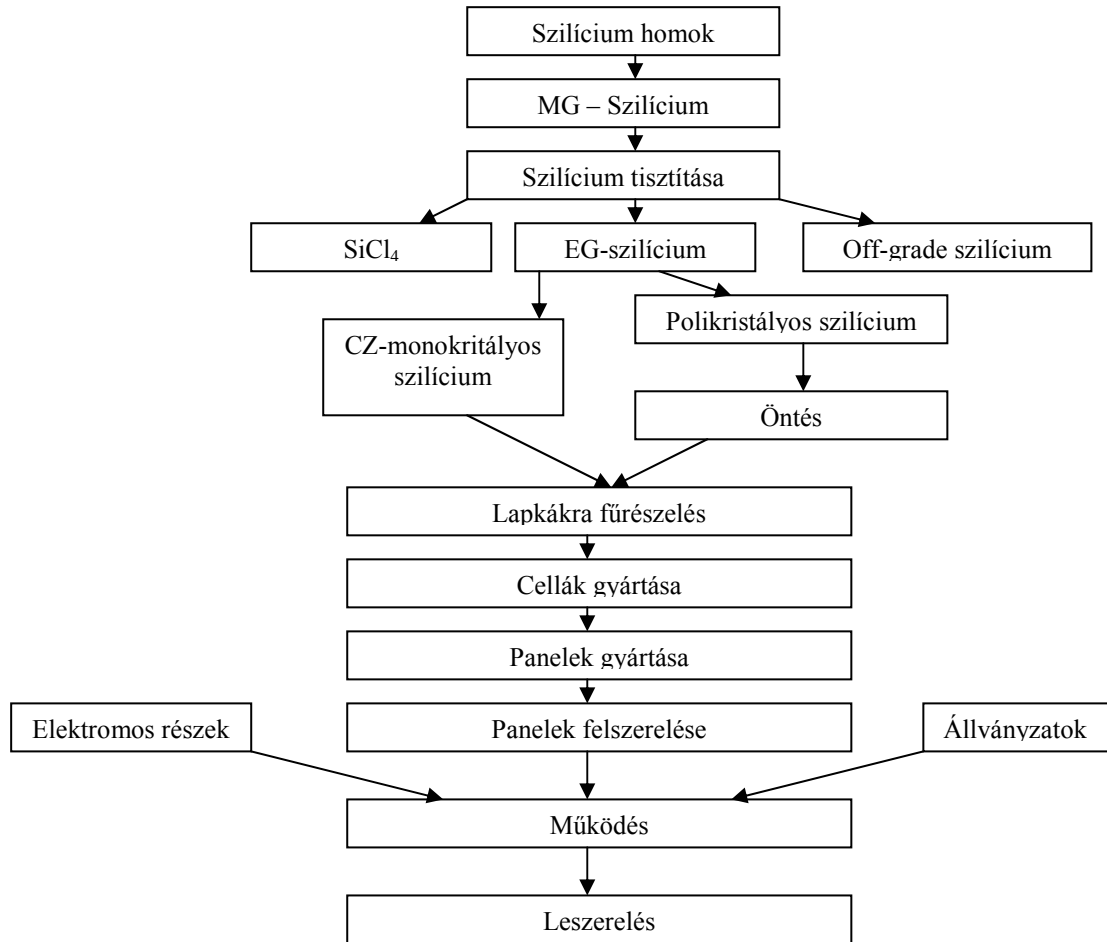
A napelem cellák mindkét oldalát etil-vinilacetát réteggel vonják be. Elülső felület poliészterrel, alumíniummal és polivinilfluorid (Tedlar) filmmel burkolják, hátsó felükre üveg és vas kerül. Ezután magas hőmérsékleten nyomás alatt összepréselik a rétegeket, a széleket egyenesre igazítják és szigetelik a csatlakozókat. Majd csatlakozódobozzal és alumínium kerettel látják el a panelt. Napjainkban olyan modulokat is gyártanak, melyeknek nincs keretük, hanem közvetlenül beépíthetőek. A legyártott paneleket és laminált napelemeket tesztelik, majd csomagolják. A gyártás életciklus leltárába nemcsak az energia és alapanyag fogyasztás tartozik bele, hanem a keletkezett hulladékok kezelése is.

2.1.9. A napelem panelek felszerelése

A paneleket a háztetőkre erősítik, a laminált napelemeket pedig ferde tetőkbe vagy homlokzatokba építik be. Az elemzéskor figyelembe kell venni az szükséges építőanyagokat (például alumínium, műanyag, acél), az ezek gyártásához szükséges energiamennyiséget, és a berendezések, valamint a szerelő személyzet szállítását.

2.1.10. Inverter és egyéb elektromos felszerelések

A leltár elemei: építőanyagok, energiaigény (csak az inverterre), csomagolóanyagok (csak a konverterre) és szállítás.



2.1. ábra: A napelem gyártás lépései

2.1.11. A napelemes rendszerek működése

Svájcban az átlagos besugárzás 1100 kWh/m^2 évente. Egy szokványos, homlokzatba épített, függőlegesen elhelyezett rendszer termelése 626 kWh/kW_p . A leltár magában foglalja a panelek évenkénti tisztításához szükséges víz mennyiségét.

2.1.12. Leszerelés

A rendszerek elhasználódásuk után leszerelésre kerülnek. A tanulmány készítői feltételezték, hogy a nagyobb fém alkatrészeket és a szilíciumot újrahasznosítják, azonban az elemzésben nem vették figyelembe az újrahasznosítás folyamatához tartozó környezeti terhelés és kreditek értékeit. A nem hasznosítható részeket hulladékégetőbe viszik, vagy lerakóra helyezik.

