

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

HULLADÉKOK ENERGETIKAI CÉLÚ HASZNOSÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA ENERGIAHATÉKONYSÁG, KÖLTSÉG-HASZON ÉS ÉLETCIKLUS-ELEMZÉSI MÓDSZEREKKEL

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE:

Bodnár István

okleveles gépészmérnök, villamosmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
TRANZSPORTFOLYAMATOK- ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Prof. Dr. Tisza Miklós

a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Prof. Dr. Páczelt István

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professzor emeritus

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Dr. Czibere Tibor

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, rektor emeritus

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Siménfalvi Zoltán

PhD, egyetemi docens

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Dr. Mannheim Viktória

PhD, ügyvezető

Miskolc, 2016

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|---|-----|
| EREDETISÉGI NYILATKOZAT | 4 |
| TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA..... | 5 |
| RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK..... | 7 |
| JELÖLÉSJEGYZÉK..... | 9 |
| ÁBRAJEGYZÉK..... | 13 |
| TÁBLÁZATJEGYZÉK..... | 14 |
| 1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK | 17 |
| 2. A HULLADÉKGAZDÁLKODÁS ALAPJAI | 20 |
| 2.1. A HULLADÉK ÉS HASZNOSÍTÁSÁNAK FOGALMAI | 20 |
| 2.1.1. INTEGRÁLT HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI PIRAMIS..... | 23 |
| 2.1.2. HULLADÉKOK CSOPORTOSÍTÁSA | 25 |
| 2.2. HULLADÉKOK ENERGETIKAI HASZNOSÍTÁSA..... | 27 |
| 2.2.1. HATÁSFOK KRITÉRIUM TSZH KEZELÉSE ESETÉN | 31 |
| 2.2.2. HULLADÉKBÓL TÖRTÉNŐ KAPCSOLT ENERGIATERMELÉS | 32 |
| 2.3. ORSZÁGOS HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI TERV 2014-2020 | 34 |
| 3. A BIOMASSZA ÉS A HULLADÉKOK ÖSSZETÉTELE | 38 |
| 3.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZA ÉS FAHULLADÉKOK | 38 |
| 3.1.1. BIOMASSZA POTENCIÁL | 39 |
| 3.1.2. FAÖSSZETÉTEL | 41 |
| 3.2. TELEPÜLÉSI SZILÁRD HULLADÉK ÖSSZETÉTELE | 42 |
| 4. TERMIKUS KEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK | 44 |
| 4.1. ALAPTECHNOLÓGIÁK..... | 45 |
| 4.1.1. HAGYOMÁNYOS ÉGETÉS | 47 |
| 4.1.2. PIROLÍZIS..... | 50 |
| 4.1.3. GÁZOSÍTÁS..... | 54 |
| 4.1.4. PLAZMATECHNOLÓGIA | 59 |
| 4.2. KOMBINÁLT TECHNOLÓGIÁK..... | 63 |
| 4.2.1. EGYLÉPCSŐS, FOLYAMATINTEGRÁLT TECHNOLÓGIÁK..... | 63 |
| 4.2.2. KÉT- ÉS TÖBBLÉPCSŐS, TECHNOLÓGIAINTEGRÁLT TECHNOLÓGIÁK | 66 |
| 5. TERMOKINETIKAI MODELLVIZSGÁLAT | 67 |
| 5.1. A MODELL ALAPEGYENLETE..... | 67 |
| 5.2. EGYENSÚLYI ÁLLANDÓK MÓDSZERE | 70 |
| 5.2.1. REAKCIÓKÉPES KÖZTI TERMÉKEK..... | 74 |
| 5.3. A MODELLEGYENLETEK SZOFTVERES MEGOLDÁSA..... | 75 |
| 6. ENERGETIKAI HATÉKONYSÁG-VIZSGÁLATOK..... | 77 |
| 6.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZÁK HATÉKONYSÁGTÉRKÉPEI..... | 80 |
| 6.1.1. PIROLÍZIS HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI..... | 82 |
| 6.1.2. GÁZOSÍTÁS HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI..... | 86 |
| 6.1.3. PLAZMATECHNOLÓGIA HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI | 90 |
| 7. ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS | 93 |
| 7.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZA ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEI..... | 98 |
| 7.1.1. HAGYOMÁNYOS ÉGETÉS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK..... | 98 |
| 7.1.2. PIROLÍZIS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK | 102 |
| 7.1.3. GÁZOSÍTÁS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK | 105 |
| 7.1.4. PLAZMATECHNOLÓGIA ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| 7.2. TELEPÜLÉSI SZILÁRD HULLADÉK ÉLETciklus-ELEMZÉSE | 112 |
| 8. EGYSZERŰSÍTETT ENERGETIKAI KÖLTSÉG-HASZON ELEMZÉS | 114 |
| 9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK..... | 120 |
| 10. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA, GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁG ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK | 122 |
| 11. NEW SCIENTIFIC RESULTS - THESIS | 124 |
| 12. SUMMARY RESULTS, TECHNICAL EXPEDIENCE AND FACILITY IMPROVEMENT | 126 |
| KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS..... | 128 |
| AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN KÉSZÍTETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK | 129 |
| IRODALOMJEGYZÉK | 132 |
| MELLÉKLETEK | 137 |
| I. MELLÉKLET | 137 |
| II. MELLÉKLET..... | 139 |
| III. MELLÉKLET..... | 140 |
| IV. MELLÉKLET | 149 |
| V. MELLÉKLET..... | 156 |
| VI. MELLÉKLET | 158 |

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott *Bodnár István* büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a *„Hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata energiahatékonyság, költség-haszon és életciklus-elemzési módszerekkel”* című, a Miskolci Egyetemen működő Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljeseek.

Kelt: Miskolc, 2015. október 15.

Bodnár István
doktorjelölt

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

Bodnár István a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán 2010-ben Villamosmérnöki BSc szakon kiváló minősítéssel, majd 2012-ben Gépészmérnöki MSc szakon kiváló minősítéssel szerzett kitüntetéses diplomát. Doktori képzését 2012. szeptemberében kezdte, a három éves időszak alatt teljesítette az abszolutórium feltételeit, elindította doktori eljárását és elkészítette doktori értekezését. Kiváló, egyenletes tanulmány teljesítményét mutatja, hogy a PhD abszolutóriumot 269,5 kreditponttal teljesítette.

2015. szeptemberétől az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetben tanársegédként dolgozik. Már a doktori képzés időszakában bekapcsolódott a környezetvédelem és környezet-menedzsment tárgyak oktatásába, tanársegédként ezen tárgyak és az azokat felölelő tudományterület felelős vezetője. Kiemelkedő a hallgatókkal kapcsolatos konzultációs tevékenysége, számos szakdolgozat, diplomaterv és TDK dolgozat konzulense volt. Eredményességét mutatja, hogy hallgatói közül az intézményi TDK konferencián több alkalommal I., II. és III. helyezést értek el, valamint előadói különdíjban részesültek, ezzel kijutva az Országos Tudományos Diákköri Konferenciára.

Folyamatosan részt vett intézeti kutatásokban, ezek révén igen sok, az értekezés készítése során is hasznosítható, gyakorlati tapasztalat birtokába jutott. Jelenleg is több projekt résztvevője (TÁMOP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0017 InterTeam; TÁMOP 4.2.1C-14/1/Konv-2015-0012 Miskolc-Egyetemváros 2015 - TudásPark) és előkészítés alatt álló pályázat közreműködője.

„Hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata energiahatékonyság, költség-haszon és életciklus-elemzési módszerekkel” című PhD értekezését folyamatos munkával készítette el. Az elkészített értekezés egyik legnagyobb értékének azt tartom, hogy a tudományos kutatások eszközzel, tudatos és jól megválasztott alkalmazásával a mindennapi gyakorlat számára is hasznosítható eredményekhez vezetett.

Bodnár István emberileg, oktatóként és kutatóként is kiváló kolléga, eddigi tudományos tevékenységével, PhD értekezésének elkészítésével az önálló, alkotó tudományos tevékenység végzésére való alkalmasságát messzemenően bizonyította.

Összefoglalva, az elkészült értekezést tartalmi és formai vonatkozásban igényesnek tartom, a jelölt eredményes munkája közvetett bizonyítéka a Karon folytatott doktori képzés magas színvonalának.

Kelt: 2015. október 15.

Dr. Siménfalvi Zoltán Károly
tudományos vezető

Dr. Mannheim Viktória
társ-témavezető

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

| | |
|---------------------|--|
| AC | Alternating Current- Váltakozó áram |
| ADP elements | Abiotic Depletion Potentials- Abiotikus kimerülő források |
| AP | Acidification Potential- Savasodási Potenciál |
| APD fossil | Abiotic Depletion Potentials- Abiotikus kimerülő fosszilis források |
| CFC | Chlorofluorocarbons- Klór-Fluór-Karbon |
| CML | Centrum Milieukunde Leiden |
| COD | Commission Directive- Bizottsági Irányelv |
| DCB | Dichlorbenzole- Diklórbenzol |
| EDIP | Environmental Development of Industrial Product |
| EK | Európai Keretirányelv |
| EP | Eutrophication Potential- Eutrofizációs Potenciál |
| EPFL | Swiss Federal Institute of Technology Lausanne |
| EU | Európai Unió |
| EWC | European Waste Catalogue- Európai Hulladék Katalógus |
| FAETP | Freshwater Sedimental Eco-Toxicity Potential- Tengervízi Őko-toxicitási Potenciál |
| FM | Földművelésügyi Minisztérium |
| GWP | Global Warming Potential- Globális Felmelegedési Potenciál |
| HCFC | Hydrochlorofluorcarbon- Hidro-Klór-Fluor-Karbon |
| HFC | Hydrofluorcarbon- Hidro-Fluor-Karbon |
| HKI | Hulladék Keretirányelv |
| HTP | Human Toxicity Potential- Humán Toxicitási Potenciál |
| ICRF | Inductively Coupled Radio Frequency- Induktív Csatolású Rádió Frekvenciás |
| IGCC | Integrated Gasification Combined Cycle- Kombinált Ciklussal Integrált Gázosítás (kapcsolt energiatermelés) |
| ISO | International Organization for Standardization- Nemzetközi Szabványügyi Testület |
| KÖM | Környezetvédelmi Minisztérium |
| LCA | Life Cycle Assessment- Életciklus-elemzés |

| | |
|--------------|--|
| LHV | Lower Heating Value- Alsó fűtőérték |
| MAETP | Marine Sedimental Eco-Toxicity Potential- Édesvízi Öko-toxicitási Potenciál |
| MSZ | Magyar Szabvány |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration- Nemzetközi Repülési és Űrhajózási Hivatal |
| ODP | Ozone Depletion Potential- Ózonréteg Elvékonyodási Potenciál |
| OHT | Országos Hulladékgazdálkodási Terv |
| PCB | Poliklórozott Bifenil |
| PCDD | Polichlor-Dibenzodioxin- Poliklór-Dibenzodioxin |
| PCDF | Polychlor-Dibenzofurans- Poliklór-Dibenzofurán |
| PCT | Poliklórozott Terfenil |
| PE | Polietilén |
| PET | Polietilén- tereftalát |
| POCP | Photochemical Ozone Creation Potential- Fotokémiai Ózonképződési Potenciál |
| PP | Polipropilén |
| RDF | Refuse-Derived Fuel- Hulladékból Származtatott Tüzelőanyag |
| SRF | Solid Recovered Fuels- Újrahasznosítható Szilárd Tüzelőanyagok |
| TETP | Terrestrial Eco-Toxicity Potential- Földi Öko-toxicitási Potenciál |
| TFH | Települési Folyékony Hulladék |
| TRACI | Total for the Reduction and Assessment of Chemical Impacts |
| TSZH | Települési Szilárd Hulladék |
| WtE | Waste to Energy- Hulladékból Energiát |

JELÖLÉSJEGYZÉK

| | |
|---------------------------------------|---|
| a | a tüzelőanyag nitrogéntartalma |
| a_C | a tüzelőanyag moláris karbon tartalma |
| a_H | a tüzelőanyag moláris hidrogéntartalma |
| a_O | a tüzelőanyag moláris oxigéntartalma |
| a_{ij} | a j-edik elem atomszáma az i-edik komponensre vonatkoztatva |
| A_C | a tüzelőanyag karbon tartalma tömegszázalékban |
| A_{CO_2} | szén-dioxid keverési aránya |
| A_H | a tüzelőanyag hidrogéntartalma tömegszázalékban |
| A_O | a tüzelőanyag oxigéntartalma tömegszázalékban |
| $ADP_{fossil_{n\lambda}}(n, \lambda)$ | abiotikus kimerülő fosszilis források a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| $AP_{n\lambda}(n, \lambda)$ | savasodási potenciál a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| b_j | a j-edik elem atomjainak teljes moláris koncentrációja |
| B_e | a villamos energia átvételi ára |
| e_k | fajlagos energikihozatal |
| e'_k | a (gázosító közeg cseréje, vagy a megváltoztatott technológiai paraméterek által okozott) módosult fajlagos energikihozatal |
| $e_{kn\lambda}(n, \lambda)$ | fajlagos energikihozatal a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| E_f | a rendszer éves energia inputja a gőz termeléséhez hozzájáruló tüzelőanyagokból |
| E_i | éves bevitt energia az E_w és az E_f kivételével |
| E_p | az éves hőenergia- vagy elektromosenergia-termelés |
| E_{pe} | az éves energia elektromos áram formájában |
| E_{pth} | a kereskedelmi használatra előállított éves hőenergia |
| E_w | a kezelt hulladék energiatartalma éves szinten a hulladék nettófüttőértékével számítva |

| | |
|-------------------------------|---|
| $EP_{n\lambda}(n, \lambda)$ | eutrofizációs potenciál a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| F_{gt} | a gáztermék fűtőértéke |
| F_{szt} | a tüzelőanyag fűtőértéke |
| G | a Gibbs-féle szabad energia |
| G_i^0 | az i-edik alapanyag 1 mol anyagmennyiségre vonatkoztatott fajlagos szabadenergiája atmoszférikus nyomáson |
| $GWP_{n\lambda}(n, \lambda)$ | globális felmelegedési potenciál a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| h_o | olajhűtésből származó hő |
| h_v | víz hűtésből származó hő |
| H | haszon |
| H_k | a tüzelőanyag egy mólnyi karbon tartalmára vonatkoztatott hidrogéntartalom |
| $HTP_{n\lambda}(n, \lambda)$ | humán toxicitási potenciál a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| k_{gt} | fajlagos gáztermelés |
| k_{pk} | fajlagos pirokokszi kihozatal |
| k_{po} | fajlagos piroolaj kihozatal |
| $k_{szgn\lambda}(n, \lambda)$ | szintézisgáz-termelés a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| K_1 | víz-gáz reakció egyensúlyi állandó |
| K_2 | metánképződés egyensúlyi állandója |
| K_e | a fajlagos energia kihozatali konstans |
| $K_{ADP\ fossil}$ | a fajlagos abiotikus kimerülő fosszilis források potenciál konstans |
| K_{AP} | a fajlagos savasodási potenciál konstans |
| K_{EP} | a fajlagos eutrofizációs potenciál konstans |
| K_{GWP} | a fajlagos globális felmelegedési potenciál konstans |
| K_{HTP} | a fajlagos humán toxicitási potenciál konstans |
| K_k | a korrekciós tényező |
| K_{kszg} | a fajlagos szintézisgáz termelési konstans |
| K_{ODP} | a fajlagos ózonréteg elvékonyodási potenciál konstans |
| K_η | a reakció határfok konstans |
| KTG_{CO_2} | a szén-dioxid bekerülési költsége |
| m | moláris oxigénigény |
| $m_{elméleti}$ | a tökéletes égéshez tartozó elméleti moláris oxigénigény |
| m_C | karbon atomtömege |
| m_H | hidrogén atomtömege |
| m_O | oxigén atomtömege |
| \dot{m}_{gt} | a gáztermék tömegárama |
| \dot{m}_{szt} | a szilárd tüzelőanyag tömegárama |
| n | nedvességtartalom tömegszázalékban |

| | |
|------------------------------|---|
| n_m | a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma |
| n_{mm} | teljes mól szám |
| O_l | a tüzelőanyag egy mólnyi karbon tartalmára vonatkoztatott oxigéntartalom |
| $ODP_{n\lambda}(n, \lambda)$ | ózonréteg elvékonyodási potenciál a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében |
| p | a rendszer nyomása |
| P_{th} | az erőgép által leadott nettó termikus teljesítmény |
| P_v | az erőgép által leadott nettó villamos teljesítmény |
| \dot{Q}_{be} | tüzelőanyaggal bevitt hőteljesítmény |
| \dot{Q}_{ki} | kivett hőteljesítmény |
| R | az egyetemes gázállandó |
| T | a rendszer hőmérséklete |
| $\dot{W}_{generátor}$ | generátor teljesítménye |
| \dot{W}_{GM} | gázmotor mechanikai teljesítménye |
| $\dot{W}_{szivattyú}$ | szivattyúteljesítmény |
| $\dot{W}_{turbina}$ | turbina mechanikai teljesítménye |
| x_1 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma |
| x_2 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris szén-monoxidtartalma |
| x_3 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris vízgőztartalma |
| x_4 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris szén-dioxidtartalma |
| x_5 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris metántartalma |
| x_6 | a keletkező nyers szintézisgáz maradó moláris oxigéntartalma |
| x_7 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris nitrogén-monoxidtartalma |
| x_8 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris nitrogén-dioxidtartalma |
| x_9 | a keletkező nyers szintézisgáz moláris nitrogéntartalma |
| x_{10} | a keletkező nyers szintézisgáz moláris dinitrogén-oxid-tartalma |
| x_{bi} | a hulladék biológiai úton lebomló komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| $x_{éh}$ | a hulladék nem azonosítható éghető komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| $x_{ét}$ | a hulladék nem azonosítható éghetetlen komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| $x_{fé}$ | a hulladék fémkomponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_{fi} | a hulladék finomszemcsés komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_{hi} | a hulladék higiéniai komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_i | az i-edik komponens egyensúlyi mól száma, azaz az i-edik alapanyag anyagmennyisége a keverékben |
| x_j | a keletkező nyers szintézisgáz egyéb összetevőinek moláris mennyisége |
| x_{ka} | a hulladék karton komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |

| | |
|-------------------------------|---|
| x_{ko} | a hulladék kompozit komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| $x_{mü}$ | a hulladék műanyag komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_{pa} | a hulladék papír komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_{te} | a hulladék textil komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| $x_{üv}$ | a hulladék üveg komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| x_{ve} | a hulladék veszélyes komponenseinek mennyisége tömegszázalékban |
| y_i | x_i közelítő megoldása |
| Δe_{ak} | abszolút összesített energiasűrűség változás |
| Δe_{ath} | abszolút termikusenergia-sűrűség változása |
| Δe_{av} | abszolút villamosenergia-sűrűség változása |
| Δk_{gt} | fajlagos gáztermelés változás |
| Δe_k | fajlagos energiakihozatal változás |
| Δk_{pk} | fajlagos kokszttermelés változás |
| Δe_{rk} | relatív összesített energiasűrűség változás |
| Δe_{rth} | relatív termikusenergia-sűrűség változása |
| Δe_{rv} | relatív villamosenergia-sűrűség változása |
| ΔF_{szl} | szilárd tüzelőanyag fűtőértékének változása |
| $\Delta \Pi_r$ | reakció hatásfok változás |
| Π_{eg} | az erőgép összhatásfoka |
| Π_{egth} | erőgép termikus hatásfoka |
| Π_{egv} | erőgép villamos hatásfoka |
| Π_{ek} | energiakonverziós összhatásfok |
| Π_{ekth} | termikus energiakonverziós hatásfok |
| Π_{ekv} | villamos energiakonverziós hatásfok |
| $\Pi_{é}$ | égési hatásfok |
| Π_n | a létesítmény nettó összhatásfoka |
| Π_r | reakció, kémiai hatásfok |
| $\Pi_{rn\lambda}(n, \lambda)$ | reakció hatásfok $\Pi_{rn\lambda}(n, \lambda)$ |
| λ | légfelesleg tényező |
| λ_j | Lagrange- együtthatók |
| $\sum x_i$ | a végtermék egyensúlyi mól számainak összege, a keverék anyagmennyisége |