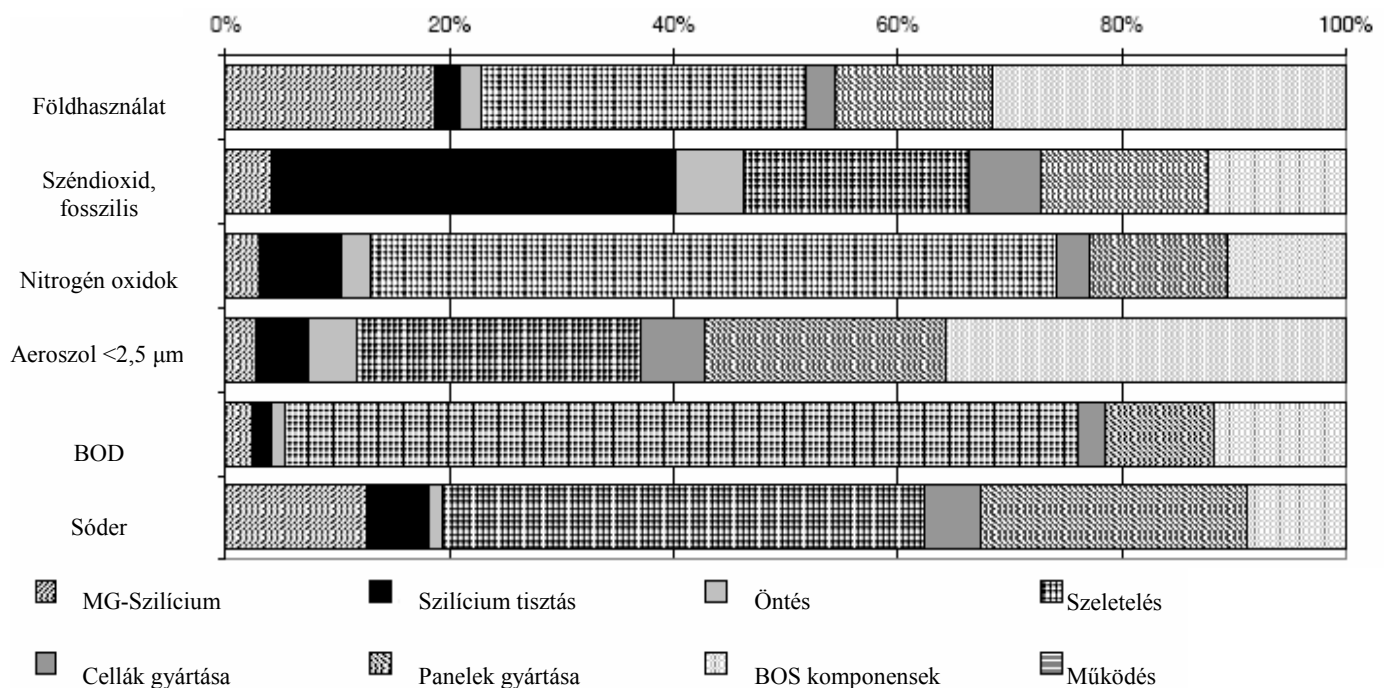
2.1.13. Az életciklus leltár kulcsparaméterei

A korábban ismertetett svájci elemzésekkel ellentétben, a jelenlegiben számításba vették, hogy az elfogyasztott energia környezeti hatása függ attól, hogy az adott területen milyen energia termelési mód a domináns, valamint a gyártáshoz szükséges mellékfolyamatok emisszióit is belefoglalták a leltárelemzésbe. Szintén fontos elem, hogy a szilícium felhasználás hatékonysága növekedett az utóbbi években. Az életciklus leltár kulcsparamétereit a 2.1. táblázat ismerteti.

	Egység	Mono- kristályos	Poli- kristályos
<i>MG-szilícium gyártása</i>			
Elektromos energia használat, NO	kWh/kg	11	11
<i>EG-szilícium gyártása</i>			
Elektromos energia használat, DE	kWh/kg	103	103
<i>CZ-szilícium gyártása</i>			
Elektromos energia használat, UCTE-mix	kWh/kg	123	-
<i>Szilícium lapkák</i>			
Lapkák vastagsága	µm	300	300
Fúrészelési vastagág	µm	200	200
Lapkák területe	cm ²	100	100
Súly	g	6,99	6,99
Cella teljesítménye	W _p	1,65	1,48
Cella hatékonysága	%	16,5	14,8
MG-szilícium igény	g/lapka	19	19,2
EG-szilícium igény	g/lapka	11,2	11,2
Szeletelés energia igénye	kWh/lapka	0,3	0,3
Cellák előállítás	kWh/cella	0,2	0,2
<i>Panelek/laminált napelemek</i>			
Cellák száma	cella/panel	112,5	112,5
Panel felülete	cm ²	12529	12529
Aktív felület	cm ²	11250	11250
Panel teljesítménye	W _p	185	166
Cellaigény	cella/kW _p	608	677
Gyártás energia igénye	MJ/kW _p	0,23	0,26
<i>3 kW_p rendszer</i>			
Panel összfelület	m ²	18,2	20,3
<i>Éves áramtermelés</i>			
Ferde tető	kWh/kW _p	885	885
Homlokzat	kWh/kW _p	626	626

2.1. táblázat: Az életciklus leltár kulcsparaméterei.

2.1.14. Eredmények



2.2. ábra: Az egyes gyártási lépések részesedése kiválasztott károsodási kategóriákban.

A következtetések levonásához először is minősíteni kell az anyagáramokat. Például a felületkezeléshez felhasznált nitrogén-oxidok jelentős emissziót jelentenek. A tanulmány készítői arra a következtetésre jutottak, hogy bármelyik gyártási lépés meghatározó lehet a termék környezeti hatásában.

A következő lépés az életciklus hatás vizsgálat. Az összesített energia igény (CED) öt különböző energia fajtából tevődik össze: fosszilis, nukleáris, víz, biomassza és egyéb (nap, szél, geotermikus). Az eredményekben tapasztalható különbségek oka főleg az, hogy földrajzi elhelyezkedéstől függően más és más az elektromos energia mix. A napelemes rendszer működési ideje alatt a napenergia a meghatározó ebben a kategóriában. Fontos megvizsgálni azt is, hogy az emittált gázok milyen mértékben járulnak hozzá a globális klímaváltozáshoz.

Az anyagáramok összevonhatóak egy indikátorba. Jelen vizsgálatban az Eco-indicator 99-et és az „ökológiai szükség 1997-et” használták. Az Eco-indicator 99 aszerint jellemzi a különböző emissziókat, hogy milyen károsodások köthetőek hozzájuk. Például a légzőszervi hatások azokat a betegségeket jelentik, amelyeket a belélegzett légszennyezők okoznak. Az egyes károsodásokat súlyozzák, majd egy indikátor pontban összegzik. A súlyozáshoz szociális szempontokat vesznek figyelembe. Az ökológiai szükség módszere a svájci környezeti irányelveken alapul, és a szennyezők emissziójának csökkentését megcélzó

törekvések alapján súlyozza a tényezőket. Az Eco-indicator módszerrel a felhasznált fémek és energia kapnak nagyobb súlyt, míg az ökológiai szükségesség elve szerint a légszennyező anyagoknak, például a nitrogén-oxidoknak van jelentős hatása. Ez az oka annak, hogy jelentős környezeti hatást állapítottak meg a lapkák előállításának esetében, a maradáshoz kapcsolódó emissziók miatt.

Az adatok bizonytalansága az életciklus leltárak elemei közül az atomerőműhöz kapcsolódó nukleáris emisszió, a kőszén bányászat és az Eco-indicator 99 (H,A) egyes károsodási kategóriái esetén a legnagyobb.

A különböző napelemes rendszereket a következő kategóriák alapján hasonlították össze: összesített energia igény, szén-dioxid kibocsátás, aeroszolok (2,5 mikrométernél kisebb) és biológiai oxigén igény.

A homlokzati rendszerek hatásai nagyobbak, mint a tetőbe vízszintesen vagy ferdén beépítetteteké, melynek oka a kisebb teljesítmény. A legtöbb aeroszol a tetőre vízszintesen elhelyezett panelek életciklusa során keletkezett, mert ezek előállításához különleges öntési eljárásokat alkalmaznak, nehezebbek a többi egységénél, valamint a keretük sok alumíniumot tartalmaz, melynek gyártása során nagy mennyiségű aeroszol keletkezik. A laminált napelemek kisebb mértékben járulnak hozzá a környezetterheléshez, mivel a keretük előállításához sokkal kevesebb energia szükséges. Az Eco-indicator 99 (H,A) módszer szerint a legnagyobb környezeti hatások a fosszilis energiahordozók felhasználásához, valamint a nitrogén-oxidok és aeroszolok által okozott légzőszervi gondokhoz kapcsolódtak. Fontos megjegyezni, hogy a már felszerelt napelem eszközök tényleges teljesítménye általában alacsonyabb, mint az elméleti teljesítményük, amit optimális körülmények között állapítanak meg. Jelen tanulmányban arra a következtetésre jutottak, hogy a monokristályos napelemek nagyobb mértékben járulnak hozzá a környezetterheléshez, mint a polikristályosak.

Ha az ökológiai szükségesség 1997 indikátort használjuk az életciklus leltár elemzéséhez, arra az eredményre jutunk, hogy a légszennyező anyagoknak, különösen a nitrogén-oxidoknak jelentős részesedése van a károsodási kategóriákban. Szintén nem elhanyagolhatóak a vízszennyező anyagok (nitrogén, kémiai oxigén igény), és a lerakóra helyezett hulladékok. Az említett módszert használva ugyancsak kicsivel környezetkímélőbbnek minősültek a polikristályos rendszerek.

A Monte Carlo szimulációval is a polikristályos megoldások tűntek előnyösebbnek. Ennek a módszernek az a lényege, hogy úgy tekintjük az elemzés során, mintha minden bizonytalanság egy irányba hatna.

Korábban a monokristályos napelemek előállítása drágább volt, mint a polikristályosaké, viszont ezt ellensúlyozta a nagyobb hatékonyságuk. Napjainkban több gyártási lépésben is kevesebb energiát használnak fel, mint régebben, így a mono- és polikristályos rendszerek környezeti hatásai közötti különbségek is csökkentek.

2.1.15. Összehasonlítás más energiatermelési módokkal

A különböző energiatermelő módszerek környezeti hatásait négy szempont alapján hasonlították össze: összesített energia igény a nem megújuló energiaforrásokból, üvegházhatású gáz kibocsátás, Eco-indicator 99 és ökológiai szűkösség 97. Mind a négy minősítő módszer alapján a napelemes rendszerek nagyobb környezetterhelést okoznak, mint más megújuló energiát hasznosító erőművek (szél, víz, fa), míg a földgázzal vagy kőolajjal működő erőművek negatív hatásai a legnagyobbak. Összességében a napelemek számos tekintetben kisebb károsodást okoznak, mint a hagyományos erőművek, viszont nagyobb, mint más alternatív módszerek. Ezek a megállapítások elsősorban Svájcra érvényesek, mivel más országokban mások a körülmények, például az energia mix vagy a meteorológiai viszonyok.

2.1.16. Energia megtérülési idő

Az energia megtérülési idő igen sarkalatos pontja a megújuló erőforrásokat hasznosító rendszerek megítélésének. Korábban az energia megtérülési idő azt az időt jelentette, amely alatt az eszköz által megtermelt energia mennyisége egyenlő lesz azzal az energiával, melyet felhasználtak az előállításához. Így nem vették figyelembe az energia eredetét (például nukleáris, fosszilis), sem pedig a formáját (például hő vagy elektromos energia). Jelen tanulmányban az energia megtérülési időt úgy definiálták, mint azt az időtartam, amely alatt a rendszer előállítása során okozott környezetterhelés mértéke - beleszámítva, hogy használata során elkerülhető az emisszió és egyéb erőforrások használata -, meg fog egyezni azzal a terheléssel, melyet egy, a vizsgált eszközzel azonos mennyiségű energiát termelő, hagyományos referencia rendszer okoz.

Az összesített energia igény 3-6 év alatt térül meg napelemes rendszerek esetében. Mivel az energia használat a működés során elhanyagolható, a teljes energia igény nagyrészt a gyártáshoz szükséges mennyiséget jelenti, amely megegyezik egy gázzal működő erőmű által 3-6 év alatt elfogyasztott energia mennyiséggel. A 3-6 év megtérülési idő ötöde-tizede a napelemek élettartamának. Ha az emissziókat is figyelembe vesszük, az ökológiai szűkösség

módszerével 25 év lesz a környezeti megtérülési idő, míg az Eco-indicator 99-el alig több mint a 3-6 év, melyet az energiára számoltak. Azonban ha a svájci energia mixet vesszük referenciának, az előbbi indikátorral sokkal kevesebb, míg az utóbbival nagyobb megtérülési időt kapunk. Tehát az elemzés eredménye nagyban függ attól, hogy milyen feltevésekkel élünk.

A jövőben valószínűleg 30-50%-kal csökkennek majd a modulok környezetkárosító hatásai, de ehhez a piac megfelelő fejlődése szükséges. Fontos előrelépést jelentene a napelemekhez megfelelő minőségű (SoG, solar grade) szilícium használata az elektronikai minőségű helyett.