ÁBRAJEGYZÉK

| | |
|--|-----|
| 2.1. ábra: Integrált hulladékgazdálkodási piramis | 23 |
| 2.2. ábra: Hulladékok csoportosítása halmazállapot alapján | 26 |
| 2.3. ábra: Hulladék energetikai célú hasznosításának lehetőségei | 28 |
| 2.4. ábra: Gőzkazánnal és gőzturbinával megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája | 33 |
| 2.5. ábra: Gázmotorral megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája | 34 |
| 2.6. ábra: Települési szilárd hulladék alakulása 2004-2014 között | 36 |
| 4.1. ábra: Felső kiáramlású gázosító reaktorban kialakuló zónák elvi felépítése | 56 |
| 4.2. ábra: Alsó kiáramlású gázosító reaktorban kialakuló zónák elvi felépítése | 56 |
| 4.3. ábra: Gázosító reaktorok típusai az ágy függvényében | 57 |
| 4.4. ábra: Fluidágyas gázosító reaktor elvi felépítése | 57 |
| 4.5. ábra: Plazmareaktor felépítése és anyagáramai | 60 |
| 6.1. ábra: Fajlagos energiakihozatal függése a légszeletől és az alapanyag nedvességtartalmától az „I” jelű elemi összetételű biomasszára vonatkozóan | 87 |
| 7.1. ábra: Az életciklus-értékelés szakaszai | 95 |
| 8.1. ábra: Széndioxid bekerülési költségének hatása a fedezeti pontra | 118 |

TÁBLÁZATJEGYZÉK

| | |
|---|----|
| 2.1. táblázat: Hulladékok csoportosítása eredetük szerint | 25 |
| 2.2. táblázat: Hulladékból energiát technológiák csoportosítása | 28 |
| 3.1. táblázat: Az elsődleges hazai biomassza-potenciál | 40 |
| 3.2. táblázat: Jellegetes fafajták elemi összetétele a száraz bázisra vonatkoztatva | 42 |
| 3.3. táblázat: Települési szilárd hulladék összetevőinek megoszlása az átlagértékekkel | 43 |
| 4.1. táblázat: Termikus kezelési technológiák tipikus reakciókörülményei | 46 |
| 4.2. táblázat: Termikus kezelési technológiák termékei és az alkalmazott erőgépek | 46 |
| 4.3. táblázat: Folyamatintegrált kombinációs termikus kezelési technológiák tipikus reakciókörülményei | 65 |
| 4.4. táblázat: Folyamatintegrált kombinációs termikus kezelési technológiák termékei és az alkalmazott erőgépek | 65 |
| 5.1. táblázat: Fafajták H/C és O/C aránya | 68 |
| 5.2. táblázat: Vizsgált technológiák reakciókörülményei | 71 |
| 6.1. táblázat: Energetikai hatékonyságot leíró mérőszámok | 77 |
| 6.2. táblázat: Energiasűrűség változást leíró mérőszámok | 78 |
| 6.3. táblázat: Fás szárú biomasszák H/C és O/C kategóriái [-] | 81 |
| 6.4. táblázat: Fás szárú biomasszák fűtőértéke a száraz bázisra nézve, F_{szf} [MJ/kg _{fa}] | 81 |
| 6.5. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fás szárú biomasszák fűtőértékére, ΔF_{szf} [MJ/kg _{fa}] | 81 |
| 6.6. táblázat: Fajlagos energia kihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg _{fa}] | 82 |
| 6.7. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energia kihozatalra pirolízis esetében, Δe_k [MJ/kg _{fa}] | 83 |
| 6.8. táblázat: A pirolízis reakció hatásfoka, Π_r [%] | 83 |
| 6.9. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis reakció hatásfokára, $\Delta \Pi_r$ [%] | 83 |
| 6.10. táblázat: Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [kg _{gáz} /kg _{fa}] | 84 |
| 6.11. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis fajlagos fagáztermelésére, Δk_{gt} [kg _{gáz} /kg _{fa}] | 84 |
| 6.12. táblázat: Fajlagos kokszttermelés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [kg _{kocsz} /kg _{fa}] | 85 |
| 6.13. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis fajlagos kokszttermelésére, Δk_{pk} [kg _{kocsz} /kg _{fa}] | 85 |

| | |
|--|-----|
| 6.14. táblázat: Összefoglaló táblázat az ismertetett fajták pirolizálására vonatkozóan | 85 |
| 6.15. táblázat: Fajlagos energia kihozatali konstans gázosításnál, K_e [MJ/kg] | 87 |
| 6.16. táblázat: Reakció hatásfok konstans alakulása gázosításnál, K_η [%] | 88 |
| 6.17. táblázat: A fajlagos szintézisgáz termelési konstans gázosításra vonatkozóan, K_{kszg} [kg _{gáz} /kg _{fa}] | 89 |
| 6.18. táblázat: Összefoglaló táblázat az ismertetett fajták gázosítására vonatkozóan | 89 |
| 6.19. táblázat: Fajlagos energia kihozatal mértéke plazmatechnológiánál, e_k [MJ/kg _{fa}] | 90 |
| 6.20. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energia kihozatalra plazmatechnológiánál, Δe_k [MJ/kg _{fa}] | 91 |
| 6.21. táblázat: A plazmatechnológia reakció hatásfoka, Π_r [%] | 91 |
| 6.22. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a plazmatechnológia reakció hatásfokára, $\Delta \Pi_r$ [%] | 91 |
| 6.23. táblázat: Fajlagos fagáztermelés mértéke plazmatechnológia esetén, k_{gt} [kg _{gáz} /kg _{fa}] | 92 |
| 6.24. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a plazmatechnológia fajlagos gáztermelésére, Δk_{gt} [kg _{gáz} /kg _{fa}] | 92 |
| 6.25. táblázat: Összefoglaló táblázat az ismertetett fajták plazmatechnológiával történő kezelésére vonatkozóan | 92 |
| 7.1. táblázat: Környezeti hatáskategóriák (CML 2001, 2010. november kiértékelési módszer) | 96 |
| 7.2. táblázat: A vizsgált környezeti hatáskategóriák és az elemzések jellemző paraméterei | 97 |
| 7.3. táblázat: GWP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm CO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 99 |
| 7.4. táblázat: AP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm SO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 99 |
| 7.5. táblázat: EP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm foszfát-egyenérték/kg _{fa} | 100 |
| 7.6. táblázat: HTP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm DCB-egyenérték/kg _{fa} | 100 |
| 7.7. táblázat: ODP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm R11-egyenérték/kg _{fa} | 100 |
| 7.8. táblázat: ADP fossil értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, MJ/kg _{fa} | 101 |
| 7.9. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a környezeti hatáskategóriákra fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan | 101 |
| 7.10. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fajták égetésére vonatkozóan | 102 |
| 7.11. táblázat: GWP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm CO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 102 |
| 7.12. táblázat: AP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm SO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 103 |
| 7.13. táblázat: EP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm foszfát-egyenérték/kg _{fa} | 103 |
| 7.14. táblázat: HTP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm DCB-egyenérték/kg _{fa} | 103 |
| 7.15. táblázat: ODP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm R11-egyenérték/kg _{fa} | 104 |

| | |
|---|-----|
| 7.16. táblázat: ADP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, fossil MJ/kg _{fa} | 104 |
| 7.17. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a környezeti hatáskategóriákra fás szárú biomassza pirolizálása során | 104 |
| 7.18. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fafajták pirolizálására vonatkozóan | 105 |
| 7.19. táblázat: Globális felmelegedési potenciál konstans, K_{GWP} [gramm CO ₂ -egyenérték/kg _{fa}] | 106 |
| 7.20. táblázat: Savasodási potenciál konstans, K_{AP} [gramm SO ₂ -egyenérték/kg _{fa}] | 106 |
| 7.21. táblázat: Eutrofizációs potenciál konstans, K_{EP} [gramm foszfát-egyenérték/kg _{fa}] | 107 |
| 7.22. táblázat: Humán toxicitási potenciál konstans, K_{HTP} [gramm DCB-egyenérték/kg _{fa}] | 107 |
| 7.23. táblázat: Ózonréteg elvékonyodási potenciál konstans, K_{ODP} [gramm R11-egyenérték/kg _{fa}] | 108 |
| 7.24. táblázat: Abiotikus kimerülő fosszilis források potenciál konstans, K_{ADP} fossil [MJ/kg _{fa}] | 108 |
| 7.25. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fafajták gázosítására vonatkozóan | 109 |
| 7.26. táblázat: GWP értéke plazmatechnológiánál, gramm CO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 109 |
| 7.27. táblázat: AP értéke plazmatechnológiánál, gramm SO ₂ -egyenérték/kg _{fa} | 110 |
| 7.28. táblázat: EP értéke plazmatechnológiánál, gramm foszfát-egyenérték/kg _{fa} | 110 |
| 7.29. táblázat: HTP értéke plazmatechnológiánál, gramm DCB-egyenérték/kg _{fa} | 110 |
| 7.30. táblázat: ODP értéke plazmatechnológiánál, gramm R11-egyenérték/kg _{fa} | 111 |
| 7.31. táblázat: ADP fossil értéke plazmatechnológiánál, MJ/kg _{fa} | 111 |
| 7.32. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása fás szárú biomassza plazmatechnológiával történő kezelés esetén | 111 |
| 7.33. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fafajták plazmatechnológiával történő kezelésére vonatkozóan | 112 |
| 7.34. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat az átlagos összetételű hulladék égetésére vonatkozóan | 113 |
| 8.1. táblázat: Szén-dioxid segédgáz alkalmazásának energetikai hatása és pénzügyi vonzata plazmatechnológiánál | 117 |
| 8.2. táblázat: Vízgőz segédgáz alkalmazásának energetikai hatása és pénzügyi vonzata plazmatechnológiánál | 119 |

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Magyarország hulladékgazdálkodása az utóbbi évtizedben jelentős változáson ment keresztül. A 2004-es Európai Unióhoz való csatlakozását követően hazánkban is megjelent az intézményesített és szervezett szelektív hulladékgyűjtés, amely 2015. január 1-től kötelezővé vált a kommunális hulladék begyűjtésére vonatkozóan. Az Európai Unió előírásai kötelezik hazánkat, hogy 2020-ig a háztartási, és az ahhoz hasonló hulladékból származó üveg-, fém-, műanyag és papírhulladék újrahasználatra történő előkészítésének és újrafeldolgozásának mértékét 50%-ra növelje [5].

2012-ben beépült a hazai hulladékgazdálkodási jogszabályokba az integrált hulladékgazdálkodási piramis, ami a korábban alkalmazott deponálási módszerek helyett az újrahasznosítást helyezte előtérbe. Ennek megfelelően a lerakás és az energiatermelés nélküli hagyományos égetés helyébe, a jobban preferált, anyagában történő- és az energetikai célú hasznosítás lépett. A hulladékgazdálkodásban ez volt az első igazán jelentős lépés, amit a jogalkotók a környezetvédelem és a fenntartható fejlődés irányába tettek.

Az anyagában történő hasznosítás előfeltétele a szelektív hulladékgyűjtés, ennek hiányában alternatív kezelési módszerként az energetikai célú hasznosítás kerül előtérbe. A keverten gyűjtött hulladék szétválogatásával előkészíthető az egyes komponensek anyagában történő hasznosítása, de ez gyakran jelentős költséggel jár, ami ez által az erőművi tüzelőanyagként történő alkalmazást kedvezőbb helyzetbe hozza. A szelektív hulladékgyűjtés számos módja terjedt el, amit jellemzően a gyűjtőszigetek és a házhoz menő zsákos, valamint a több gyűjtő-edényzetes kivitelű gyűjtés jelent. Napjainkban mindezek elérhetők a lakosság számára.

A hulladék energetikai célú hasznosítására termikus kezelési technológiákat alkalmazunk, mint például a hagyományos égetés, a pirolízis, a gázosítás és a plazmatechnológia, valamint ezek kombinációja. Az alternatív termikus technológiák legnagyobb előnye a hagyományos égetéssel szemben, hogy a szilárd halmazállapotú hulladékot gáz halmazállapotú energiahordozóvá, úgynevezett szintézisgázzá (pirolízisnél pirogázzá) alakítják át, amelyből nagyobb hatékonyságú technikai körfolyamatban termelhető hasznos hő- és villamos energia. Az így kapott gáztermék vegyipari szintézi-

sekben történő hasznosítása is számottevő mértékű, ilyen eljárás például a metanol gyártás.

A pirolízis egyes változatait már az ókorban is ismerték és alkalmazták elsősorban faszén előállítására, megjelenése a hulladékgazdálkodásban a XX. század közepére tehető. Éghető gázokat ipari méretekben tüzfából (fagáz) és szénből (széngáz) már az 1790-es években is előállítottak gázosítási technológiával. Ezeket a mesterséges gázokat gázgyárakban termelték és a közvilágításban, valamint a hőenergia ellátásban hasznosították. Mindemellett az ipari forradalom idején mezőgazdasági- és ipari gépek üzemeltetésében is fontos szerepet játszott. A Pennsylvaniai olajmezők 1859-ben történő felfedezését követően a kőolaj rohamosan kiszorította a mesterséges gázokat, mert a kőolajszármazékok olcsóbbnak minősültek és nagyobb volt a fajlagos energiataralmuk. A feleslegessé vált gázgyárakat felszámolták, és hosszú évtizedekre a feledés homályába merültek; mígnem 1901-ben - a belső égésű motorok megjelenésével - a fagáz és a széngáz, mint alternatív üzemanyag újra előtérbe nem került [9].

A II. világháború okozta kőolajhiány idején nem csak a hadsereg, hanem a civil járművek és a mezőgazdasági gépek is fel voltak szerelve gázosító reaktorról, amit akkoriban találóan csak gázgenerátornak neveztek [10]. A gázgenerátornak köszönhetően a szilárd tüzfát, és kőszént olyan éghető gázzá tudták alakítani, amely alkalmas volt az akkori belső égésű motorok üzemeltetésére. A háború lezártaig több mint egymillió ilyen jármű volt forgalomban. Napjainkban a gázosítás a szilárd biomassza-hulladékok és a tüzfá főként fűtési célokra történő hasznosításban játszik fontos szerepet.

A plazmatechnológia 1973-as megjelenése óta, azt első sorban a veszélyes ipari, valamint a klór tartalmú hulladékok ártalmatlanítására alkalmazzák. A plazma nagy hőmérsékletű ionizált gáz, amely lehetővé teszi a környezetre veszélyes anyagok, vegyületek teljes lebontását. Napjainkban egyre nagyobb ütemben terjed alkalmazása főleg az Amerikai Egyesült Államokban és egyes ázsiai országokban. A kisebb hőmérsékletű plazmatechnológiát hatékonyan alkalmazzák települési szilárd hulladék, valamint biomassza környezetbarát energetikai hasznosítására.

A kutatómunkám legfőbb célja az azonos összetételű hulladékot hasznosító, eltérő paraméter-beállításokat alkalmazó technológiák összehasonlítása, a tervezési és üzemeltetési folyamatok során az optimális üzemi paraméterek meghatározásának elősegítése. E cél elérése érdekében az egyes technológiai kialakításokat komplex vizsgálatoknak vettem alá.

A bemutatott technológiák vizsgálata és összehasonlítása érdekében termokinetikai modellezést végeztem fás szárú biomasszára és hulladékaikra vonatkozóan. A termokinetikai modellt a moláris anyag- és az energia megmaradás tétele alapján építettem fel. Az egyenletrendszer numerikusan megoldható. A doktori értekezésemben az energetikai célú hasznosítást vizsgálom energiahatékonyság, környezetvédelmi megközelítés és gazdasági-gazdaságossági aspektusok figyelembevételével.

Az energetikai hatékonyságot a jellemző mérőszámok bevezetésével és azok számításával megkeresem az optimum pontokat, valamint ajánlásokat teszek a technológiák alapanyagától függő optimális üzemeltetési paramétereire. A legfontosabb mérőszámok a kémiai és energiakonverziós hatásfok, valamint a hő- és a villamos-energetikai hatékonyság, amit a kezelt hulladék összetétele, nedvesség- és hamutartalma, valamint az alkalmazott segédgáz mennyisége és típusa is befolyásol. E paraméterek befolyásoló képességét hatásfok- és hatékonyságtérképeken ábrázolom.