A rendelkezésre álló adatok szűkössége miatt nehéz eldönteni, az eltérések a mono- és polikristályos rendszerek között szisztematikusak-e, vagy csak a különféle gyártási eljárásokból adódó véletlenszerű ingadozásokból. A környezeti hatásvizsgálatok rámutattak arra, hogy milyen fontos az egyes folyamatokra jellemző specifikus emissziókat is a megfelelő súllyal kezelni, valamint hogy többféle energiatermelési mód összehasonlításakor célszerű több módszert, indikátort alkalmazni. Az összevetések eredményei nagyban függenek a regionális tényezőktől, például a besugárzástól, vagy a technológiai szabványoktól. Az életciklus elemzéshez célszerű minél több forrásból származó adatokat használni.

2.2. Kristályos szilícium napelemek gyártásának környezeti hatásai - multikristályos, monokristályos és szalag technológiák összehasonlítása

Az alábbiakban az (ALSEMA, E.–DE WILD-SCHOLTEN, M. 2006): tanulmányt foglalom össze. Az abiotikus kimerülés, globális felmelegedés, sztratoszférikus ózon koncentráció csökkenés, fotokémiai oxidáció, savasodás és eutrofizáció hatáskategóriák mindegyikében a monokristályos technológia káros hatása a legnagyobb, a szalagos szilícium egységeké pedig a legkisebb. Ennek az a fő oka, hogy a különböző típusú modulok gyártásához eltérő mennyiségű energia szükséges. A napelemek gyártása az említett folyamatok közül háromhoz járul hozzá jelentős mértékben: a fosszilis tüzelőanyagok kitermelése miatt az abiotikus források kimerüléséhez, az üzemanyagok elégetésével pedig a globális felmelegedéshez és a savasodáshoz, míg az ózonkoncentrációra gyakorolt hatás igen kicsi.

2.2.1. Energia igény

A környezeti hatások leginkább az előállításához szükséges energia mennyiségétől függenek, így mérséklésük a felhasznált energia csökkentésével lehetséges. Az összesített energia igényt (CED) különösen megnöveli a polikristályos szilícium gyártása, a kristályosítás és a lapkák előállítása, az utóbbi főleg monokristályos szilícium alapanyag esetén. Az energia ráfordítás a szalagos szilícium modulok esetén a legkisebb. Ennek az viszonylag alacsony polikristályos szilícium fogyasztás a fő oka (a lapkákat közvetlenül az olvadt szilíciumból állítják elő, fűrészelés nélkül, így kicsi a nyersanyag veszteség). A cella- és modulgyártás folyamata, amely ugyanúgy zajlik a polikristályos, monokristályos és szalag technológiák esetén is, kisebb mértékben járul hozzá a teljes energiaigényhez, azonban a felhasznált üveg, hátsó fólia, etilén-vinil-acetát, és keret energia igénye nagy, akárcsak a lapokra vágás során felhasznált szilícium-karbidé és egyéb anyagoké, és ez az utóbbi annál inkább nőni fog, minél vékonyabb szilícium-lapokat állítanak elő.

2.2.2. Energia megtérülési idő

A vezetékes hálózatra csatlakoztatott, és háztetőre telepített rendszerek energia megtérülési ideje (EPBT) 1,7-2,7 év Dél-Európában (besugárzás: 1700 kWh/m²·év), és 2,8-4,6 év Közép-Európában (besugárzás: 1000 kWh/m²·év). Az energia megtérülési időt elsősorban a laminált modulok előállítása növeli, az elektronika és az egység kerete csak nagyon kis mértékben. A napelemes rendszerek – ha feltételezzük, hogy 30 évig működőképesek – teljes élettartamuk során 30-45 g szén-dioxidnak megfelelő üvegházhatású gázt bocsátanak ki kilowattóránként, mely érték töredéke a fosszilis tüzelőanyagokon alapuló technológiák emissziójának, viszont több mint a szél vagy nukleáris energiát hasznosító módszerek kibocsátása.

2.2.3. Jövőbeni változások

A közeljövőben számos újítás várható a napelem modulok előállításában. Ha a polikristályos szilícium alapanyag gyártása során az ülepítéshez FBR (folyadék ágyas reaktor) technikát alkalmaznak, legalább 70%-kal csökkenthető az elfogyasztott elektromos energia mennyisége. Szintén csökkenthetik a modulok energia igényét az újfajta polikristályos szilíciumöntő és lapka-előállító módszerek. Ugyanezen okok miatt a szalagos és poli-szilícium technológiás modulok élettartama során kibocsátott szén-dioxid mennyisége akár 17,

ill. 20 g/kWh-ra csökkenhet. A jövőben várható a száraz maratásra használt fluorozott gázok növekvő alkalmazása, melyek szintén üvegházhatásúak: például ha nem csökkentik a jelenlegi, egy MW_p-re jutó 40 kg-nyi CF₄ emissziót, akkor az egyes napelem egységekre jutó teljes üvegházgáz kibocsátás 20%-kal növekedhet.

2.3. Napelem modulok újrahasznosításának életrajzi analízise

Ebben a részben a (MÜLLER, A. et al. 2006) tanulmányt ismertetem. A napelem modulok gyártása és alkalmazása rohamosan növekszik, emiatt pedig egyre több lesz a napelemekből származó hulladék mennyisége is. Ezen egységek környezetkárosító hatása akkor lesz a legkisebb, ha elhasználódásuk után újrahasznosítják őket, mivel az újrahasznosítás által okozott környezetterhelés lényegesen kisebb mértékű a többi lehetséges életrajzi befejezéshez, illetve az önmagukban újrahasználatos alkatrészek előállításához képest.

2.3.1. A Deutsche Solar újrahasznosító eljárása

A Deutsche Solarban alkalmazott napelem újrahasznosító eljárás célja az, hogy visszanyerjék a szilícium lapkákat a kristályos szilícium modulokból. A folyamat során először leégetik a modulokról a lamináló réteget, majd eltávolítják belőlük a napelem cellákat, melyekről egy következő lépésben lemaratják a fémbevonatot, a pn-átmenetet és a tükröződés gátló réteget.

A hőkezelési fázishoz szükséges energia mennyisége a kazán, az utóégető kamra és a mosóberendezés energia igényéből tevődik össze, de fontos figyelembe venni ez utóbbi jelentős mennyiségű víz- és vegyi anyag fogyasztását, valamint a környezetbe kikerülő levegő- és hulladékamot is. A fémeket, az üveget és a cellákat külön-külön gyűjtik: a fém- és üveg frakció szintén újrahasznosításra kerül más vállalatoknál. A cellák vegyi kezeléséhez, maratásához energia, víz és különböző vegyi anyagok szükségesek. A folyamat során keletkezett szennyvizet tisztító telepekre vezetik.

2.3.2. Energiafogyasztás

Az újrahasznosítási eljárásban a kazán és az utóégető kamra működtetéséhez földgáz, a hulladékgáz tisztításához és a maratáshoz pedig villamos energia szükséges. Ha az összes felhasznált primer energiát 35%-os hatásfokú elektromos energiává számítjuk át, és

feltesszük, hogy a napelem modulok Közép-Európában használják 20 évig, akkor megállapítható, hogy a szilícium lapkák visszanyeréséhez szükséges energia mennyisége kétharmada az új lapkák előállításához szükséges energia mennyiségének. Így az újrahasznosított lapkákat tartalmazó modulok energia megtérülési ideje (1,6 év) sokkal kisebb lesz a hagyományos modulokéhoz képest (3,8 év).

2.3.3. LCA

A standard, 72 cellás, Tedlar hátsó fóliás és alumínium keretes modulok vizsgálata során kiderült, hogy a lapkák, az üveg és a fémek újrahasznosítása csökkentette a modulok környezetterhelő hatását az összes hatáskategóriában (abiotikus kimerülés, globális felmelegedés, ózon koncentráció csökkenés, emberre gyakorolt mérgező hatás, savasodás és eutrofizáció). Ez nagyrészt annak köszönhető, hogy így nem szükséges mindig újabb és újabb lapkákat előállítani. A környezetterhelés mértéke leginkább a hőkezelés energia- és a maratás vegyi anyag igényének függvénye, ezért ezen igények csökkentése a legfontosabb.

2.3.4. Összehasonlítás alternatív módszerekkel

A hagyományos napelem modulok több mint 3 tömegszázaléka szerves anyag, ezért az életciklusuk végéhez ért egységeket nem szabad előzetes kezelés nélkül hulladékként lerakni. Az előkezelés egyik lehetséges módja a települési hulladékégetés, melynek a kilogrammonkénti energia fogyasztása a sokkal nagyobb méretarány miatt lényegesen kisebb, mint a Deutsche Solar újrahasznosító eljárásáé. Ennek ellenére a Deutsche Solar módszere az összes hatáskategória szempontjából kedvezőbb, mert a lapkák és az üveg újrahasznosítása igen pozitívan befolyásolja a környezetre gyakorolt hatások értékeit.

A modulok kezelésének másik módszere az, hogy feldarabolják őket, majd szétválogatják az alkotórészeket. Az egyikféle frakció üvegből áll, ezt fel lehet használni az üveggyártásban, a másik frakciót pedig szerves anyagok, fémek és összetört napelem cellák alkotják. Az utóbbit szerves anyag tartalma miatt csak termikus előkezelés után lehet elhelyezni a hulladéklerakókban. A darabolást alkalmazó eljárás energia fogyasztása két nagyságrenddel kisebb az újrahasznosítás fogyasztásához képest, azonban a napelem modulokat előállító ipar szilícium szűkében van, ezért a lapkák újra használata ésszerűbb megoldás.

3. Napelemes rendszer vizsgálata hazai körülmények között

3.1. A vizsgált hipotetikus rendszer tulajdonságai

Saját modellemben egy hálózatra termelő napelemes rendszerrel foglalkoztam, mivel a gyakorlatban túlnyomó részben ilyeneket telepítenek. Előnyük, hogy nem szükséges hozzájuk akkumulátor, amely nagyban megnövelné a káros környezeti hatás mértékét. Szigetüzemű napelemeket általában csak olyan esetekben alkalmaznak, amikor a vezetékes áram nem, vagy csak aránytalanul drágán érhető el, például: tanyák, parkolóórák, elsősegély telefonok, meteorológiai mérőállomások, hajók, villanypásztorok és mobiltelefon átjátszóállomások esetében. A modellemben vizsgált 1 kW_p, névleges teljesítményű rendszer részei:

- 6 db 166 W_p névleges teljesítményű, 1,125 m² aktív felületű, 14,8% hatásfokú polikristályos szilícium napelem modul (JUNGBLUTH, N. 2004).
- 1 db 1 kW teljesítményű inverter, valamint a hálózati csatlakozáshoz szükséges szabályozó elektronikai eszközök.

Helyszínnek Budapestet vettem, a napelemeket képzeletben egy ideális tájolású – déli fekvésű, 45°-os dőlésszögű – tetőre helyeztem el.

3.2. Az elemzéshez használt szoftver

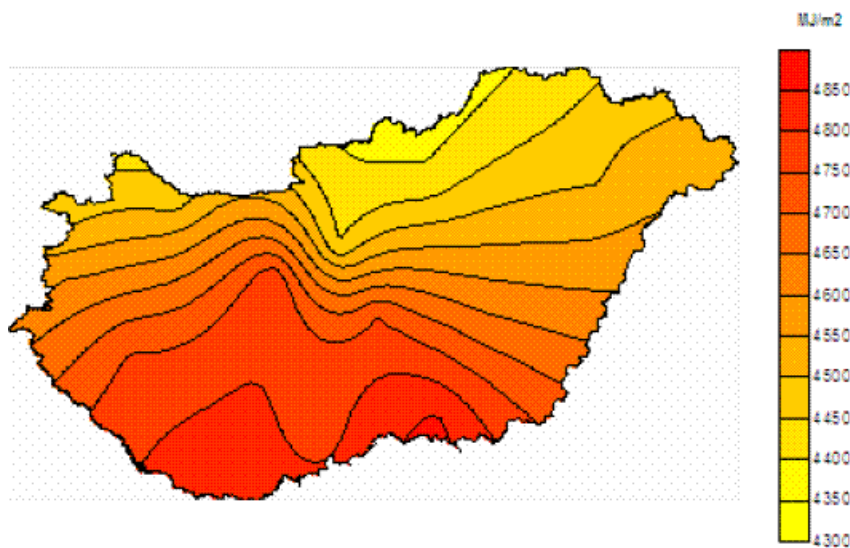
A napelemes rendszer életciklus elemzéséhez a GaBi 4 szoftvert használtam (PE 2008), amely egyike a nemzetközi piacon forgalmazott, teljes életciklus elemzések készítésére alkalmas szoftvereknek. A GaBi 4 – a többi szoftverhez hasonlóan – nagy részben az Ecoinvent adatbázisára épül. A program segítségével megbecsülhetőek egy termék vagy szolgáltatás teljes élete során felmerülő költségek, anyag és energia áramok, emberi egészségre és a környezetre gyakorolt káros hatások. A szoftver egyszerűbbé teszi a folyamatok optimalizálását, a termékmenedzsmentet és az eredmények grafikus megjelenítését.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Sára Balázsnak, a program hazai forgalmazójának, hogy e dolgozat elkészítéséhez, kipróbálásra, két hónapra térítésmentesen rendelkezésünkre bocsátotta a GaBi 4 Professional teljes értékű verzióját.