A környezeti hatásokat életciklus-elemzés segítségével veszem figyelembe. Az életciklus-elemzést több évtizede sikerrel alkalmazzák termékek, technológiák és szolgáltatások környezetközpontú értékelésére. Az utóbbi években, az energiaiparban és a hulladékgazdálkodásban is használják döntéstámogató-döntéshozó módszerként. Az új hulladékgazdálkodási jogszabály 2013 januárjában bevezette az életciklus-szemléletet, de gyakorlati alkalmazást eddig még nem rendelt hozzá, így az elkészített elemzéseim új alapokra helyezhetik Magyarországon, a hulladékok energetikai hasznosításához való viszonyát. Az elemzéseim eredményeként a jelenleg is üzemelő, vagy a jövőben tervezett termikus hulladékhasznosító erőművek működése, környezetvédelmi szempontból is hatékonyabbá tehető. Az életciklus-térképek lehetővé teszik, hogy életciklus-elemző szoftver hiányában is számszerű értékeket kapjunk a technológiák működésére vonatkozóan, a korábban említett alapadatok megadásával.

Végül a gazdasági-gazdaságossági kérdések megválaszolása érdekében a technológiai adatok függvényében egyszerűsítet, energetikai költséghaszon-elemzést végzek a plazmatechnológiával történő kezelésre vonatkozóan. Az elemzések eredményeire alapozva az energetikai és a környezetvédelmi paraméterek felhasználásával optimumkeresési eljárás is alkalmazható.

2. A HULLADÉKGAZDÁLKODÁS ALAPJAI

Létezésünk egyik legáltalánosabb kísérő jelensége a hulladékképződés, amely a számunkra haszontalanná vált anyagok és tárgyak keletkezését jelenti. Az elmúlt évezredekben a hulladék elhelyezése rendszerint nem okozott problémát, mert összetétele hasonló volt a környezetben található nyersanyagokéhoz és mennyisége is a természeti körfolyamat tűrőképességén belül maradt; ezért egyszerűen visszajutattuk a környezetbe. Az ipari forradalmat követően nem csak a mennyiségi- és minőségi elvárások, hanem az egyre nagyobb fogyasztói igények kielégítése is hozzájárult a hulladékképződési potenciál növekedéséhez. Mindemellett megjelentek a mesterségesen előállított anyagok, amik lehetetlenné tették az így már átalakult összetételű hulladék környezetben való biztonságos elhelyezését [1].

A mai tisztán fogyasztói alapelven működő társadalom következménye a szándékolatlan lerövidített élettartamú termékek, mind erkölcsi, mind fizikai értelemben, amik ezen keresztül tovább növelik a keletkező hulladék mennyiségét [1]. Magyarországon évente mintegy 4 millió tonna települési szilárd hulladék, valamint 0,74 millió tonna mezőgazdasági és élelmiszeripari hulladék keletkezik, ami a teljes keletkező hulladékmennyiség mintegy 25%-át teszi ki [4]. A keletkező hulladékok hatékony kezelése elkerülhetetlen és elengedhetetlen feltétele a fenntarthatósági törekvések eléréséhez.

2.1. A HULLADÉK ÉS HASZNOSÍTÁSÁNAK FOGALMAI

A hulladék fogalmának meghatározása során számos nehézséggel szembesülünk. Egyrészt, a hulladék a sokféle emberi tevékenység során keletkező anyagghalmaz, ezért a rá jellemző fizikai és kémiai tulajdonságai eltérőek lehetnek, másrészt a hulladékgazdálkodás a környezetvédelem egyik legfiatalabb tématerülete, ezért a jogszabályi háttére folyamatosan változáson megy át [1]. A hulladék lényegét tekintve nem közvetlenül kör-

nyezetvédelmi fogalom, hanem sokkal inkább gazdasági és jogi megfogalmazás [2]. Ennek következtében a gyakorlatban olyan definíciók találhatók, amik magyarázatra vagy kiegészítésre szorulnak. Egyes fogalmak nem egyértelműek, ezért azok újrafogalmazása elkerülhetetlen a jövő jogszabály-alkotásában. Mindemelllett a nemzetközi gyakorlatban több olyan meghatározás is ismert, amely pontosan értelmezi az egyes hulladéktípusokat, így azok hazai bevezetése egyre sürgetőbb. Jelen alfejezet rövid áttekintést nyújt az alapvető hulladékgyűjtési fogalmak világába, értelmezésébe.

A hulladék fogalmának meghatározására több definíciót is alkalmazunk. Legáltalánosabb értelemben „*a hulladék az ember mindennapi élete, munkája, gazdasági tevékenysége során keletkező, a keletkezés helyén feleslegessé vált, ott közvetlenül fel nem használható, különböző minőségű és halmazállapotú anyag, termék, maradvány, tárgy, leválasztott szennyezőanyag, szennyezett kitermelt föld, amelyet tulajdonosuk sem közvetlenül felhasználni, sem értékesíteni nem tud, és amelynek kezeléséről külön kell gondoskodni*” [1].

E megfogalmazás szerint a hulladék a tulajdonosa számára egy teljesen felesleges anyaghalmoz, amit nem lehet hasznosítani. Mivel a hulladékok legnagyobb része hasznosítható komponenseket tartalmaz, ezért ezt a definíciót célszerűen módosítani kell. A hulladék hivatalos fogalma ettől lényegesen egyszerűbb. A hulladékról szóló 2012. évi CLXXXV. törvény (2. § (1) bekezdésének 23. pontja) a következő módon definiálja a hulladékot: „*bármely anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválnak, megválni szándékozik vagy megválni köteles*”. Ez a megfogalmazás nagyon leegyszerűsít, mindemelllett olyan anyagok és tárgyak is idesorolhatók, amiket semmilyen körülmények között sem mondanánk hulladéknak.

A hulladékok olyan sajátos tulajdonságú anyagi rendszereket alkotnak, amikben az egyes anyagtulajdonságok egyértelműen meghatározhatók; azonban, annak eldöntésében, hogy egy anyag, vagy tárgy ténylegesen hulladéknak minősíthető-e, a társadalmi és a gazdasági tényezők jelentős szerepet játszanak [1]. Az emberek és a társadalom anyagi helyzete, a műszaki és a gazdasági fejlettség, valamint az egyes személyek hozzáállása dönti el, hogy hulladékról beszélünk, vagy valamilyen másodlagos nyersanyagról, erőforrásról.

A joggyakorlatban származási helyük, és a környezetre gyakorolt hatásuk szerint megkülönböztetjük a hulladékokat, mint például a biohulladék, vagy a háztartási, kommunális hulladék, azonban ezek definíciói sem tartalmazzák azt a pluszt, amit maga a hulladék jelenthet bizonyos iparágakban. Célszerűnek tartom a hulladék fogalmának kiegészítését, mégpedig úgy, hogy csak azokat az anyagokat és tárgyakat tartalmazza, amelyeket a jelenleg ismert hulladékkezelési technológiák egyikével sem tudunk hasznosítani. Azok a komponensek, amelyek alkalmasak hasznosításra, kerüljenek ki a hulladék fogalmköréből és két új fogalom bevezetésével adjunk nekik új funkciót, így a hulladékstátusz a gyakorlatban is megszüntethető.

Ennek megfelelően a hulladék új fogalma: *„bármilyen anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és ami az ismert kezelési technológiák egyikével sem hasznosítható”*.

A nevezett jogszabály szerint (2. § (1) bekezdésének 20. pontja) hasznosításnak minősül: *„bármely kezelési művelet, amelynek fő eredménye az, hogy a hulladék hasznos célt szolgál annak révén, hogy olyan más anyagok helyébe lép, amelyeket egyébként valamely konkrét funkció betöltésére használtak volna, vagy amelynek eredményeként a hulladékot oly módon készítik elő, hogy ezt a funkciót akár az üzemben, akár a szélesebb körű gazdaságban betölthesse;...”*

A hasznosítás tehát a hulladék olyan jellegű felhasználását jelenti, amely nyersanyagok és erőforrások kiváltását eredményezi. Ezáltal a hulladék egy értékesíthető, gazdasági értelemben is hasznot eredményező másodlagos nyersanyag, vagy energiahordozó, aminek pozitív a társadalmi megítélése, így jelentősen elősegítene a környezetvédelmi célok elérését. A hasznosításnak két fő típusa ismert, az anyagában történő hasznosítás és az energetikai hasznosítás. Anyagában történő hasznosításnak minősül többek között az alkotó elemek visszanyerése, újrafeldolgozása, regenerálása. (A részletes listát a jogszabály 3. számú melléklete tartalmazza.) Energetikai hasznosításról akkor beszélhetünk, ha a hulladékot tüzelő- vagy üzemanyagként használjuk, illetve bármilyen módon energiát nyerünk vissza. Mindezek alapján célszerű két új fogalmat bevezetni, mégpedig a másodnyersanyag és a másod-energiahordozó fogalmát.

Az anyagában hasznosítható komponensek csoportjának értelmezéséhez vezessük be a másodnyersanyag definícióját: *„bármilyen anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és ami előkészítés, vagy feldolgozás útján alkalmas anyagában történő hasznosításra”*.

Az energiatermelésre alkalmas, vagy alkalmassá tehető komponens-csoportokat pedig a másod-energiahordozó néven definiáljuk: *„bármilyen anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és amely közvetlenül, vagy átalakítást követően energiatermelés céljából hasznosítható”*.

A nemzetközi gyakorlatban az energiatermelésre alkalmas komponenseket RDF-nek (Refuse-Derived Fuel), vagy SRF-nek (Solid Recovered Fuels), azaz hulladékból származtatott üzemanyagnak, vagy alternatív tüzelőanyagnak nevezik [7, 8]. Ebből következően a másod-energiahordozó megnevezés helyénvaló, így szükségesnek tartom a jogszabályban történő rögzítését.

A három definíció kiegészíti egymást, ezért jelentős közöttük az átfedés. A hulladékgazdálkodásban zajló folyamatos kutatás és fejlesztés következtében egyre több alternatív technológia áll a rendelkezésünkre, amelyekkel hatékonyan tudjuk a hulladékainkat hasznosítani. Napjainkban olyan technológiák is ismertek, amikkel a korábban lerakóba került anyagok is hasznossá tehetőek. Bizonyos anyagkomponensek (például a csomagolási hulladékok) kémiai összetételük miatt egyaránt besorolhatók a másodnyersanyagok és a másod-energiahordozók közé. Természetesen az elsődleges célnak

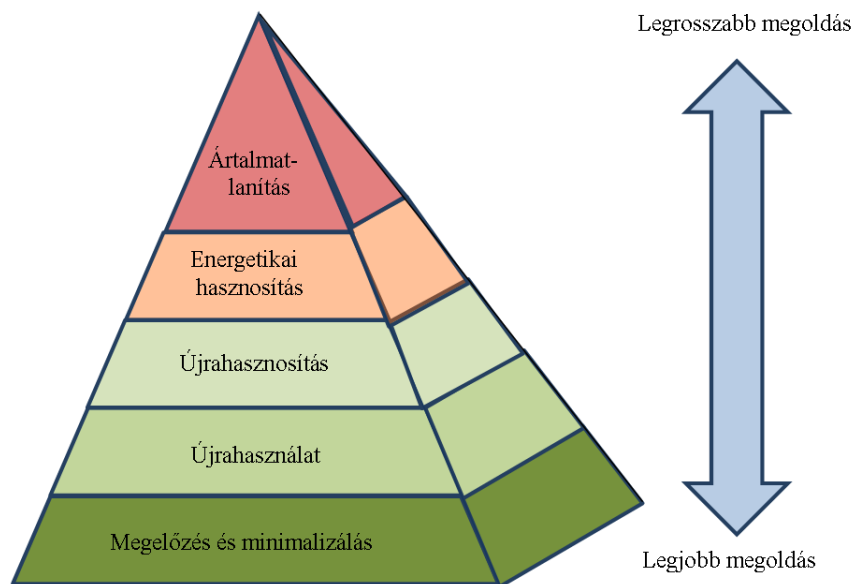
továbbra is az anyagában történő hasznosításnak kell lennie, és csak másodlagos legyen az energetikai hasznosítás, mert az anyagában történő hasznosítás kedvezőbb környezet-terhelési mutatókkal rendelkezik.

A háztartásokban keletkező hulladék csaknem 100%-ban hasznosítható, ezért ezt a csoportot célszerű kivenni a hulladék tárgyköréből. A műanyag, az üveg és a papír csomagolóeszközöket anyagukban tudjuk hasznosítani, és így másodnyersanyagként tekinthetők. Erre vonatkozóan Európai Unió kötelezettségünkből fakadóan 2020-ig el kell érni az 50%-os anyagában történő hasznosításra történő előkészítési arányt [5]. Az ételmaradékok, a zöldségek és gyümölcsök héjai a fermentálás legjobb alapanyagai, így biogáz és talajjavító, műtrágyakiváltó tápanyag visszapótló előállítására alkalmazhatók.

A szelektíven gyűjtött, illetve az ömlesztett hulladékok szétválogatást követően visszavezethetők számtalan gyártási folyamatba, ennek köszönhetően jelentős mértékben lehet nyersanyagokat és fosszilis energiahordozókat kiváltani [23]. Az igazi problémát jellemzően a veszélyes hulladékok, a veszélyes anyagokkal szennyezett csomagolóeszközök jelentik. Ezeket a veszélyességük miatt nem tudjuk biztonságosan anyagában hasznosítani, ez esetben a jogszabályok is az energetikai célú hasznosítást helyezik előtérbe.

2.1.1. INTEGRÁLT HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI PIRAMIS

A hulladékpiramis egy hierarchikus rangsort állít fel a hulladékok kezelésére vonatkozóan (2.1. ábra).



2.1. ábra: Integrált hulladékgazdálkodási piramis [5] alapján

Környezetvédelmi szempontból a megelőzés a legfontosabb, mert ha nem keletkezik hulladék, akkor azok további kezelésében sem kell gondolkodnunk. Napjainkban

nehezen képzelhető el egy olyan gyártási, vagy fogyasztási folyamat, amely hulladék-képződés nélkül állít elő, vagy használ fel termékeket. Ebből következően a minimalizálás elvét célszerű alkalmazni, ami azt hivatott megfogalmazni, hogy a termékek előállítása során törekedjünk a keletkező hulladékok és melléktermékek gyártási folyamatban történő lehető legnagyobb arányú visszaforgatására [5]. A gyártás során olyan segédáramokat alkalmazzunk, hogy maximális legyen az alapanyagok beépülési aránya a végtermékbe, ezzel biztosítva a hulladékképződés minimális értéken tartását.

A fogyasztási hulladék csökkentésének egyik lehetősége a nagyobb kiszérések, egységcsomagok alkalmazása, így a csomagolási hulladék fajlagos mennyisége csökkenthető. Felmerül a kérdés, hogy akkor is megvegyem-e a nagyobb egységcsomagot, ha tudom, a többletet nem fogom felhasználni? Itt már a pazarlás tényével is szembe kell néznünk, ezért csak az ésszerűség határáig célszerű az egységcsomagok méretének növelése. Amire nincs szükségünk, azt nem is fogjuk megvenni. Alapvető törekvéseink e célok elérésére irányulnak. Másik lehetőséget az újratölthető műanyag-, fém- és üvegpalackok jelentik, amelyek begyűjtés, valamint mosási és tisztítási folyamatok után újra a palackozó üzembe kerülnek. A gyakorlatban célszerű vizsgálni e folyamatok környezetre gyakorolt hatását is! Ezzel már át is léptünk egy magasabb szintre, ami az újrahasználatot jelenti. Az újrahasználat során a hulladékká (feleslegessé) vált terméket, vagy rendeltetésének megfelelően újra használatba vesszük, vagy új funkciót adva neki kihasználjuk valamilyen más, előnyös tulajdonságát.

A következő szinten foglalnak helyet a hulladékok hasznosítására irányuló elvek [5]. Első sorban az anyagában történő hasznosítás megvalósítása a kézenfekvő megoldás, ahol a hulladékok különböző összetételű komponenseit, anyagcsoportjait fizikai és/vagy kémiai tulajdonságaik megváltoztatásával másodlagos nyersanyagokat állítunk elő. A leggyakoribb előkészítési műveletek az aprítás, őrlés, és a szétválasztás, ezt követően az alapanyag-gyártás technológiái. Ez a módszer a természetben előforduló anyagforrások kiváltására irányul.

Egy magasabb lépcsőn helyezkedik el az elsődleges tüzelőanyag kiváltás [5]. Az energetikai hasznosítás rendszerint jobban terheli a környezetet, de lényegesen egyszerűbb előkészítést igényel, mint az anyagában történő hasznosítás [26]. Hulladékból energiát sokféle eljárással is vissza tudunk nyerni, ilyen például a pirolízis, amely hőbontás révén három éghető fázist állít elő. Gázosításnál és plazmatechnológiánál az előállított szintézisgáz alkalmazható földgáz kiváltására villamos- és hőerőművekben. Égetésnél hőenergia szabadul fel, valamint szilárd maradék és füstgáz keletkezik. Az ilyen melléktermékeket kizárólag tisztítás után szabad a környezetbe engedni. A biológiailag lebomló hulladékok esetén a fermentálás a legkedvezőbb megoldás, ahol biogáz szabadul fel. Természetesen további eljárások is ismertek, amelyekkel termikus úton történik a kezelés.

A legrosszabb kezelési eljárás az ártalmatlanítás, ami a hulladék lerakását, tárolását, vagy egyszerű - energiatermelés nélküli - égetését jelenti [5]. A lerakásra került

anyagok a lerakókban olyan kémiai változásokon mehetnek keresztül, amik egyrészt még veszélyesebb vegyületeket alkotnak, másrészt pedig utat törhetnek a vízbázisba és a talajba. Az égetés legnagyobb problémája, a felszabaduló füstgáz, leginkább annak veszélyesanyag-tartalma, valamint az üvegházhatást okozó komponensei, tovább gondot okoz a keletkező hamu is. Mindezekből következik, hogy lehetőség szerint a megelőzés és a minimalizálás legyen a legfőbb célunk! Ennek hiányában törekedjünk a teljes hasznosítás eléréséhez, és csak elkerülhetetlen esetekben ragaszkodjunk az ártalmatlanításhoz.

2.1.2. HULLADÉKOK CSOPORTOSÍTÁSA

A hulladékokat több tényező figyelembevételével is csoportosíthatjuk. Az egyes szempontok átfedik egymást, így a csoportok élesen nem különülnek el egymástól. Egyes hulladékhalmozatok megjelölése gyakran egymás mellé rendelt megnevezésekkel történik, ezért a besorolás során számos problémával nézünk szembe. A hagyományos és az új természettudományos alapokon nyugvó osztályozási elvek egymás mellett, gyakran keveredve alkalmazottak a hulladékgazdálkodás gyakorlatában, ezért a következőkben a leggyakoribb csoportosítási szempont szerinti osztályozást mutatom be.

Hulladékok csoportosításának szempontrendszere [1]:

- eredet szerint,
- halmazállapot alapján,
- környezetre gyakorolt hatás szerint,
- jellemző összetétel szerint,
- kezelési osztályba sorolás alapján.

A legelterjedtebb felosztási szempont a hulladékok keletkezésének származási helyét veszi alapul. A hulladékok eredete szerint két nagy csoportot különböztetünk meg, amely a termelési és a fogyasztási hulladékok halmazát hozza létre (2.1. táblázat).

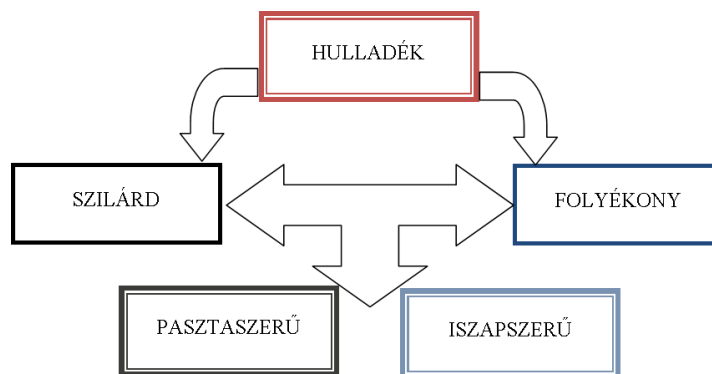
2.1. táblázat: Hulladékok csoportosítása eredetük szerint [1]

| Eredet szerinti csoportosítás | |
|--|--|
| Termelési hulladék | Fogyasztási hulladék |
| Kitermelő, feldolgozó és szolgáltatási folyamatokból származnak | Elosztási, szolgáltatói és fogyasztási tevékenységekből származnak |
| Környezetre gyakorolt hatásuk és iparági származásuk szerint további alcsoportokra oszthatók | Összetételük és mennyiségük az életszínvontól, főleg a fogyasztási szokásoktól jelentős mértékben függ |

A termelési hulladék magába foglalja az ipari, és mezőgazdasági tevékenységből, valamint a szolgáltatóiparból származó hulladékokat, illetve az elhasználódott termelő

berendezéseket. Ezt az anyagalmazt tovább oszthatjuk veszélyességük szerint veszélyesnek és nem veszélyesnek ítélt kategóriákra. A fogyasztásból származó hulladékok rendszerint csomagolóeszközöket, valamint elhasznált termékeket, fogyasztási cikkekét jelentenek, így gyakran települési, vagy kommunális szóval illetik [2].

A halmazállapot alapján történő csoportosítás során megkülönböztetünk szilárd, folyékony, iszapszerű és pasztaszerű hulladékokat (2.2. ábra).



2.2. ábra: Hulladékok csoportosítása halmazállapot alapján

A gáz halmazállapotú „hulladék” lényegében levegőszennyező anyag, ezért ezen anyagok kezeléséről a levegőtisztaság védelem tárgyköre foglalkozik. A gyakorlatban a különböző halmazállapotú hulladékok nem válnak el élesen egymástól, mert a hulladékgazdálkodási lánc (gyűjtés, szállítás, kezelés) során lényegében egymás mellett, keverten szerepelnek. A települési hulladékok tekintetében ez a határ a gyűjtési módból adódóan egyértelműen kijelölhető, mert a szilárd halmazállapotú települési szilárd hulladék (TSZH) és a folyékony halmazállapotú szennyvíz, vagyis a települési folyékony hulladék (TFH) egymástól elkülönítetten kerül gyűjtésre és szállításra [1, 23].

A környezetre gyakorolt hatásuk alapján a hulladékokat további osztályokba soroljuk. A környezetre nézve káros hatást gyakorló hulladékokat veszélyes hulladéknak nevezzük. A nem veszélyes kategóriába tartoznak mindazok a hulladékok, amelyek hatása a környezetre nézve vagy pozitív, vagy a jelenlegi ismeretek szerint semmilyen hatást sem gyakorolnak a környezetre, tehát inertek. A két kategória között célszerű átmenetet értelmezni, mert bizonyos hulladékkomponensek olyan kedvezőtlen anyagi változásokon mehetnek át (bomlás, kémiai reakciók), amelyek következtében a keletkező reakciótermékek káros hatást fejthetnek ki.

Ebből kifolyólag veszélyesnek tekintjük azokat a hulladékokat, amelyek [1]:

- önmagukban, vagy bomlástermékeiken keresztül,
- közvetlenül, vagy közvetve,
- azonnal, vagy késleltetetten az emberi egészségre, vagy az élettelen és az élő környezetre károsító hatást fejtenek ki.

A veszélyes hulladékokat veszélyességi kategóriába soroljuk. Napjainkban 15 kategóriát különböztetünk meg, jelölésük H 1-től H 15-ig terjed. Például külön jellemző a

tűzveszélyesség (H 3) és a robbanásveszélyesség (H 1), valamint önálló alkategóriaként definiált a „Környezetre veszélyes (ökotoxikus)” (H 15) csoport is. A veszélyes hulladékok besorolása világviszonylatban a legkevésbé egységes. Magyarországon az Európai Unió direktívák érvényesülnek.

Jellemző összetételük alapján történő megkülönböztetés a hulladékhalmozat többségében alkotó kémiai elem figyelembevételével történik.

Így megkülönböztetünk [1]:

- műanyag,
- üveg,
- fém,
- papír, és
- szerves hulladékokat.

E főcsoportokon belül az anyagtulajdonságok függvényében további alcsoportok definiálhatók, mint például vas- és nem vas fémek, vagy éppen a polietilén-tereftalát (PET), a polietilén (PE), valamint a polipropilén (PP) műanyag hulladékok. A legnagyobb előnye e csoportosítási szempontnak, hogy már a megnevezés alapján eldönthető, milyen hasznosítási módszer alkalmazása lenne előnyös a hulladék kezelésére.

A hulladékok egységes csoportosítására irányuló törekvések eredményeként 2000-ben megjelent az Európai Hulladék Katalógus (EWC), amely lehetővé tette a különböző hulladékok elektronikus adatfeldolgozás útján történő azonosítását. A kódszám hat számjegyből áll, ahol az első két karakter a 20 főcsoport egyikét jelenti, a másik 4 karakter pedig az alcsoportok azonosítója. Például 150103 kódszámmal jelölik a fa alapanyagú csomagolási hulladékokat.

2.2. HULLADÉKOK ENERGETIKAI HASZNOSÍTÁSA

Az energetikai célú hasznosításon szűkebb értelemben a villamos- és a hőenergia-termelést értjük; mindemellett a mechanikai energia előállítása, mint munkavégzésre fogható energiatípust is célszerű idesorolni, mert egyre inkább előtérbe kerülnek az erőmű-energetikai hasznosítás mellett a bio-üzemanyagok. A hulladékok energetikai célú hasznosítására szolgálnak a termikus hulladékkezelési technológiák. A nemzetközi gyakorlatban a hulladékból energiát (WtE) megnevezés terjedt el, ami magába foglalja az összes olyan eljárást, amely lehetőséget ad a hulladékban rejlő energiamennyiség hasznos hő- és/vagy villamos energia formájában való kinyerésére (2.2. táblázat) [12].

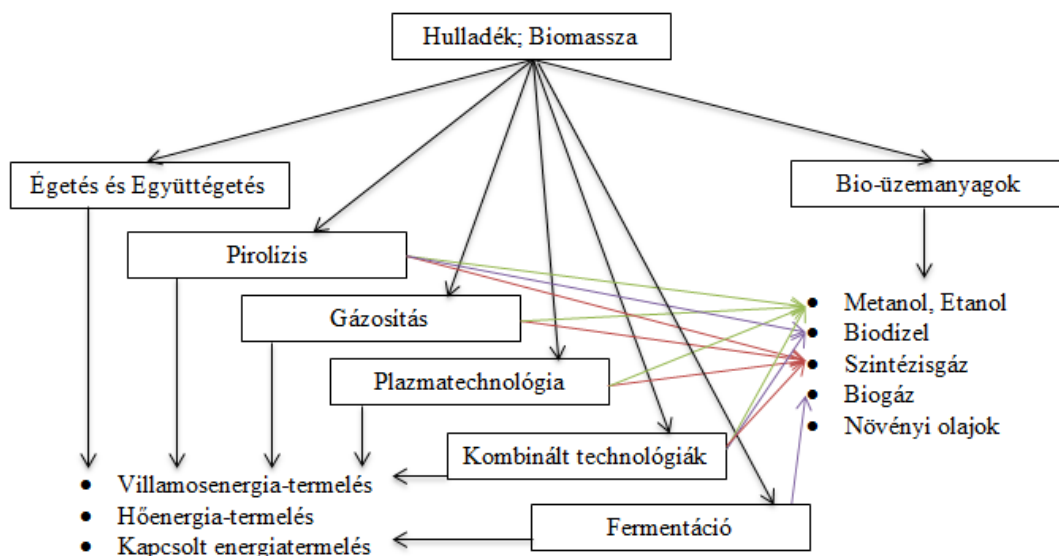
A hulladékok kezelésére összetételüktől függően különböző típusú és hőmérsékletű technológiákat alkalmazunk (2.3. ábra). Azokat a folyamatokat, amik normál létköri hőmérsékleten is lejátszódnak a hagyományos technológiák közé soroljuk. A legismertebb hagyományos technológia a fermentáció, ami a biológiai úton történő lebomlást

jelentí. Gázhalmazú végterméke a biogáz, ami földgáz kiváltására alkalmazható. Számos technológia létezik, aminek segítségével a biogázban található szén-dioxidot és a többi energetikailag inert gázt le lehet választani; e gázok eltávolítása után a földgáz minőségével megegyező úgynevezett biometánt kapunk. A biometán, amennyiben megfelel az MSZ 1648/2000-ben közölt földgáz minőségi paramétereknek, a földgáz hálózatba betáplálható. Magyarországon még nem valósítottak meg biogáz tisztító berendezést és földgáz hálózati betáplálást [6].

2.2. táblázat: Hulladékból energiát technológiák csoportosítása

| Hagyományos technológiák | Termikus technológiák | | |
|---|---|--|--|
| - Fermentáció (biogáz előállítása céljából, ami földgáz kiváltására alkalmazható) - Komposztálás zárt környezetben (reakcióhő hasznosítása fűtés céljára pl.: fóliasátorban) | Alaptechnológiák | Kombinációs technológiák | |
| | | Egylépcsős, Folyamatintegrált | Kétlépcsős, Technológiaintegrált |
| | - Égetés - Pirolízis - Gázosítás - Együttégetés - Plazmatechnológia | - Pirolízis és égetés egyetlen forgódobos kemencében - Plazma-gázosítás | - Első lépcső a pirolízis; második lépcső az égetés, a gázosítás, vagy a plazmatechnológia |

A hagyományos technológiák közé sorolható a komposztálás egy speciális esete, amikor a komposztálandó hulladékot abban a térben helyezük el, amiben fűteni szeretnénk (komposzt kazán). A komposztálási folyamat során felszabaduló reakcióhő kiválóan alkalmas például fóliasátor fűtésére. A biológiai bomlásból kifolyólag a hagyományos technológiákat első sorban mezőgazdasági és állattartási hulladékok hasznosítására alkalmazzák.



2.3. ábra: Hulladék energetikai célú hasznosításának lehetőségei

A termikus technológiák két fő csoportba sorolhatók. Az első csoportot az alap-technológiák képviselik. Számos technológia ismert, ami segítségével akár települési szilárd hulladékból, akár biomasszából hasznos energiát tudunk előállítani. A legismertebb technológia a hagyományos égetés, ahol a hulladék fűtőértékét egyszerűen tüzelés útján nyerjük ki és fogjuk munkára hő- és/vagy villamos energia formájában. Az égetés során éghetetlen füstgáz és szilárd fázisban hamu keletkezik, amik környezetbe juttatása a levegő minőségi romlásához vezet.

Az égetés egy speciális esete az együttégetés, ami rendszerint cementgyárban, vagy széntüzelésű erőműben valósul meg. A hulladék szénerőműben történő együttégetése a légszennyezés csökkenése mellett, hozzájárul a fosszilis energiahordozók kimerülési ütemének lassításához. A cementgyártás során a vegyi reakciók lejátszódásához nagy hőmérsékletre van szükség, ami hulladék bekeverésével könnyebben elérhető. A különböző cementfajták előállításához régóta alkalmaznak más ipari technológiákból származó melléktermékeket, így azok kezelése megoldott. A cementgyári együttégetés előnye, hogy kisebb levegőterheléssel, kisebb szennyezőanyag kibocsátással jár. Minde mellett a cementgyári együttégetésre szigorúbb kibocsátási normák (határértékek) vonatkoznak, mint a mono égetésére (3/2002. II. 22. KÖM Rendelet). További előnye e technológiának, hogy a hulladék hamutartalma beépül a végtermékbe (pl. klinker), így további kezelendő maradékanyag nem keletkezik [11].

Az új technológiák, mint a pirolízis, a gázosítás és a plazmatechnológia, valamint ezek kombinációi lehetőséget adnak arra, hogy a szilárd biomasszából gáz halmazállapotú energiahordozót (fagázt) állítsunk elő. A gáz fázis mellett a pirolízisnél továbbra is éghető karbonban dús pirokksz és piroolaj keletkezik, amik kőszén- és olajtüzelésű erőművekben energiatermelésre használhatók, vagy tovább gázosíthatók. A piroolajból akár biodízel üzemanyag is előállítható. Gázosításnál a szilárd végtermék az égetésnél tapasztalható összetételű salak és hamu. Az új termikus technológiák között a plazmatechnológia kiemelten kezelendő, mert itt a szilárd fázis az üvegesedett salak (üvegsalak) a környezetre nézve teljesen inert, főleg építőipari hasznosításra alkalmas termék. Mindezek figyelembevételével a plazmatechnológia a hulladék teljes ártalmatlanítását valósítja meg, miközben energiát nyer vissza, azonban működéséhez villamos energiát igényel, ami ez által csökkenti a technológia energetikai hatékonyságát [12, 13].

A kombinálás megvalósulhat egy lépcsőben, amikor egyetlen egy berendezésben két különböző technológia játszódik le. Ezt a megoldást folyamatintegrált kialakításnak neveztem el, mert szabályozástechnikai úton valósítható meg. Például egy forgódobos kemencét tudunk úgy szabályozni, hogy a kemence egyik térrészén a pirolízis, a másikon pedig a hagyományos égetés legyen a jellemző folyamat. A legismertebb egylépcsős kombinációs technológiát megvalósító berendezés a faelgázosító kazán, ahol az egyik kamrában a tűzifa elgázosítása, a másik kamrában a keletkezett fagáz elégetése történik.

Két, vagy többlépcsős kombináció esetén legalább két berendezésre lesz szükségünk. Az első technológiában keletkező terméket egy másikban továbbkezeljük, tehát a berendezéseket sorba kapcsoltan üzemeltetjük, ebből ered a technológiaintegráltság. Például a pirolízisből származó pirolízis koksztot egy másik berendezésben elégethetjük, vagy gázosíthatjuk. Elméleti lehetőség a három, vagy annál több lépcsős kombinálás, de ezekkel a megoldásokkal nem tudunk kedvezőbb eredményt elérni. Mindezekből következik, hogy a technológiák kombinálásának csak akkor van értelme, ha valamilyen előny származik belőle, ez lehet gazdaságosabb üzemeltetés, kisebb környezetterhelés, vagy nagyobb energetikai hatásfok.

A hagyományos égetéstől eltekintve az alternatív technológiák haszontermékeket állítanak elő, amelyek többek között az energiaiparban, a vegyiparban, illetve az építőiparban is kedvező hatékonysággal hasznosíthatók. Ennek ellenére napjainkban a termikus hulladékkezelő létesítmények több mint 95%-a hagyományos égetéses technológiát alkalmaz [11]. E technológia legnagyobb villamos-energetikai hátránya a kis villamos hatásfok. Mivel Rankine-Clausius- körfolyamatot valósít meg, emiatt az elérhető nettó villamos hatásfoka rendszerint 19–27% között alakul [15]. Ezzel szemben az új termikus technológiák a hulladékot első lépésként nagy energiatartalmú szintézisgázzá alakítják át, amely így Diesel- körfolyamatban, gázmotorban, vagy gázturbinában akár 35%-os nettó villamos hatékonysággal is üzemelhet [18, 39]. Ezzel a megoldással a kémiai átalakítás hatékonyságát figyelembe véve akár meg is kétszerezhető a fajlagos villamosenergia-termelés. A nagyobb villamos hatásfok rövidebb megtérülési időt jelent, mert a villamos energia eladásából nagyobb bevételre lehet szert tenni, mint a hőenergia értékesítéséből. Emiatt az új termikus technológiák gazdasági előnyhöz juttathatják a vállalatokat. Továbbá csökkenthető a fajlagos szén-dioxid kibocsátás és az erőforrásaink kihasználása is hatékonyabbá válhat [40].

A bio-üzemanyagok előállítása az utóbbi években jelentősen fejlődött. Egyes országokban a hagyományos üzemanyagokba megadott arányban bio-üzemanyagokat kell keverni értékesítés előtt, de arra is találunk példát, ahol magukat az alternatív, megújuló üzemanyagokat közvetlenül az üzemanyag kutakon vásárolhatjuk meg. Más országokban pedig kifejezetten tiltják és szankcionálják a bio-üzemanyagok forgalmazását és hajtóanyagként történő alkalmazását [21]. A legismertebb bio-üzemanyag a bioetanol, közismertebb nevén az E85, ami fosszilis benzin kiváltására alkalmas. Szintén ismert gázolaj-helyettesítő a biodízel, ami elsősorban növényi olajokból állítható elő. A fagázban rejlő lehetőséget, mint alternatív üzemanyag, már 1901-ben felfedezték és a II. világháború idején, a kőolajhiány időszakában előszeretettel alkalmazták a hadseregben, a civil szférában és a mezőgazdaságban járművek és gépek üzemanyagául [47]. Az 1940-es évek elején világszerte több mint egy millió ilyen jármű volt forgalomban [9]. Mára szinte teljesen a feledés homályába merült. Végül pedig a biogázt célszerű megemlíteni, mint a földgáz alapú autógázt helyettesítő bio-üzemanyagot.