3.3. Magyarországi napsugárzás adatok

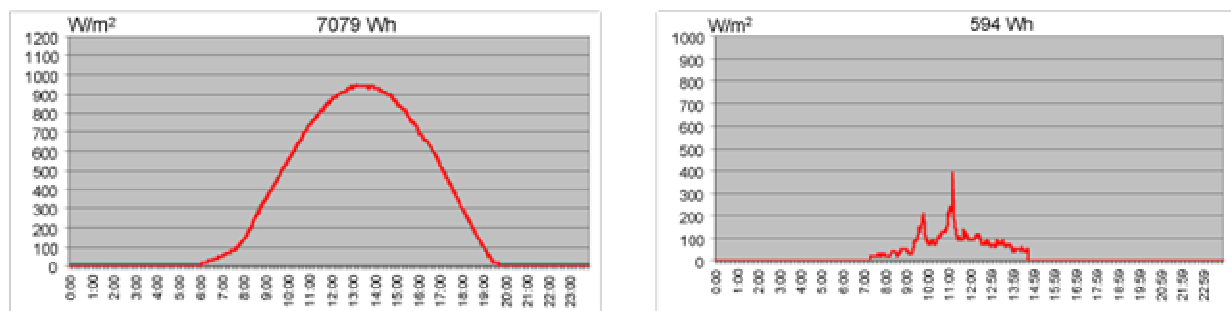
A napelemes rendszerek teljes életciklus vizsgálatának fontos része az élettartam alatt várható energiatermelés mennyisége. Ez függ egyrészt a telepítés helyén érvényes napsugárzási viszonyoktól, másrészt a panelek tájolásától és a helyi környezettől (pl. az égbolt egy részét kitarakja-e egy közeli épület vagy fa).

Az Országos Meteorológia Szolgálat az ország 28 helyszínén méri a vízszintes felületre érkező direkt, diffúz és globális sugárzást (ez utóbbi a két előbbi összege). Az 1997-2005 közötti átlagos éves globális sugárzás területi eloszlását mutatja az alábbi ábra:



3.1. ábra: Az éves összesített globális sugárzás átlagának területi eloszlása (BELLA SZ. 2005).

A napelemes rendszer áramtermelésének becslésére használhatnánk ezeket az adatokat is, bár bonyodalmat okozna, hogy át kellene számítanunk a besugárzási értékeket déli tájolású, 45°-os dőlésszögű felületre. Szerencsére erre nincs szükség, mert más forrásból rendelkezésre áll egy szintén többéves adatsor a pontosan ilyen tájolású felületre érkező globális sugárzásról, amelyet hitelesített, Kipp & Zonen gyártmányú, CM-5 típusú piranométerrel vett fel a Naplopó Kft. budapesti telephelyén (NAPLOPÓ KFT. 2008). Az alábbiakban bemutatunk két tipikus napi sugárzási adatsort:



3.2. ábra: Globális sugárzás egy derült és egy borús napon: 2008. augusztus 18-án (bal) és 2008. november 12-én (jobb) (NAPLOPÓ KFT. 2008).

Az adatsorok összesítése szerint 2004-2007. időszakban az éves globális sugárzás értékek rendre 4813, 5133, 4784, 5083 MJ/m² voltak. Ezek átlaga és szórása: 4950±180 MJ/m². Ez az érték a várakozásnak megfelelően meghaladja az OMSZ budapesti, vízszintes felületre vonatkozó mérési eredményét (4400-4500 MJ/m²). Modellemben a 4950 MJ/m² éves globális sugárzási értékkel számoltam. Ez azt is jelenti, hogy a vizsgált 1 kW_p névleges kapacitású napelemes rendszer várható éves áramtermelése 4945 MJ.

3.4. Teljes életciklus elemzés

A vizsgálatot a GaBi 4 életciklus elemző programmal végeztem. Adataim forrása elsősorban a már ismertetett (JUNGBLUTH, N. 2004) tanulmány. A legfontosabb adatokat a 2.1. és a 3.1. táblázat tartalmazza.

Keletkező termékek	EG-szilícium	0,676	kg
	off-grade szilícium	0,0844	kg
	SiCl ₄	1,2	kg
Bemenő anyagáramok	MG-szilícium	1	kg
	polietilén, HDPE, granulált	0,000637	kg
	sósav, 30%-os	2	kg
	földgáz	122	MJ
	elektromos energia	114	kWh

3.1. táblázat: 1 kg MG-szilícium tisztításának bemenő és kimenő anyag és energia áramai

Mivel a részletes anyag és energia igény csupán a szilíciumtömb szeleteléséig áll rendelkezésre, ezért közelítéssel élek: a szoftverben a folyamatokat eddig a pontig teljes részletességgel modellezem. Innen a (JUNGBLUTH, N. 2004)-ban megtalálható, az egyes részfolyamatok relatív környezeti hatásaira vonatkozó adatok alapján extrapolációval becsülöm meg a napelemes rendszer teljes életciklusa során keletkező környezeti hatásokat.

Az elemzésemben explicit nem szereplő folyamatok ill. komponensek:

- napelem cellák előállítása a szilícium szeletekből,
- napelem modulok előállítása a cellákból,
- inverter és egyéb elektronikai alkatrészek,
- napelem modulok felszerelése a tetőre, elektronikai berendezések beüzemelése.

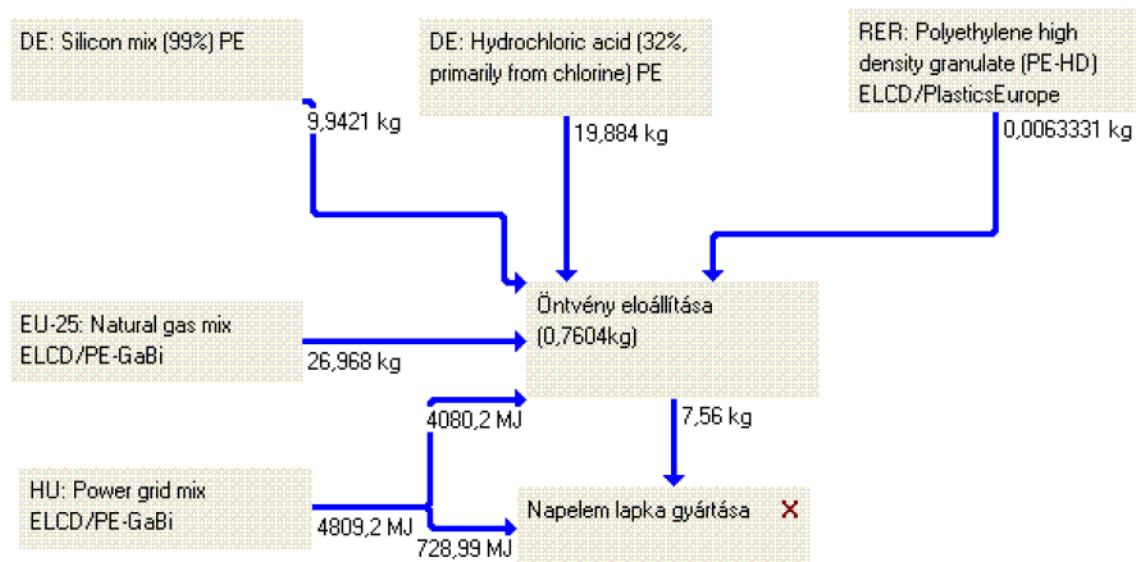
Azonban e folyamatok környezeti hatására lehetséges becslést adni: a 2.2. ábrán látható adatok alapján: a szilícium szeletek előállításáig felmerülő környezeti hatás az egyes kategóriákban jellemzően a teljes rendszerre vonatkozó környezeti hatás 1/3-2/3 részét adja.

Egy megfelelő felső becslést kapok tehát, ha a szilícium szeletek előállításáig felmerülő környezeti hatásokat megszorozom 3-mal minden kategóriában. További egyszerűsítések:

- Az üzemeltetés környezeti hatását elhanyagolom, mivel a szakirodalom szerint ez jelentéktelen súllyal szerepel a napelemes rendszerek teljes életciklusában.
- A leszerelés és ártalmatlanítás környezeti hatását semlegesnek vettem, mivel egyrészt a napelemek hosszú élettartama miatt még kevés erre vonatkozó adat áll rendelkezésre, másrészt a már ismertetett (MÜLLER, A. et al. 2006) tanulmány szerint a napelemek újrahasznosítása – figyelembe véve a felújított modulok életciklusának első fázisát – környezeti hatás szempontjából pozitív. Ez az egyszerűsítés tehát nem sérti a környezeti hatás becslés felső korlátát jellegét.

Polikristályos napelem gyártása lapkáig, 1kW

GaBi 4 process plan: Reference quantities
The names of the basic processes are shown.



3.3. ábra: Egy 1kW_p névleges teljesítményű napelemhez szükséges polikristályos szilícium lapkák általam definiált gyártási folyamata a GaBi 4 szoftverben. Minden doboz tartalmazza a részletes anyag és energia mérlegeket.

Vizsgálatom egyedi vonásai a korábbi tanulmányokhoz képest:

- A magyar villamos energia mixet szerepeltetem minden lépésben, ahol elektromos energia felhasználására van szükség. Ezzel tehát hazai napelem gyártást feltételezek, de ezt megalapozza, hogy immár két napelemgyár működik Magyarországon, és továbbiakat is terveznek nyitni a közeljövőben.
- Budapesti besugárzási adatokat veszek figyelembe a már ismertetett módon.
- Úgy tekintem, hogy a napelemes rendszer által termelt áram a magyar villamos energia mixből vált ki ugyanekkora mennyiségű áramot, tehát az ennek megfelelő

környezeti hatás kiváltását állítom szembe a napelemes rendszer életciklusa során jelentkező környezeti hatásokkal.

3.5. Eredmények

A GaBi 4 szoftverben kiszámítottam az 1 kWp névleges teljesítményű napelemes rendszerhez szükséges mennyiségű szilícium lapka gyártási folyamatának hatását a főbb környezeti indikátorok szerint (és ebből a 3-mal való szorzással, mint felső becsléssel állapítottam meg a teljes napelemes rendszer környezeti hatását), és megtettem ugyanezt a rendszer által egy év alatt várhatóan termelt 4945 MJ villamos energia környezeti hatására is. Feltéve, hogy ezt az energiát a magyar villamos energia mixből takarítjuk meg, ez utóbbi érték azt mutatja meg, hogy a napelemes rendszer egy év alatt mennyi környezeti kártól óvja meg környezetünket. A két mennyiség hányadosa pedig azt jellemzi, hogy a napelemes rendszer hány év alatt „semlegesíti” az általa okozott környezeti károkat, tehát ezt tekinthetjük egyfajta megtérülési időnek is. A környezeti indikátorok mellett kiszámítottuk a nettó primer energia igényt is mind a napelemes rendszer életciklusára, mind a villamos energia magyarországi előállítására. E két mennyiség hányadosa az energia megtérülési időt adja meg. Az eredményeket a 3.2. táblázatban ismertetem.

A legfontosabb eredmény, hogy a megtérülési idő az összes vizsgált indikátorra és a primer energia felhasználásra vonatkozóan 3 és 3,5 év közötti értéknek adódott. Mivel egy napelemes rendszer élettartama jellemzően 30 év, kijelenthetjük, hogy teljes életciklusára vonatkoztatva egy Magyarországon telepített, hálózatra termelő napelemes rendszer nagyságrendileg tízszeresen megtérül mind környezeti hatás szempontjából, mind a befektetett/megtermelt primer energia szempontjából. Érdekes még megjegyezni, hogy az egyes indikátorok között a megtérülési idők szempontjából nem találtam lényeges különbséget.