Az energetikai hasznosítás legfontosabb előfeltétele, hogy a feladott hulladék nagyobb arányban tartalmazzon éghető komponenseket, mint éghetetleneket [22]. Az ég-

hetetlen komponensek szilárd fázisban salakként és hamuként maradnak vissza, aminek további kezeléséről gondoskodni kell. Az utókezelés lehet lerakóban történő elhelyezés, vagy vitrifikálás (salakolvasztás), amely során a fémek visszanyerhetők, a maradék szervesetlen összetevők pedig üvegesíthetők. További feltétel, hogy a gyakorlatban is valósuljon meg az energia visszanyerés, tehát a rendszer energiamérlege pozitív értéket képviseljen. Nem elhanyagolható szempont, miszerint csak akkor érdemes az energetikai célú hasznosítás, ha a hulladékból termelt energia fajlagos mennyisége nagyobb, mint amennyi az anyagában történő hasznosításnál igényként jelentkezik.

2.2.1. HATÁSFOK KRITÉRIUM TSZH KEZELÉSE ESETÉN

Települési szilárd hulladék termikus kezelésére vonatkozóan a 2008/98/EK rendeletben egy „R1”-nek nevezett 2.1. képlet került meghatározásra a hatásfok számítására, amely azt mutatja meg, hogy a hulladék termikus kezelése ártalmatlanításnak, vagy energetikai hasznosításnak minősül-e. A hatásfokszámítás során figyelembe kell venni az egy éves időintervallumban feladásra került hulladék fűtőértékét, az kezelőmű önfogyasztását, valamint az előállított hasznos hő- és villamos energia mennyiségét. A rendelet prioritás szempontjából különbséget tesz a villamos- és a hőenergia között, ezért az előállított hasznos energia-értékeket egy-egy korrekciós tényezővel vesszük figyelembe, amelyek a technikai körfolyamat hatásfoka alapján kerültek megállapításra.

$$\eta_n = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (2.1.)$$

Ahol:

- η_n a létesítmény nettó összhatásfoka,
- E_p az éves hőenergia- vagy elektromosenergia-termelés. Kiszámítása a (2.2.) képlet alapján, a korrekciós tényezők figyelembe vételével, ahol az energia elektromos áram formájában (E_{pe}) és a kereskedelmi használatra előállított hőenergia (E_{pth}) GJ/év mértékegységben.

$$E_p = 2,6 \cdot E_{pe} + 1,1 \cdot E_{pth} \quad (2.2.)$$

- E_f a rendszer éves energia inputja a gőz termeléséhez hozzájáruló tüzelőanyagokból (GJ/év).
- E_w a kezelt hulladék energiatartalma éves szinten a hulladék nettófűtőértékével számítva (GJ/év).
- E_i éves bevitt energia az E_w és az E_f kivételével (GJ/év).
- 0,97 a fenékhamu és a sugárzás miatt bekövetkező energiaveszteség-faktor.

Abban az esetben beszélhetünk energetikai hasznosításról és hulladékhasznosítóról, ha a 2.1. képlettel meghatározott energiahatékonyságuk megegyezik vagy meghaladja:

- a 0,60-ot a működő és az alkalmazandó közösségi jogszabályokkal összhangban 2009. január 1-je előtt engedélyezett létesítmények esetében,
- a 0,65-öt a 2008. december 31. után engedélyezett létesítmények esetében.

Amennyiben az égetőmű hatásfoka nem éri el a kritériumban meghatározott értéket, akkor hulladék-ártalmatlanításról beszélünk. A meghatározott hatásfok-kritérium rendszerint akkor érhető el, ha a hulladék fűtőértéke eléri, vagy meghaladja a 10 MJ/kg értéket, továbbá, ha a hulladékot hasznosító erőmű kapcsolt energiatermelést valósít meg, ami első sorban ellennyomósos gőzturbina alkalmazását teszi szükségessé. A TSZH fűtőértéke általában nem éri el az említett értéket, ezért másodlagos tüzelőanyag (RDF) előállítása célszerű.

2.2.2. HULLADÉKBÓL TÖRTÉNŐ KAPCSOLT ENERGIATERMELÉS

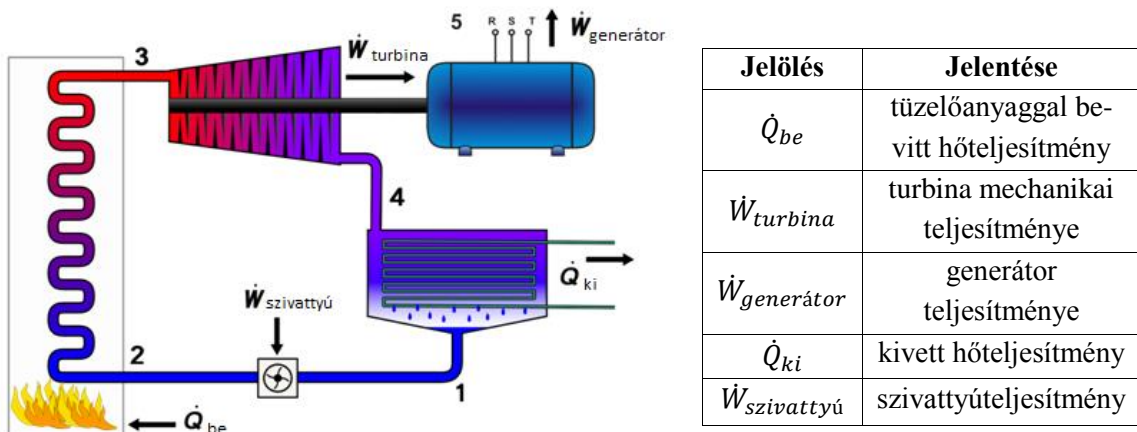
A kapcsolt energiatermelés lényege, hogy egyszerre, egyetlen technikai körfolyamatban állítunk elő hasznos hőt és villamos energiát. Legelső lépésként célszerű definiálni, hogy mi is az a hasznos hő. A 2007. évi LXXXVI. számú a villamos energiáról szóló törvény 3. § 23. bekezdése a következőképpen definiálja a hasznos hőt: „*a kapcsoltan termelt energia előállítása során valamely, gazdaságilag indokolt hő- vagy hűtési igény kielégítése érdekében megtermelt hő*”.

A jogszabály jogharmóniában áll a 2002/0185 COD EU-direktívával. A hasznos hő a jogszabály egyik alappillére, mert a hő nehezen tárolható és szállítható, ezért a kapcsolt energiatermelést a hasznos hőt igénylő üzem helyén, vagy annak közelében és a fellépő hőigény idejében lehet megvalósítani [32]. A keletkező hőenergia hasznosítása nélkül nem beszélhetünk kapcsolt energiatermelésről [40]. A hulladékból kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételi ára jelenleg a támogatottak körébe tartozik, így emelt áron értékesíthető. Abban az esetben, ha a keletkező hőenergia nem kerül hasznosításra, akkor a megtermelt villamos energia sem vehető át emelt áron, így a normál piaci árat kell megfizetni a vásárlónak (napjainkban a támogatott átvételi ár több mint másfélszerese a normál piaci árnak). Ezért fontos, hogy a hulladékok energetikai célú hasznosítása kapcsolt energiatermeléssel legyen megvalósítva.

A hő tárolása és szállítása egyaránt felvet technikai és gazdaságossági kérdéseket. A még gazdaságilag indokolt szállítási távolságot a csővezetékrendszerben fellépő veszteségek mértéke, valamint a fogyasztók fajlagos sűrűsége és a fogyasztókra jutó fajlagos beruházási költségek fogják befolyásolni, meghatározni. Minél nagyobb az egységnyi hosszúságú csőszakaszra jutó fogyasztók száma (vagy minél rövidebb az egy fogyasztóra jutó csőhossz), annál távolabbi fogyasztó ellátása is gazdaságosan megoldható, mert ekkor újabb fogyasztó becsatlakoztatásának fajlagos beruházási költsége kisebb, mint az eddig már megvalósított (vagy megvalósítani tervezett) csővezetékrendszer egy fo-

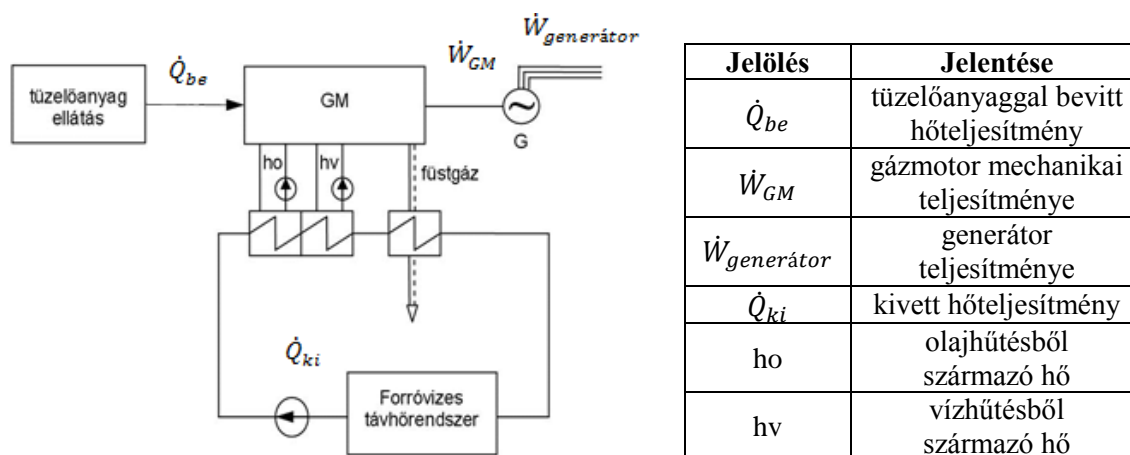
gyasztóra (fogyasztási helyre) jutó fajlagos beruházási költsége. Ezért minden esetben célszerű gazdasági és gazdaságossági számításokat is végezni. A döntéshozatali folyamat során célszerű megvizsgálni az egy fogyasztóra jutó elfogyasztott energiára vonatkozó költségeket is, mert ekkor figyelembe lehet venni a különböző fogyasztók energiaszükségletének eltérését, és a fogyasztási szokásokat [18].

Másfelől szükséges a technológiákat környezetvédelmi szempontból is megvizsgálni, mert a kapcsolt energiatermelés alkalmazásának egyik alap-célkitűzése a környezetterhelés csökkentése, főleg szén-dioxid megtakarítás elérése; másik célkitűzése pedig az energiaforrások hatékonyabb felhasználása. Ha egyszerre, egyetlen technikai folyamatban állítunk elő hasznos hőt és villamos energiát, akkor többek között csökkenthető a környezetterhelés mértéke, így az egységnyi termelt energiára vetített CO₂ kibocsátás és a felhasznált energiahordozók mennyisége; az energiák külön-külön történő termeléséhez képest [40]. A kapcsolt energiatermelés különböző technikai körfolyamatokkal valósítható meg. Rankine-Clausius - körfolyamat esetén az elérhető villamos hatásfok hulladékégetésnél rendszerint kisebb, mint 20%, az elérhető legjobb hőhatásfok 65% alatt marad [15, 19]. E körfolyamat elvén működik a gőzturbinás energiatermelés, ami gőzkazánból, gőzturbinából, villamos generátorból és hőcserélőből áll (2.4. ábra). A legelterjedtebb gőzturбина típus a kondenzációs, amely ugyan nem teszi lehetővé a keletkező hőenergia hasznosítását, cserébe viszont kimagasló villamos hatékonysággal üzemel. Kapcsoltan kedvező villamos hatásfokkal ellen nyomásos, vagy kisebb villamos hatásfokkal megcsapolásos gőzturbinával tudunk energiát termelni [19].



2.4. ábra: Gőzkazánal és gőzturbinával megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája

Diesel- körfolyamatot valósít meg a gázmotor, amely átlagosan 40%-os villamos- és 45%-os hőhatásfokkal üzemel [39]. A gázmotoros kapcsolt energiatermelés egy gázmotorból és egy vele tengelykapcsolatban lévő villamos generátorból áll. A motor hűtőköréből, valamint a füstgázból visszanyert hő fűtési célokra és használati melegvíz előállítására kiválóan alkalmazható. A gázmotoros energiatermelés elvi felépítését szemlélteti a 2.5. ábra.



2.5. ábra: Gázmotorral megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája

A gázmotor a gáz halmazállapotú tüzelőanyag elégetésével forgó mozgást hoz létre. A motor tengelykapcsolatban van egy háromfázisú szinkron generátorral, ami villamos energiát állít elő. A motor hűtőköréből származó és a füstgázból visszanyert hő használati melegvíz előállítására és távfűtésre alkalmazható. Magyarországon a gázmotorok alkalmazása a kapcsolt energiatermelésben a 2000-es évek elején kezdődött. Első sorban a távhőt szolgáltató fűtőerőművekben kerültek telepítésre. Azonban a mai földgázárak mellett, valamint a földgázból kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételi árának a támogatottak köréből való kikerülése óta, ezek az erőművek nem gazdaságos megoldások, nagy a megterülesi idejük.

A hulladékból, az új termikus kezelési technológiákkal termelt szintézisgázok hasznosítására energetikai hatékonyság és környezetvédelmi szempontok alapján ez a technikai körfolyamat tűnik optimális megoldásnak, így ezeknek a rendszereknek szükségessé vált a vizsgálata. A gázmotorok legnagyobb hátránya a turbinákhoz képest, hogy több forgó alkatrészt tartalmaznak, amik gyakoribb karbantartást igényelnek, minde mellett rövidebb élettartammal rendelkeznek. Egy erőművi gázmotor tervezett élettartama 100.000 üzemóra, amit az üzemeltetés jellegétől függően 15 év alatt elérhet. Nagy erőművi teljesítmények esetén a gázmotorok helyét a gázturbinák veszik át, amik várható élettartama hasonlóan a gőzturbinákhoz meghaladja a 100.000 üzemórát [15, 19].

2.3. ORSZÁGOS HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI TERV 2014-2020

Az Országos Hulladékgazdálkodási Terv (OHT) tartalmazza hazánk hulladékgazdálkodási sajátosságait, múltját, valamint a jövőképet. Az OHT célja azon intézkedések megállapítása, amik a környezet és az emberi egészség védelmét helyezik előtérbe a hulladékgazdálkodás területén. Legfőbb cél a hulladékképződés és kezelés negatív hatásainak megelőzése (megszüntetése), csökkentése, valamint az erőforrás-felhasználás hatékonyságának javítása, a környezeti hatásainak mérséklése [4].

Magyarország hulladékgazdálkodását az elmúlt években jelentős átalakulás jellemezte. E folyamatot tágabb értelemben a változó globális gazdasági környezet, a fenntarthatósági elvek mentén megfogalmazott fejlesztéspolitikai irányelvek, valamint a környezettudatosabb és erőforrás-takarékosabb gondolkodásmód nagymértékben befolyásolta. A hulladékgazdálkodás állami, illetve önkormányzati jogkörbe került, így a jövőben csak azok a gazdálkodó jogi szervezetek végezhetnek ilyen tevékenységet, ahol a szavazatok többségével állami, vagy települési önkormányzat (önkormányzati társulás) rendelkezik [4].

Az élhető és egészséges környezet megteremtésének szükséges előfeltétele, a hulladéklerakás csökkentése, a hulladékgazdálkodási hierarchiában magasabb prioritási szinten elhelyezkedő hasznosítási technikák alkalmazása. A jövőben csak az a hulladék kerüljön lerakásra, aminek nem megoldható a hasznosítása; a TSZH-ből származó biológiai úton lebomló hulladéknak pedig csak minimális része kerüljön lerakóba [4].

A jövőkép eléréséhez szükséges átfogó célkitűzések [4]:

- hulladék hasznosítási arányok növelése,
- hulladékképződés csökkentése,
- elkülönített gyűjtés kialakítása és fejlesztése,
- a hulladékká vált termék újrahasználató összetevőinek elkülönítése, javítása és ismételt felhasználása.

Az OHT kitér [4]:

- a települési hulladék,
- az ipari és egyéb gazdálkodói nem veszélyes hulladék,
- a mezőgazdasági és élelmiszeripari nem veszélyes hulladék,
- az építési-bontási hulladék,
- a veszélyes hulladék, valamint a kiemelten kezelendő veszélyes hulladékkamok (poliklórozott bifeníl (PCB) és poliklórozott terfenil (PCT), hulladékolaj, elem- és akkumulátorhulladék, elektromos és elektronikai berendezésekből, valamint gépjárművekből származó hulladék egészségügyi, növényvédőszer és csomagolóeszközei, azbeszthulladék),
- a csomagolási hulladék,
- biológiailag lebomló, és
- a gumiabroncs hulladék
- jelenlegi helyzetére, az elért eredményekre és hiányosságokra, valamint az előrejelzésekre és a cselekvési tervek, kiegészítve a megelőzési programokkal.

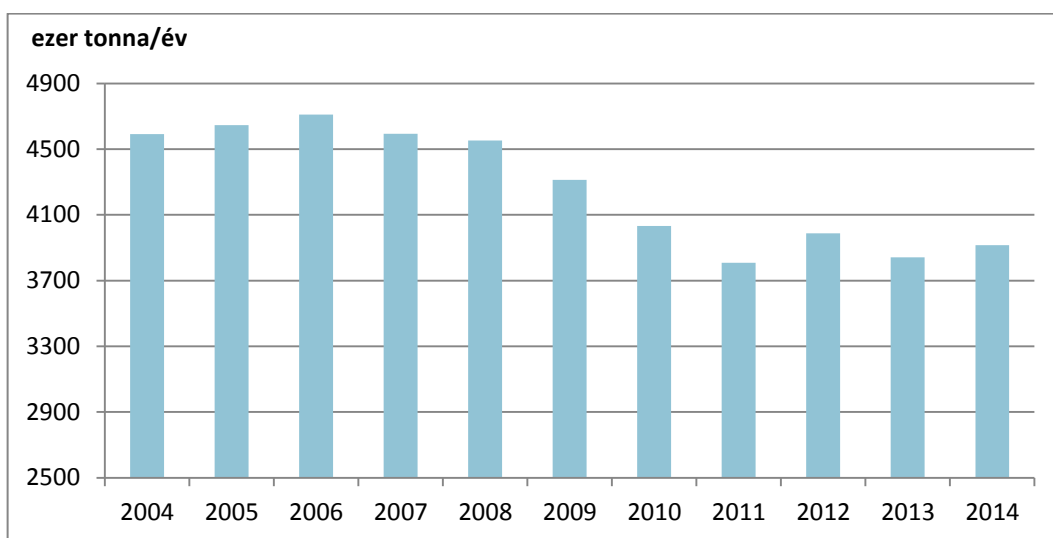
A 2008/98 EK hulladék keretirányelv előírja, hogy 2020-ig a háztartásokban keletkező papír, fém, műanyag és üveg hulladékok újrahasználatra való előkészítésének, és újrafeldolgozásának arányát minimum 50 tömegszázalékra kell emelni. A nem veszélyes építési-bontási hulladékoknál ez az arány legalább 70%-os értéket képvisel. Ennek

megvalósítását a válogatóművek és a másodnyersanyagot feldolgozó gyártástechnológiák elterjedése teszi lehetővé [4].