Indikátor (angolul)	Mértékegység	A napelemes rendszerhez szükséges szilícium lapkák előállításának környezeti hatásai	A napelemes rendszer teljes életciklusa során keletkező környezeti hatások (felső becslés)	A várható éves áramtermelés (4945 MJ) környezeti hatása, a magyar villamos energia mixből származna	Megtérülési idő (év)
CML 2001, Global Warming Potential (GWP 100 years)	kg CO2-Equiv.	9,47E+02	2,84E+03	9,22E+02	3,08
CML 2001, Acidification Potential (AP)	kg SO2-Equiv.	9,74E+00	2,92E+01	9,58E+00	3,05
CML 2001, Eutrophication Potential (EP)	kg Phosphate-Equiv.	2,75E-01	8,26E-01	2,49E-01	3,31
CML 2001, Abiotic Depletion (ADP)	kg Sb-Equiv.	5,94E+00	1,78E+01	5,11E+00	3,49
CML 2001, Photocem. Ozone Creation Potential (POCP)	kg Ethene-Equiv.	5,35E-01	1,61E+00	5,15E-01	3,12
EI 99, Ecosystem quality, Ecotoxicity	PDF*m2*a	3,81E+00	1,14E+01	3,77E+00	3,03
EI 99, HA, Human health, Respiratory (inorganic)	DALY	7,48E-04	2,24E-03	7,27E-04	3,08
Energy (net calorific value) – Nettó primer energia felhasználás	MJ	2,13E+04	6,38E+04	1,94E+04	3,29

3.2. táblázat: A főbb indikátorokra vonatkozó környezeti hatásai ill. nettó primer energia igénye a napelemes rendszernek (felső becslés) és a magyar villamos energia mixnek. Az utolsó oszlop a megtérülési időket mutatja.

3.6. Továbblépési lehetőségek

Számos ponton lehetne tovább folytatni a vizsgálatomat, például:

- Hasonló vizsgálatokat végezni monokristályos és vékonyréteg napelemekre.
- Feltérképezni a szilícium lapkák gyártása utáni folyamatok részletes anyag és energia igényét, és részletesen modellezni a GaBi 4 szoftverben. Ezzel kiváltható lenne a felső becslés, pontosabb megtérülési időket lehetne meghatározni.
- Kideríteni, hogy annak ellenére, hogy a napelem három-négy év alatt megtérül energetikai szempontból, a pénzügyi megtérülési ideje miért áll közelebb a 30 évhez.

Irodalomjegyzék

- ALSEMA, E.–DE WILD-SCHOLTEN, M. 2006: Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaics module production. – In: Papasavva, S.–Fthenakis, V. (eds.): Life-Cycle Analysis Tools for Green Materials and Process Selection – *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 895., Warrendale, PA. paper no. 0895-G03-05.
- BELLA SZ. 2005: Napenergia, mint megújuló energiaforrás, magyarországi lehetőségek. *EUREGA konferencia kiadvány*, Debrecen, pp 31-38.
- FTHENAKIS, V.M.–KIM, H.C. 2005: A Review of Risks in the Solar Electric Life-Cycle, JRC/TREN Conference on Safety & Security of Energy Infrastructures in a Comparative View (SEIF-CV), Brussels, Belgium. Nov. 14-16, 2005. European Commission, Directorate General Joint Research Center (JRC) / Energy and Transport (TREN)
- JUNGBLUTH, N. 2004: Life cycle assesment for crystalline photovoltaics in the Swissecoinvent database – Progress in Photovoltaics: Research and Applications 13. pp. 429-446.
- MÜLLER, A.–WAMBACH, K.–ALSEMA, E. 2006: Life cycle analysis of a solar module recycling process. – In: Papasavva, S.–Fthenakis, V. (eds.): Life-Cycle Analysis Tools for Green Materials and Process Selection – *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 895., Warrendale, PA. paper no. 0895-G03-07.
- Naplopó KFT. 2008: Napsugárzás mérő és adatgyűjtő állomás üzemeltetése. Az adatok nyilvánosan elérhetők a <http://www.naplopo.hu/napsug.html> címen.
- PE INTERNATIONAL–UNIVERSITY OF STUTTGART 2008: GaBi 4 Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen 1992-2008.
- UDO DE HAES, H.A.–VAN ROOIJEN, M. 2005: Life Cycle Approaches – The road from analysis to practice. *United Nations Environment Programme*, Paris

Függelék: Rövidítések és fordítások jegyzéke

abiotic depletion		abiotikus források kimerülése
Balance-of-System	BOC	a modulokhoz tartozó elektronikai alkatrészek
chemical product policy		vegyi anyagok termeléspolitikája
cleaner production	CP	tisztább termelés
combined heat and power production	CHP	kapcsolt energiatermelés
Cumulative Energy Demand	CED	összesített energia igény
dematerialization		anyagszükséglet csökkentése
Disability Adjusted Life Years	DALY	Egészségkárosodástól mentes várható élettartam
eco-efficiency		öko-hatékonyság
electronic grade silicon	EG-silicon	elektronikai minőségű szilícium
end of life management	EOL	életciklus végének kezelése
Energy Pay-Back Time	EBPT	energia megtérülési idő
environmental impact assessment	EIA	környezeti hatás kiértékelés
environmental IOA	env. IOA	környezeti input/output analízis
environmental labelling and env. certification system		környezeti tanúsítás és biztosítás rendszere
environmental management accounting	EMA	környezet-menedzsmenti elszámolás
environmental management system	EMS	környezeti menedzsment rendszer
environmental risk analysis	ERA	környezeti kockázat vizsgálat
Environmental Risk Assessment	ERA	környezeti kockázat vizsgálat
ethylene vinyl acetate	EVA	etilén-vinil-acetát
extended producer responsibility	EPR	kiterjesztett termelői felelősség
Fluidized Bed Reactor	FBR	folydékágyas reaktor
greenhouse gas	GHG	üvegházhatású gáz
industrial ecology	IE	ipari ökológia
input/output analysis	IOA	input/output analízis
integrated product policy	IPP	integrált termék politika
integrated waste management		integrált hulladék és nyersanyag menedzsment
life cycle assessment	LCA	teljes életciklus elemzés
life cycle costing	LCC	életciklus árkalkuláció
life cycle impact assessment	LCIA	életciklus hatásvizsgálat
life cycle inventory analysis	LCI	életciklus leltárelemzés
life cycle management	LCM	életciklus menedzsment
metallurgical grade silicon	MG-silicon	metallurgiai/kohászati minőségű szilícium
photovoltaic	PV	fényelektromos, napelemes
Pressurized Water Reactor	PWR	nyomóvíz reaktor
PV power plant		naperőmű
Renewable Energy Source	RES	megújuló erőforrás
ribbon		szalag
Small and medium-sized enterprise	SME	kis- és középvállalkozás
Society of Environmental Toxicology and Chemistry	SETAC	Környezettoxicológiai és -kémiai Társaság
Solar Grade (silicon) v. Silicon on Glass	SoG-silicon	napelem gyártáshoz megfelelő minőségű szilícium
sustainable development		fenntartható fejlődés
sustainable procurement		fenntartható beszerzések
total cost accounting	TCA	teljes költségszámítás
United Nations Environment Programme	UNEP	ENSZ Környezetvédelmi Program
wafer		(szilícium) lapka