További újdonság, hogy 2015. január 1-től elkülönített hulladékgyűjtést kell alkalmazni a háztartásokban képződő üveg, fém, műanyag és papír hulladékokra vonatkozóan. Jelenleg Magyarországon minden lakos számára elérhető a szelektív hulladékgyűjtés, ennek ellenére csak kevesen élnek vele.

A komposztálás és a fermentálás elterjedése érdekében a lerakóba kerülő települési hulladék biológiai úton lebomló szervesanyag-mennyiséget, az Európai Unió előírásainak megfelelően, az 1995-ös bázisévhez képest, 2016. július 1-jéig 35%-ra kell csökkenteni. Családi házas övezetekben a házi komposztálás a célszerű megoldás, mert így nincs szükség a hulladék szállítására és válogatására, ezáltal csökkenthető a logisztikai és kezelési műveletek általi környezetterhelés. A keverten gyűjtött hulladék esetében mechanikai és/vagy biológiai kezeléssel e komponensek leválaszthatók, és egy erre a célra kialakított központban komposztálhatók. Az így keletkező szilárd maradékanyag műtrágyakiváltó, talajjavítóként hasznosítható [4].

Az ezredfordulós adatokhoz képest a hazánkban képződő hulladék mennyisége folyamatos csökkenést mutat. Még 2000-ben 40 millió tonna hulladék keletkezett egész évben, mostanra ez az érték csaknem 35%-kal kisebb. Ennek legfőbb oka a magyar ipar hanyatlása. A települési szilárd hulladékoknál 2000 és 2011 közötti időszakban 11%-os visszaesés tapasztalható, ami egyrészt a gazdasági válság következtében fellépő megváltozott fogyasztási szokásoknak köszönhető; másrészt megjelentek a környezettudatosabb fogyasztási folyamatok. Nem elhanyagolható, hogy ez idő alatt közel 3%-kal csökkent hazánk lakosságszáma. A települési szilárd hulladék mennyiségi változását szemlélteti a 2.6. ábra. Az összetétel tekintetében jelentős eltérés figyelhető meg, ez ugyanis többek között függ az évszaktól, a település méretétől és elhelyezkedésétől, a lakosság életkörülményeitől, valamint az ingatlanok típusától is [4].



2.6. ábra: Települési szilárd hulladék alakulása 2004-2014 között

2011-ben a települési hulladék mintegy 55%-a származott a lakosságtól, 45%-a pedig az intézményekben, a szolgáltatóknál valamint a kereskedelemben és az iparban képződött. Összetételük hasonló a háztartási hulladékhoz, ezért azzal együtt kezelendő. Magyarországon a TSZH jellemző kezelési módszere a lerakókban történő elhelyezés. 2012-ben a TSZH 65,4%-a került hulladéklerakóba. Ausztriában ez az arány mindössze 3,7% volt. Németország és Hollandia esetében ez az érték alig több mint 1%. Az anyagában történő hasznosítás hazánkban 25,5%-ot képviselt, Belgiumban 60%, Németországban 65%, Ausztriában pedig 69%. A maradék 9,1% hulladék termikus hasznosításra került. Hosszú távú cél, hogy a lerakóba kerülő hulladék mennyisége 40% alá csökkenjen 2020-ig. Mindezekből megfigyelhető, hogy az anyagában történő hasznosítás arányának növelése felé kell elmozdulnia a hazai hulladékgazdálkodásnak [4].

Jelenleg Magyarországon csak egyetlen létesítményben van lehetőség a települési hulladék termikus hasznosítására, azaz hasznos hő és villamos energia előállítására. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű éves kapacitása 420.000 tonna, 2012-ben összesen 364.047 tonna hulladékból termelt energiát. Ez 86,68%-os kapacitáskihasználást jelent. Az erőmű villamos teljesítménye 27 MW_e, Budapest távhőigényének több mint 4%-át elégíti ki [4].

A 2013-as adatok szerint hazánkban 70 környezetvédelmi engedéllyel rendelkező hulladéklerakó üzemel. Az 1980-as és a '90-es években létesített 219 lerakóból 2009-ig 178-at bezártak és rekultiváltak; 41-et a hosszabb távú használatnak megfelelő állapotba hoztak; és 29 új, az előírásoknak is megfelelő lerakó létesítése történt [4]. Folyamatos problémát jelent az illegális hulladéklerakók kialakítása, amik a közmunkaprogram és a „Te szedd!” akció keretében rendszeresen felszámolásra kerülnek.

A keverten gyűjtött települési hulladék komponenseinek anyagában történő hasznosítása érdekében, több lerakó területén válogatóműveket helyeztek üzembe, amik lehetővé teszik a lerakókba kerülő hulladékok mennyiségi csökkenését, a hasznosítási arány növelését. A válogatás az anyagában történő hasznosítás megelőző művelete, ami megvalósítható kézi, vagy gépesített módon [26]. Jellemzően mechanikai és optikai válogatást alkalmaznak. A jövőben további válogatóművek létesítése is szerepel a tervekben.

Összességében elmondható, hogy Magyarország hulladékgazdálkodása jó irányba halad, de még számos fejlesztést kell végrehajtani az Európai Unió által előírt környezetvédelmi célok elérése érdekében.

3. A BIOMASSZA ÉS A HULLADÉKOK ÖSSZETÉTELE

3.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZA ÉS FAHULLADÉKOK

Magyarország földrajzi adottságainak köszönhetően jelentős megújuló energiaforrás-potenciállal rendelkezik. A legnagyobb lehetőség a napenergia hasznosításában rejlik, amit a szélenergia és a biomassza követ.

A biomassza általános definíciója magába foglalja a Földön megtalálható összes élő tömeget. Mérnöki szemszögből biomasszának csak az energetikailag hasznosítható növényeket, terméseket, melléktermékeket, valamint a növényi és állattartási hulladékokat értjük. Magyarországon jogi fogalmát a 2010. évi CXVII. törvény határozza meg (1. § 3. bekezdés): ezek alapján a *„biomassza: a mezőgazdaságból - a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve, erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból, többek között a halászatból és az akvakultúrából - származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradékanyagok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része”*.

A hazai napenergia-potenciál mintegy 1.838 PJ-ra tehető, amiből csak 0,1 PJ-t hasznosítunk. A szélenergia esetében hasonlóan kis hasznosítási arány figyelhető meg (532,8 PJ-ból 0,16 PJ) [61]. Az adatok alapján elmondható, hogy e két energiaforrás hasznosításában célszerű gondolkodni, de mindkét esetben egy jelentős műszaki problémával kell szembe néznünk, ami a biomassza hasznosítását előtérbe helyezi.

A napelemek és napkollektorok csak akkor működnek, ha süt a Nap, továbbá teljesítményüket befolyásolja a beesési szög, a szélturbinák pedig a szél sebességétől függenek. Mindezek figyelembevételével ezen erőművek éves teljesítmény-kihasználása jellemzően kisebb, mint 15%, sokszor még a 10%-ot sem éri el, ellentétben a biomassza, vagy a fosszilis tüzelőanyagú erőművek 75–95%-ával szemben [17]. A kihasználtság hatása a megtérülési időben is megfigyelhető.

Szintén gondot jelent a megtermelt villamos energia tárolása. Továbbra sem megoldott az alaperőműveink éjszaka történő energiátöbbletének tárolása. Jelenleg ezt az

energiamennyiséget minimális áron értékesítjük a környező országoknak, akik tározós erőművekben éjjel betárolják, napközben pedig kitérítik, és jelentős haszonnal értékesítik hazánkban. A gazdaságilag és gazdaságosságilag is indokolt, valódi megoldás az lenne, ha Magyarországon is épülnének tározós erőművek.

3.1.1. BIOMASSZA POTENCIÁL

A hazai biomassza-potenciál 328 PJ-ra tehető, amiből jelenleg 49,2 PJ kerül hasznosítása, ez 15%-os hasznosítási arányt jelent [61]. A biomassza a benne rejlő lehetőségnek köszönhetően a terület- és a településfejlesztésben, valamint a kistérségek munkahely-teremtésében kiemelt szerepet játszhat, ami ez által szerves részét képezheti a közmunkaprogramnak. A biomasszán alapuló fejlesztések lehetőséget adnak továbbá „falu fűtőművek” és villamos erőművek létesítésére, amik mellett, hogy zöldenergiát termelnek, még bevételi forrást is jelenthetnek a települések számára.

Mindazonáltal nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy a biomassza egy olyan energiaforrás, amely folyamatosan megújulásra képes, de véges mennyiségben áll rendelkezésünkre, ezért hasznosítása csak korlátozott keretek között valósíthat meg. Túlzott kiaknázása a környezet elhasználódásához vezet, ami azt jelenti, hogy a megújuló energiaforrások megújulási ciklusideje nagyobb, mint amilyen ütemben azt használjuk. A környezet elhasználódásának iskolapéldája a Húsvét-sziget, ahol a fejlett iparosodás nélküli társadalom is képes volt a megújuló energiaforrásokat túlhasználni.

A biomassza számos szempont szerint csoportosítható. Eredetük szerint 3 fő csoportot különböztetünk meg, növényi, állati és vegyes eredetű.

Eredet szerinti csoportosítás [61]:

1. Növényi eredetű biomassza:

- Hagyományos mezőgazdasági termények és melléktermékei, hulladékaik (szalma, kukoricaszár, repce, napraforgó stb.)
- Erdőgazdasági, illetve fafeldolgozási hulladékok (faapríték, nyesedék, fűrészpor stb.)
- Energetikai célra termesztett növények (fűfélék, fák: akác, nyárfa, fűzfa; takarmánynövények: cukorrépa, köles, rozs, repce stb.)

2. Állati eredetű biomassza:

- Elsődleges: zsírok, fehérjék, szénhidrátok
- Másodlagos: állattartás melléktermékei

3. Vegyes eredetű biomassza:

- Amikor állati és növényi biomasszák keverten találhatók (trágya, kommunális hulladék stb.)

A termelési-felhasználási láncban elfoglalt helyük alapján a biomassza lehet elsődleges, másodlagos és harmadlagos [61].

Az elsődleges biomassa (3.1. táblázat) magába foglalja a természetes vegetáció fő- és melléktermékeit (erdei-, szántóföldi-, réti-, kerti növényeket) [61]. A főcsoportokon belül a legjelentősebbek a sokfunkciós erdőgazdálkodás energetikai szempontból számításba vehető fő-, és melléktermékek. A jövőben az energetikai fa- és növényültetvények (energiafű, és energiafűz, valamint császárfa) termesztésére lehet számítani, illetve ezeknek a fő- és melléktermékeknek az energetikai hasznosítására.

3.1. táblázat: Az elsődleges hazai biomassa-potenciál [18]

| Elsődleges biomassa | Teljes potenciál [PJ/év] | Energetikai potenciál | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|
| | | [%] | [PJ/év] |
| Erdőterület | 160 | 38,75 | 62 |
| <i>főtermék</i> | 140 | 40 | 56 |
| <i>melléktermék</i> | 20 | 30 | 6 |
| Energiaültetvény | | 250 [GJ/ha·év] | 75 |
| Növénytermesztés | 780 | 16,92–33,97 | 132–265 |
| <i>főtermék</i> | 410 | 10–20 | 40–80 |
| <i>melléktermék</i> | 370 | 25–50 | 92–185 |
| Összesen | 940 | 28,62–42,77 | 269–402 |

A Föld felszínének közel egyharmadát erdőterületek borítják, így az összes erdőterület 3,8 milliárd hektárnál nagyobb értéket képvisel, amin évente átlagosan 4 milliárd m³ fa terem. Magyarország területének közel 20%-át erdő fedi, Európát tekintve ez az arány 45%. Hazánk 1,9 millió hektár erdőterületének faállománya mintegy 330 millió m³-re tehető. Évente közel 11 millió m³ a fanövekmény, ami átlagosan 30 éves megújulási ciklusidőt jelent. Az éves energiahozam 160 PJ. Erdőink nagyobb részét, körülbelül 86%-át lombhullató fák képezik, akác (több mint 50%), cser, tölgyek, bükk, gyertyán, fenyő és egyéb lombos fák [18].

Az energiatermelésre hasznosítható faanyag (energiafa) a kitermelt lombos fáknak a felét, a fenyőknek alig a 20%-át teszi ki. Az évente kitermelhető energiafa 4–4,5 millió m³-re becsülhető [61]. A száraz fa fűtőértéke 17–20 MJ/kg között van. Ezen számok alapján a hazai erdők évi energiafa-potenciálja 56 PJ-re becsülhető. A fakitermeléskor körülbelül 20% apadék keletkezik, viszont ennek egy része faaprítékként még tüzelési célokra alkalmazható, a becsült évi értéke 6 PJ [18].

A mezőgazdaság hagyományos tevékenységektől mentesülő területein a jövőben célszerű energiaültetvényeket termesztetni. Ezek lehetnek: fás ültetvények (energetikai faültetvény, energiaerdő), energianád, és lágyszárú ültetvények (energiafű, energiakender, cirok) [20]. Az energiaültetvények hozama, és az erre fordítható területnek a nagysága még nem alakult ki. Ennek a kedvező megítélésnek az alapján, az energetikai célú fa- és növényültetvények évi fajlagos anyaghozama 10–25 t/ha, évre tehető, fajtánként. Fajlagos energiahozamuk pedig elérheti az erdők fajlagos energiahozamának

6–10-szeres értékét, amely 200–350 GJ/ha évente [25]. Kisebb energiahozammal számolnak a negatív megközelítések miatt, illetve jelentős károsodást tételeznek fel az érintett mezőgazdasági területeken. A talaj kimerülés egy olyan következmény az energetikai ültetvények létesítése során, amely a talaj tápanyagának visszapótlásával elkerülhető.

Ha országosan mintegy 300 ezer hektár mezőgazdasági területet szánánk az energiaültetvényekre, akkor ennek az évi energiahozama összesen 75 PJ lehetne, ez azonos nagyságrendű az erdőink energiahozamával. A legnagyobb gondot az okozza, hogy e területeket ki kell venni az élelmiszer-termesztésre művelt mezőgazdasági területekből. A növénytermesztés elsősorban az élet fenntartását célozza, viszont a fő-, és melléktermékeinek bizonyos része energetikai célokra is használható. A növénytermesztés főtermékeinek évi energiatartalma 410 PJ-ra tehető, amelynek energetikai felhasználása 10–20%, ez évente 40–80 PJ lehet. A melléktermékek évi energiatartalma közel 370 PJ, ebből energetikai célokra hasznosítható akár 25–50% is, ami évente 92–185 PJ. Mindent összevetve, 940 PJ a hazai elsődleges biomassza évi energiatartalma. A teljes elsődleges biomasszából 269–402 PJ-ra tehető az energetikai célokra fordítható potenciál, ami 30–40%-os energiahasznosítási arány [61].

A másod- és harmadlagos biomassza az elsődlegesből származtatható [61]. A másodlagos biomassza az állattartás fő- és melléktermékeit, valamint az állatvilág hulladékaikat jelenti. A harmadlagos biomassza pedig a különböző emberi és ipari fogyasztási, gyártási és szolgáltatási tevékenységekből ered. Legfőbb példa az élelmiszeripar, a könnyű- és faipar melléktermékei, valamint a szállítási és települési hulladékok biológiai úton lebomló részei. De ide tartoznak az elhasznált bútorok is.

3.1.2. FAÖSSZETÉTEL

A szilárd tüzelőanyagok főbb tüzeléstechnikai jellemzői a nedvességtartalom, az illó-, és fix karbon tartalom, valamint a hamutartalom és az elemi összetétel. A szilárd biomassza legfontosabb építőelemei a cellulóz, a lignin és a hemicellulóz. A szilárd tüzelőanyagok leírására az elemi analízisből kapott eredmények a legalkalmasabbak, amelyekből az égéshez szükséges levegő mennyiségének meghatározásán túlmenően az égéstermék mennyisége is meghatározható. Az elemi analízis elemei a szén-, hidrogén-, kén-, oxigén-, nitrogén-, nedvesség- és hamutartalom [62].

Az elemi analízis mellett azonban a szilárd tüzelőanyagok legkedvezőbb eltüzeléséhez illeszkedő tüzeléstechnológiai rendszer kialakításához szükség van az úgynevezett immediat analízisre, amit gyorselemzésnek is neveznek [62]. A hamu és fix karbon együtt a kokszt mennyiségét adja, míg a fix karbon és az illó együtt a hamu és vízmentes tüzelőanyagot képezi. A tüzelőanyag hevítése során az illótartalom gáz formában távozik és a szilárd anyag gyulladási hőmérsékleténél kisebb hőmérsékleten gyullad meg. A nedvesség összetevői a felületi, a higroszkópikus (erősen kötött) és a szerkezeti víz. A hamu és a nedvesség adja a tüzelőanyag ballaszt-tartalmát [46].

Néhány jellegzetes fafajta kémiai összetételére mutat példát a 3.2. táblázat.

3.2. táblázat: Jellegzetes fafajták elemi összetétele a száraz bázisra vonatkoztatva

| Fafajta | Kémiai összetétel [tömegszázalék/száraz bázis] | | | | | |
|--------------------------|--|-----|-----|-----|------|------|
| | C | H | N | S | O | Hamu |
| Akác | 49,5 | 5,9 | 0,4 | 0,0 | 43,3 | 0,9 |
| Bükkfa | 51,6 | 6,3 | 0,0 | 0,0 | 41,5 | 0,6 |
| Douglas fenyő | 52,3 | 6,3 | 0,1 | 0,0 | 40,5 | 0,8 |
| Energiafűz | 50,9 | 5,6 | 0,2 | 0,0 | 41,8 | 1,5 |
| Erdeifenyő | 50,1 | 6,1 | 0,2 | 0,0 | 43,4 | 0,2 |
| Juhar | 50,6 | 6,0 | 0,3 | 0,0 | 42,7 | 0,4 |
| Kaliforniai fenyő | 53,5 | 5,9 | 0,1 | 0,0 | 40,3 | 0,2 |
| Kínai császárfa | 56,2 | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 36,7 | 1,2 |
| Nyárfa | 51,6 | 6,3 | 0,0 | 0,0 | 41,5 | 0,6 |
| Tölgyfa | 53,7 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 40,3 | 0,6 |

3.2. TELEPÜLÉSI SZILÁRD HULLADÉK ÖSSZETÉTELE

A települési szilárd hulladék összetevői jellemzően az élelmiszerek csomagolására, szállítására és tárolására szolgáló eszközök, valamint zöldségek, gyümölcsök héjai, és az élelmiszermaradékok jelentik. Az összetétel számos tényezőtől függ, mint a település nagysága, elhelyezkedése, és nem mellesleg a fogyasztási szokások. A háztartási hulladék összetételre irányuló kutatások több évtizede folynak hazánkban [27]. Több tanulmány foglalkozik a pontos összetétel meghatározási módszereivel, a mintavétellel és az eredményekre alapozva becslést adnak a jövőbeli potenciálra és összetételre vonatkozóan.

A hulladék összetételét tekintve folyamatos változás alatt áll. Megfigyelhető, hogy az utóbbi évtizedekben a műanyag, a fém és a papír aránya egyre nő, aminek eredményeként a hulladék térfogat-növekedése felgyorsult. A műanyagok az 1930-as években jelentek meg és új irányt hoztak az emberiség történelmében. Mindennapjaink ma már elképzelhetetlenek a különböző műanyag termékek nélkül. A műanyagok tömeges gyártása az 1960-as évektől indult, azóta folyamatosan nő arányuk a települési szilárd hulladékban is. Annak ellenére, hogy mesterséges szerves kémiai anyag lebomlása rendkívül időigényes, a kémiai összetételük függvényében, különböző vegyi adalékanyagok alkalmazásával a lebomlási folyamatuk felgyorsítható [27]. Ez utóbbiak a biológiai úton lebomló műanyag csomagolóeszközök, amik egyre divatosabbak főleg a reklámtáskák esetében. Leggyakoribb műanyag hulladék a PET (polietilén-tereftalát) palack és PE (polietilén) kupak, amelyek italok tárolására és légmentes lezárására szolgálnak.

A fémhulladékok jellemzően vasfémek és alumínium, például a konzervdobozok, italos fémdobozok, habsprék és egészségügyi, valamint kozmetikai szerek palackjai. Az üveghulladékokkal a háztartásokban italos üvegpalackok formájában találkozunk. Legnagyobb hátrányuk, hogy törékenyek és nehezek, ezért a műanyagpalackok folyamatosan szorítják ki őket a forgalomból. Végül a papírhulladék, amelyek legnagyobb része a reklámújságokból származik.

Manapság a települési szilárd hulladék legfőbb összetevői a biológiai úton lebomló élelmiszermaradékok, valamint a műanyag-, üveg-, és fém csomagolóeszközök. Mindezek mellett a papír és a higiéniai hulladékok is mértékadóak. A 3.3. táblázat összefoglalja a hazai mérési eredményeken alapuló egyes komponensek megoszlását és az átlagos értékeket [45]. Az átlagos összetétel tekintetében megfigyelhető, hogy a finom szemcsés anyagok mellett a biológiailag lebomló és a műanyag komponensek adják a nagyobb arányt.

3.3. táblázat: Települési szilárd hulladék összetevőinek megoszlása az átlagértékekkel [45]

| Összetevő neve | Összetételi tartomány [%] | | |
|------------------------------------|---------------------------|--------|--------|
| | Min | Max | Átlag |
| Műanyag | 7,784 | 19,980 | 12,727 |
| Biológiailag lebomló | 7,392 | 29,907 | 13,191 |
| Papír | 3,079 | 13,225 | 7,052 |
| Fém | 2,856 | 4,564 | 3,378 |
| Higiéniai | 2,256 | 6,234 | 3,902 |
| Üveg | 1,958 | 7,041 | 4,670 |
| Textíliák | 1,829 | 4,566 | 2,880 |
| Karton | 1,136 | 3,598 | 2,053 |
| Nem osztályozott éghetetlen | 1,079 | 13,379 | 5,011 |
| Nem osztályozott éghető | 1,013 | 9,161 | 3,149 |
| Kompozit anyagok | 0,415 | 1,908 | 1,070 |
| Veszélyes | 0,158 | 1,672 | 0,688 |
| Finom szemcsés anyagok | 18,926 | 58,076 | 40,228 |

4. TERMIKUS KEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK

A termikus kezelési technológiák olyan műveletek, amelyek alkalmasak a megsemmisítésre váró hulladékokat, valamilyen szempontból kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező termékeké, illetve energiává átalakítani. Az alkalmazott eljárások legfőbb végtermékei gáz-, illetve szilárd halmazállapotú anyagok [12].

A termikus kezelési technológiákat a tipikus reakciókörülményeik alapján szokás összehasonlítani. Az egyik legfontosabb reakciókörülmény az alkalmazott hőmérséklet, amely előzetes tájékoztatást ad a technológia környezetre gyakorolt hatásáról, és a beruházási költségéről. Általánosságban elmondható, hogy a hőmérséklet növelésével a lejátszódó reakciók minőségi javulásából következően csökkenthető a technológia környezetkockázati tényezője, de ezzel együtt arányosan növekedni fog a beruházási költség. A nagyobb hőmérséklet speciális anyagok, fémötvözetek és műszaki kerámiák alkalmazását igényli, amelyek jelentős költségnövekménnyel járnak. A beruházási költség legmeghatározóbb tényezői az üzemi hőmérséklet és nyomás.

A második, és egyben a legfontosabb reakciókörülmény a légfelesleg tényező. Részben ez a jellemző mutatja meg, hogy milyen a kibocsátott gáztermék kémiai összetétele és mekkora a fajlagos mennyisége. Tökéletes égetés esetében jelentős légfelesleggel kell számolnunk (a légfelesleg nagyobb, mint egy), amely így növeli közvetlenül a kibocsátott füstgáz mennyiségét (több levegőt tartalmaz), valamint közvetve - a füstgáz-tisztítási rendszeren keresztül - a beruházási és üzemeltetési költségeket.

A harmadik reakciókörülmény az üzemi nyomás, ami a reakciók lejátszódásának egymáshoz való viszonyát határozza meg. A keletkező gáztermék kémiai összetételében fontos szerepet játszik, továbbá a beruházási költségek egyik meghatározó tényezője.

A negyedik reakciókörülmény a segédáramok típusát foglalja magába. A segédáramok két csoportba sorolhatók, egyrészt anyag-, másrészt energia áramokat különböztetünk meg. Az alkalmazott segédgáz befolyásolja a keletkező végtermékek összetételét, kezelhetőségét, fizikai- és kémiai tulajdonságait. Bizonyos technológiáknál külső hő

bevitelre lehet szükség, amely jellemzően földgáz, szén, vagy olaj póttüzeléssel, illetve villamos energiával valósítható meg.

A keletkezett végtermékek megmutatják, hogy a technológiát elhagyó anyagok milyen formában hasznosíthatók, vagy esetlegesen milyen típusú utókezelést igényelnek. A hagyományos égetést leszámítva a termikus kezelési technológiák közvetlenül nem alkalmasak villamos és/vagy hőenergia előállítására, ezért a keletkező haszontermékeket tüzelés útján tudjuk alternatív energiahordozóként hasznosítani. Ennek okán az új technológiákat gyakran kombinálják a hagyományos égetéssel. Erőművi alkalmazás esetén célszerű megadni, hogy milyen erőgépet alkalmazunk. Az erőgép típusa közvetlenül a technológiák energetikai hatékonyságát, ez pedig közvetve a gazdaságossági mutatókat, legfőképpen a megtérülési időt befolyásolja, határozza meg. Az energetikai hatékonyság egyenes arányban áll a fajlagosított környezetterhelés mértékével, a környezetkockázati tényezővel.

Mindezek figyelembevételével célszerű a technológiákat tovább vizsgálni és az egyes összefüggéseket külön-külön ellenőrizni, összehasonlítani és értelmezni. Ahhoz, hogy a döntéshozatali folyamat során minden fontos és látszólag kevésbé fontos tényező hatása és súlya felismerhető legyen; egy átfogó modell alkalmazása válik indokolttá.

4.1. ALAPTECHNOLÓGIÁK

Alaptechnológiáknak nevezzük mindazokat a termikus kezelési technológiákat, amik során a hulladék olyan kémiai változásokon megy át, aminek következtében az egyes alkotóelemek lebomlanak és az illékony vegyületek elgőzölögnek. Az alaptechnológiák a jellemző reakciókörülményeikben különböznek egymástól. Egy alaptechnológiában a rá jellemző kémiai reakciók a meghatározóak, de ettől eltérő folyamatok is lejátszódhatnak, amik a keletkező gáztermék összetételét befolyásolják. Abban az esetben, ha a különböző technológiákra jellemző kémiai reakciók egymással összehasonlítható mértékben játszódnak le egy berendezésen belül, akkor egylépcsős, vagy folyamatintegrált kombinációs termikus kezelési technológiáról beszélünk.

A 4.1 és a 4.2 táblázatok szemléltetik az alaptechnológiák jellemző reakciókörülményeit, valamint a keletkező végtermékeket és az alkalmazott erőgépek típusát. A táblázatokban feltüntetésre kerültek az energiatermelést követően keletkező maradékanyagok megnevezései is [11, 12, 13, 14, 15, 16].

4.1. táblázat: Termikus kezelési technológiák tipikus reakciókörülményei

| Eljárás | Hőmérséklet [°C] | Légfelesleg tényező | Üzemi nyomás [bar] | Segédáramok |
|---|--------------------|--|----------------------------------|--|
| Pirolízis | 300–600 (1.600) °C | $\lambda = 0$ endoterm | $p \leq 1$ bar $p \geq 1$ bar | - nitrogén |
| Pirolitikus-elgázosítás | 800–1.000 °C | $0 < \lambda < 0,5$ | $p \geq 1$ bar | levegő, vízgőz |
| Hagyományos égetés | 850–1.200 °C | $\lambda \geq 1$ $1,1 \leq \lambda \leq 2,5$ exoterm | $p \geq 1$ bar | levegő, földgáz póttüzelés |
| Gázosítás | 600–1.600 °C | $\lambda < 1$ $0,5 \leq \lambda \leq 0,8$ parciális oxidáció | $1 \leq p \leq 20$ bar | levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék, ezek kombinációja |
| Plazma-technológia | 2.000–6.000 °C | $\lambda = 0,5$ endoterm | $1 \leq p \leq 20$ bar | levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék, ezek kombinációja |
| Referencia: Földgázüzemű gázmotoros erőmű | 600–1.200 °C | $\lambda = 1,8$ exoterm | $p = 1$ bar | levegő |

4.2. táblázat: Termikus kezelési technológiák termékei és az alkalmazott erőgépek

| Eljárás | Keletkező termék erőgép előtt | Erőgép | Keletkező végtermék erőgép után |
|---|--|---|--|
| Pirolízis | pirogáz, piroolaj, pirokoks | gázmotor, gázturbina, dízelmotor, | füstgáz (<5% éghető), salak, hamu, pernye |
| Pirolitikus-elgázosítás | pirogáz, kevesebb pirokoks- és olaj | gőzkazán- gőzturbina | |
| Hagyományos égetés | tüzelőanyag, hulladék ¹ | gőzkazán- gőzturbina | |
| Gázosítás | szintézisgáz, salak, hamu, pernye | gázturbina, gázmotor | füstgáz (<5% éghető) |
| Plazmatechnológia | szintézisgáz, üvege- sedett salak | gázturbina, gázmotor | |
| Referencia: Földgázüzemű gázmotoros erőmű | földgáz ² | gázturbina, gázmotor | füstgáz (<3% CH ₄ tartalom) |
| <p><u>Megjegyzések:</u> ¹nem a technológia terméke, hanem a technológiába belépő alapanyag, ami minden technológia esetében megegyezik</p> <p>²a referencia erőműnél hulladék helyett földgáz a tüzelőanyag</p> | | | |

4.1.1. HAGYOMÁNYOS ÉGETÉS

A hagyományos égetés egy olyan technológia, amely lehetővé teszi, hogy a hulladékban, tüzelőanyagban rejlő energiamennyiséget egyszerűen tüzelés útján nyerjük ki [28]. Az égés folyamata során a lejátszódó kémiai reakciók következtében felszabaduló úgynevezett reakcióhőt tudjuk hasznosítani, ami a hulladék fűtőértékével egyezik meg. A hulladékban lévő éghető anyagok megfelelő feltételek és körülmények rendelkezésre állása esetében elégnék [14]. A hulladékégetés hőtermelő, tehát exoterm folyamat, ahol a tökéletes égéshez szükséges oxigén mennyisége megfelelően nagy légfelesleg tényező mellett biztosítható. Az égetés során a hulladék szervesanyag-komponensei a levegő oxigénjével reagálva gázokká, valamint vízgőzzé alakulnak és füstgázként távoznak az égető rendszerből [65].

Az éghetetlen szervesanyagok, a hamu, a salak és a pernye rendszerint szilárd halmazállapotban maradnak vissza [35]. A hulladékok sokféleségéből adódóan a legkülönbözőbb típusú, kémiai összetételű és halmazállapotú anyagokat kell elégetni, ami az égés folyamatát összetettevé teszi. A tökéletes oxidáció eléréséhez számos feltételt kell biztosítani.

A tökéletes égéshez az éghető anyagon kívül szükséges [12, 46]:

- elegendő oxigént tartalmazó égéslevegő,
- megfelelő égéstér hőmérséklet,
- az égés folyamatához szükséges idő,
- a fejlődő éghető gázok és az égéslevegő intenzív keveredéséhez szükséges turbulencia.

Az égés tulajdonképpen nem más, mint a tüzelőanyag szerves komponenseinek minél tökéletesebb oxidációja, amely nagy hőmérsékleten, több lépésből álló rendszerben és szabályozott körülmények között lejátszódó kémiai reakciók sorozata. A nagy hőmérséklet hatására a hulladékot alkotó vegyületek lebomlanak [11].

Az égést a lebontási és az égetési határfokkal szokás jellemezni [28]. A lebontási határfok megmutatja, hogy a feladott hulladék tömegének hány százaléka lépett át gáz fázisba. Az égetési határfok pedig a füstgáz éghetetlen komponenseinek arányát adja. A tökéletes égés megvalósításához a technológiai paraméterek pontos betartása, valamint a hulladék összetételéhez, és annak tulajdonságaihoz jól illeszkedően kialakított égésterekben történő megfelelő szabályozás szükséges. A teljes oxidációs égéstechnológiában a hulladék az első égéstérben (a kemencében) a sztöchiometrikus levegőigény 1,1–2,5-szeresének megfelelő égéslevegővel intenzíven érintkezve 90–95%-os határfokkal oxidálódik. Kis fűtőértékű hulladék égetése során a jogszabályokban előírt tüztéri hőmérséklet eléréséhez póttüzelést alkalmaznak, ami megvalósulhat földgáz, vagy olaj tüzelőanyaggal működő támasztóégővel [11].

Az égetőrendszereknek három formája terjedt el, a rostély kivitelű, a forgódobos és a fluidágyas kialakítású. Az állórostély a leggyakrabban alkalmazott berendezés

kommunális és termelési hulladékok kezelésére. A rostélyos égető legfontosabb feladata a tüzelőanyag rétegeinek lazítása, forgatása, a gyorsabban lebomló komponensek rácslyukain történő eltávolítása. A rostélytüzelésű rendszerek lehetővé teszik a hulladék szárítását, a begyűjtését, az égési folyamat megfelelő szabályozhatóságát, ami a benn-tartózkodási idő és a légfelesleg tényező változtatásával valósítható meg [11].

A hengerrostély egy lassan forgó, vízszintes tengelyű, kis szögben döntött, hőálló falazattal bélelt dobszítának tekinthető. A forgó mozgás elősegíti a hulladék és az égéslevegő keveredését, így gyorsabb és egyenletesebb égés érhető el. A dobban a hulladék mozgása kétirányú (palást és tengely irányú), így tökéletesebbé téve az égés minőségét. A forgódob elsősorban folyékony és pasztaszerű, valamint iszapszerű hulladékok égetésére alkalmazzák. A dob fordulatszáma rendszerint 0,2–2 fordulat/perc, dőlésszöge 2–4 ° között változik. Átmérője 3–4 m, hossza 8–13 m, a töltöttségi foka pedig 20 térfogatszázalék. A légfelesleg tényező a szerkezet méretének következtében 2–2,5 [11].

A fluidágyas hulladékégető mind szilárd, mind folyékony, iszap és pasztaszerű hulladékok kezelésére alkalmas. A fluidizációs kemence egy henger alakú, tartórostélyon elhelyezett finom szemcsés ömlesztett anyagból álló rétegből épül fel. A fluidizáló anyagot a kemencébe bevezetett nagy mennyiségű légáram mozgatja, lebegteti és forgatja. A légáram égéslevegő és visszacirkuláltatott füstgáz keveréke. A folyamat egyenarámban megy végbe. Az elégetendő anyag részben a fluidágyra esik, részben pedig elkeveredik a fluidummal. Az örvényáramba bekerült hulladék bomlással és kigázosodási reakciókkal illóvá válik, majd gyorsan kiég. A tartózkodási idő e kialakításnál a legrövidebb, így a lassan égő komponenseket gyakran visszacirkuláltatják. A légfelesleg tényező értéke rendszerint 1,1–1,3. A hamu eltávolítása, vagy a kemence alján történik, vagy a füstgázzal együtt távozik a rendszerből. A folyamat végén a füstgázból mechanikai berendezések alkalmazásával a hamu és a fluidizáló anyag leválasztható [11].

1. Az égetés előnyei [11]:

- A keletkező hulladékok térfogatát és tömegét jelentősen csökkenti (ezáltal kisebb anyagmozgatás, kisebb elhelyező terület, földhasználat szükséges).
- Az égetés energiatermeléssel jár, a keletkezett hő hasznosítható.
- Az eljárás közegészségügyi szempontból hatékony, mivel a kórokozók elpusztulnak (a termikus technológiákra jellemző közös tulajdonság).

2. Az égetés hátrányai [11]:

- Az égetés másodlagos környezetszennyezéssel jár (légszennyezés, pernye, salakelhelyezés problémái).
- Ökológiai szempontból kedvezőtlen, mivel a termikusan bontott anyag kikerül a természetes körforgásból.
- Beruházási és üzemeltetési költségei lényegesen magasabbak a hagyományos eljárásoknál (komposzt, biogáz, lerakás).

3. A hulladékégetéses ártalmatlanításhoz a következők ismerete szükséges [1]:

- Halmazállapot (folyékony, pasztás, szilárd, ill. kevert).
- Elemi analízissel megállapított kémiai összetétel (szén-, hidrogén-, oxigén-, nitrogén-, kén-, víz-és hamutartalom).
- Gyors analízissel megállapított összetétel (fix szén-, illóanyag-, víz-és hamutartalom).
- Fűtőérték.
- Sűrűség.
- A hamu olvadási jellemzői.
- Szilárd hulladék esetében szemcseméret-eloszlás, maximális darabnagyság, valamint anyagfajták szerinti összetétel.
- Folyékony hulladék esetében viszkozitás, gyulladás-és lobbanáspont, valamint szilárd szennyezőanyag-tartalom és annak legnagyobb szemcsemérete, továbbá a kémhatás.
- Halogénanyag-tartalom (kloridok, fluoridok, bromidok).
- Nehézfém-tartalom (ólom, kadmium, higany, réz, vanádium stb.).
- Egyéb fém-tartalom (vas, kalcium, nátrium stb.).
- Egyéb mérgezőanyag-tartalom, mint például poliklórozott-bifenil (PCB).
- Egyéb specifikus anyagi tulajdonságok szükség szerint (pl. fertőző tulajdonság, hőmérséklet stb.).
- Mennyiségi adatok (szélső határok és átlagértékek).

4. Az energiamérleg összeállításához a következő gyakorlati szempontok ajánlottak [11, 46]:

- Az elégetett tüzelőanyag hőtartalmának 70–80%-át lehet gőztermelésre hasznosítani.
- Füstgázokkal távozó hőveszteség nagysága 16–30%.
- Salak kiegészítő alkotórészeivel távozó hőveszteség 1,5–3%.
- Salakkal kihordott hőveszteség 1,5–3%.
- A kazán sugárzási vesztesége 1–2%.

A hulladékégetés műszaki követelményeiről, működési feltételeiről és a hulladékégetés technológiai kibocsátási határértékeiről a 29/2014. FM rendelet rendelkezik. A rendelet szigorú feltételeket ír elő a hulladékégetők kibocsátására vonatkozóan. A rendelet kitér a tüzelőberendezést elhagyó füstgáz hőmérsékletére és a tartózkodási időre. A feltételek kielégítése céljából a füstgázt egy utóégető kamrába vezetik, ahol a maradék éghetőanyag-tartalom kiég, így az égés befejeződik. Az utóégetőben előírt általában 850 °C, vagy veszélyes hulladékok esetében az 1.100 °C hőmérséklet csak támaszgő alkalmazásával érhető el. A kamrába bevezetett nagy mennyiségű szekunderlevegő a füstgázzal turbulens áramlásban elkeveredve, jelentős hőveszteséget eredményez, így szükséges a hőbetáplálás. A keveredés és kiégés megvalósulása érdekében a

tartózkodási idő minimum 2 másodperc. Szénhidrogének, műanyagok tökéletes, korrommentes elégetéséhez a 2 másodperces tartózkodási idő általában kevés [14, 15].

Az égetési folyamatok során keletkező dioxinok képződésére a 300–800 °C hőmérséklet a legkedvezőbb. Leválasztásuk egyik problémáját az jelenti, hogy a füstgázcsatorna különböző hőmérsékletű helyein újra keletkeznek és átalakulnak, valamint a szilárd részecskék felületén is előfordulhatnak. Az égetés során keletkezésük minimalizálható, ha a füstgáz 1.000 °C fölötti hőmérsékleten pár másodpercig tartózkodik [14].

Az égési folyamat során keletkező reakcióhőt Rankine-Clausiusis-körfolyamat alkalmazásával villamos és hőenergia termelésre használják fel. Hő hasznosítás hiányában a füstgázokkal távozó hő veszteség 92–95% [15]. A füstgáz környezetbe való távozása előtt számos füstgáztisztítási eljárást kell alkalmazni, hogy „minimalizálni” lehessen a környezetszennyezést. A leggyakrabban alkalmazott berendezések az abszorberek a porkamrák és porciklonok, valamint a zsákos szűrők és elektrofilterek, mellett a katalizátorok és füstgázmosók [11].

Abszorberként leggyakrabban mésztejet, valamint aktívszenet alkalmaznak, amiket közvetlenül a gázáramba injektálnak. A mésztej a füstgáz savas kémhatású komponenseinek megkötésére, az aktívszenet pedig a dioxinok és furánok ártalmatlanítására alkalmazzák. A füstgázban visszamaradó dioxinok és furánok eltávolítása rendszerint titán-oxid katalizátor alkalmazásával valósul meg. A mechanikai tisztítást megvalósító berendezések a szálló por koncentrációjának csökkentése érdekében kerülnek beépítésre. A kibocsátási értékek mérését a kéményen elhelyezett szondák teszik lehetővé [14].

4.1.2. PIROLÍZIS

A pirolízis a szerves anyagok hőbontásán alapuló folyamat, ami az oxigén teljes kizárása mellett játszódik le. Szerves hulladékok kezelése egy arra a célra megfelelően kialakított, rendszerint nyomás alatt lévő, hő hatására bekövetkező kémiai bomlással történő átalakítást jelent [10]. A kezelés során gáz halmazállapotú energiahordozó szabadul fel, amit pirolízis gáznak, vagy pirogáznak nevezünk. A pirogáz döntően szénmonoxidban és hidrogénben, valamint metánban gazdag gázelegy, amely fűtőértéke megközelítheti a földgáz fűtőértékét. Ezen felül energetikailag inert összetevőket is tartalmazhat, főleg szén-dioxid és vízgőz előfordulása várható [13]. A gáztermék erőművi hasznosítása elsősorban gázturbinás, vagy gázmotoros rendszerekben célszerű, amely így alkalmassá teszi a földgáz üzemű erőművek kiváltását [66].

Szilárd fázisban pirolízis kokszt, röviden pirokokszt marad vissza, amiben a feladott hulladék karbon tartalma feldúsul [12]. Az így előállított energiahordozó a vaskohászatban, a cementgyártásban, valamint a széntüzelésű erőművekben alkalmazható kőszén kiváltására. Nehéz és könnyűfémekkel szennyezett hulladék esetében a fémek rendszerint szilárd fázisban maradnak vissza, így azok visszanyerésére további kezelésnek kell alávetni a pirokokszt [33].

Folyékony fázisban úgynevezett pirolízis olaj, piroolaj keletkezik, amely szénhidrogéneket és kátrányt tartalmaz [12]. Megfelelő tisztítást, és lepárlást követően különféle üzemanyagok gyárthatók belőle, így akár a közlekedésben is alkalmazható haszontermékek állíthatók elő [42]. A keletkező termékek arányát az alkalmazott hőmérséklet, a nedvességtartalom, valamint a kezelési idő jelentősen befolyásolja [33]. A nagyobb hőmérséklet és nedvességtartalom, valamint a hosszabb kezelési idő kedvez a gázhozamnak [34].

A pirolízis a hagyományos égetéshez hasonlóan a termikus kezelési eljárások közé tartozik, de alapjában véve két különböző folyamatról beszélünk. Az égetéshez három lényeges dolog szükséges, ami az éghető anyag, az oxidáló anyag és a hő. Ezzel ellentétben a pirolízis során csak éghető anyagra és hőre van szükség [36]. A gyakorlatban nem beszélhetünk tökéletes pirolízisről, mert maga a hulladék is tartalmaz valamekkora mértékben oxigént, így szén-monoxid, szén-dioxid, vízgőz valamint kén és nitrogén oxidok is keletkeznek. Az égésmélethez adódóan a kibocsátásnak, a pirolízis gáznak, lényegében kedvezőbb értéket kell mutatnia, mint az égetésnél [12]. További eltérés, hogy az égés hőtermelő, tehát exoterm folyamat, míg a pirolízis endoterm, azaz fenntartásához hőt igényel, amit rendszerint villamos fűtéssel visznek a rendszerbe.

A joggyakorlatban a pirolízis, ahogy a többi alternatív termikus technológia, nem különbözik a hagyományos égetéstől, de műszaki értelemben egyik üzem sem tekinthető hagyományos égető rendszernek. Az alternatív technológiák társadalmi megítélése, a környezeti és gazdasági hatásai mégis azonosak a hagyományos hulladékégetőké [13].

A pirolízis, egy olyan gyűjtőfogalom, amely több technológiát is magába foglal. Az egészen kis hőmérsékletű (< 300 °C) eljárás, mint a pörkölés (torrefaction) legfőbb célja a tüzelőanyagban lévő illékony vegyületek eltávolítása és a nedvességtartalom csökkentése, ezáltal a visszamaradó szilárd termék energiasűrűségének növelése.

A kokszosítás, másneven a svélezés célja a pörköléshez hasonlóan olyan szilárd végtermék előállítását, amelyben a karbon feldúsul. A folyamat során felszabaduló gáztermék elégetésével a technológia energiaigénye fedezhető. Az alkalmazott hőmérséklet rendszerint 400–600 °C tartományban van [13].

A klasszikus pirolízis a hulladék, illetve tüzelőanyag szerves molekuláinak a hőbontását valósítja meg 500–800 °C-on, ami eredményeként gáznemű és szilárd frakció jön létre. Ezen belől beszélhetünk lassú és gyors pirolízisről [13].

A kigázosítás a pirolízis-kokszban maradó szén folyamatgázzá (pirolízis gázzá) történő átalakítását jelenti 800–1.000 °C-on. Mivel a folyamat során gázosodást segítő anyag (pl. levegő) jelenléte szükséges (a kigázosítást más néven nagyhőmérsékletű pirolízisnek szokás hívni), ezért ezt a megoldást a legtöbb szakirodalom már a gázosításhoz sorolja. A gyakorlatban ezt a kialakítást *pirolitikus- elgázosításnak* nevezik.

A hőbontás alaptípusai a hőmérséklet szerinti besorolás alapján [12, 65]:

- Kis- és középhőmérsékletű eljárások (300–800 °C).
- Nagy hőmérsékletű eljárások (800–1.100 °C) pl.: forgókemencék.
- Nagy hőmérsékletű salakolvasztásos eljárások (>1.200 °C) pl.: fluidágyas kemencék lehetnek.

A reaktorok csoportosítása két szempont szerint történik. Az egyik lehetőség a fűtési mód alapján történő megkülönböztetés. Ennek megfelelően a reaktorok a fűtési mód szerint lehetnek közvetett (reaktorfalon keresztül, ill. cirkulációs közeg segítségével) és közvetlen fűtési megoldásúak [12].

A második csoportosítási lehetőség a reaktor elrendezésén alapul. Ennek megfelelően beszélhetünk vertikális, vagy aknás reaktorokról; horizontális fix; forgódobos és fluidizációs reaktorokról [12, 66].

1. A keletkező pirolízis gáz használatára öt fő módszer létezik [12, 13, 14]:

- Egy második kamrában elégetik a kezeletlen gázt és a hőt hasznosítják.
- A gázt lehűtik és tisztítják, azt követően gázmotorban vagy gázturbinában égetik el és villamos energiát állítanak elő.
- A pirogázt kazánban elégetik és a felszabaduló reakcióhőt hasznosítják.
- A gázt egy másik erőműben együttégetik.
- Vegyipari szintézisekben hasznosítják, pl.: metanol gyártás.

2. A veszélyes hulladékok kezelésben „áttörést” jelent [12, 13]:

- A redukív és oxidatív eljárás soros összekapcsolása.
- A pirolízis menetét (nitrogénadagolást) befolyásoló folyamatirányítási rendszerek kifejlesztése és alkalmazása jelentette napjainkra.

3. A salakolvasztásos eljárásnak két fő előnye [12, 33]:

- Nagyobb a kibocsátott pirolízis gáz mennyisége, amit jellemzően az ipar hasznosít.
- A kiégetett maradékanyag a környezettel szemben teljesen közömbös, amely így gyakorlatilag bárhol lerakható, vagy az építőiparban hasznosítható.

4. A végtermékek hasznosíthatók [12, 66]:

- Energiahordozóként: fűtőgáz, tüzelőolaj, koks.
- Vegyipari nyersanyagként: a gáztermékek szintézisgázzá konvertálása metanol előállítására.
- Egyéb célokra: építőipari alapanyagként, fakonzerválásra, talajjavításra.

5. A pirolízis előnyei [12, 66]:

- A szilárd maradékok vízfürdős leválasztást követően feldolgozhatók.
- Keletkeznek értékesíthető alifás és aromás szénhidrogének.
- Kevesebb az oxigén- felhasználás.
- A felszabaduló éghető gázok gázturbinákban, gázmotorokban való felhasználásával nagyobb mennyiségű villamos-energia állítható elő, mint a hagyományos égetés során alkalmazott gőzturbinák esetén.

6. A pirolízis hátrányai [12] [66]:

- Fokozott anyag-előkészítési igény.
- A kisebb hőmérsékletű eljárásokban a gáztisztítás összetettebb és komplikáltabb.
- Az ennek során keletkező, többnyire erősen szennyezett mosóvizet is komplex módon tisztítani kell.
- Az égetéshez képest nagyobb a lehetősége a nehezen bomló, nem tökéletes égéstermékek képződésének.
- A hasznos melléktermékek, mint például a pirolízis gáz hasznosítása során felszabaduló füstgáz, és a keletkezett hamu további kezelést igényelhet.

7. A keletkező pirolízisgáz az alábbi összetevőket tartalmazza [48, 66]:

- Vízgőz
- Hidrogén
- Szén-monoxid
- Szén-dioxid
- Metán

8. A hulladékokat kezelő pirolízis üzemek működése általában az alábbi alapvető lépésekre épül [12, 66]:

- Előkészítés és őrlés: a hulladékőrlo javítja és egységesíti a folyamatba bekerülő hulladékok minőségét, ezáltal javítva a hőátadást.
- Szárítás (az eljárástól függően): egy elkülönített szárítási lépés javítja a nyersgázok fűtőértékét és javítja a gáznemű és a szilárd frakciók közti reakciók hatásfokát a forgódobos kemencében.
- Hulladékok pirolízise: a pirolízis gáz mellett szilárd, széntartalmú maradék halmozódik fel, amely ásványokat és fémeket is tartalmaz.
- Pirolízis gáz és pirolízis kokszt utókezelése: gőzök kondenzálása az energia-termelésre használható olajkeverékek kinyeréséhez és/vagy gáz és kokszt elégetése a szerves összetevők elbontásához és az ezzel párhuzamosan zajló energiatermeléshez.
- A keletkező haszontermékek (pirolízis kokszt, olaj, gáz) energetikai célú hasznosítása során keletkező füstgáz, tisztítást igényelhet bizonyos esetekben.

4.1.3. GÁZOSÍTÁS

A gázosítás az egyik legrégebben alkalmazott eljárás szilárd halmazállapotú foszszilis és megújuló energiahordozók éghető szintézisgázzá és folyékony üzemanyaggá történő átalakítására. A gázosítást elsőként Thomas Shirley alkalmazta hidrogén előállítására 1659-ben. Az első szabadalmat 1788-ban Robert Gardner nyújtotta be, ezzel kezdetét vette a gázosítás térhódítása. Ipari alkalmazása William Murdoch nevéhez fűződik, és 1798-ban kezdődött Angliában valamint Franciaországban. Kezdetben fából és szénből állítottak elő éghető gázokat (fagáz és széngáz), amit főleg fűtési és közvilágítási célokra alkalmaztak. 1850-re a technológia olyan fejlettségi szintet ért el, ami lehetővé tette, hogy London világításának 75%-át, az ilyen módon előállított mesterséges gázokkal oldják meg. Néhány évvel később a gázosítási technológia megjelent az Amerikai Egyesült Államokban, és 1920-ra a legtöbb városban fűtésre valamint világításra használták a gázgyárakban előállított szintézisgázokat [10].

A texasi olajmezők felfedezését követően 1930-ban kiépült az első földgázvezeték Denverben, ami megszüntette a szintézisgáz egyeduralmát. Az északi tenger alatt lévő olajmező felfedezését követően idővel Európában is a feledés homályába merültek a gázgyárak. Ugyan, az utolsót 1970-ben bontották le Angliában, de még napjainkban is található működő rendszer a harmadik világbeli országokban [9].

A belső égésű motorok megjelenésével a gázosítást alternatív üzemanyag előállítására is alkalmazni kezdték. Az első fagázzal működő autót 1901-ben Thomas Hugh Parker tervezte és építette meg, azonban elterjedésére mintegy harminc évet kellett várni. Az 1930-as években a hadiipar rohamos fejlődése és a második világháború okozta nyersanyaghiány alternatív technológiák alkalmazását tették szükségessé az üzemanyagiparban is. A II. világháború alatt a Szövetségesek és a Szovjetunió nem szállított kőolajat a németek által megszállt európai országokba. A helyi kismértékű kitermelést a német hadsereg (Wehrmacht) használta fel. Mivel még a hadiipar számára sem volt elegendő üzemanyag, a Wehrmacht még fagáz-üzemű tankokkal is kísérletezett, amelyek bevetésére végül körülményes üzemeltetésük miatt nem kerülhetett sor. A II. világháború végére, csupán Németországban körülbelül félmillió fagázüzemű jármű üzemelt [9]. Európában egy millióra tehető az ilyen járművek száma. A megszállt Dániában a civil járművek és mezőgazdasági gépek 95%-a fagázzal üzemelt [10].

A tűzifa gázosítása során keletkező szintézisgáz kémiai összetétele és energiataralma megfelelő volt ahhoz, hogy az akkori, kezdetleges belsőégésű motorok (Otto-motorok) hajtóanyagául szolgáljon [9]. Néhány évtizeddel később a gázosítás továbbfejlesztett változatát a hulladékgazdálkodásban és az erőmű-energetikában is alkalmazni kezdték. Külön szerelóműhelyeket alakítottak ki, hogy a már forgalomban lévő hagyományos autókat át tudják alakítani fagáz üzeművé, továbbá olyan üzemanyag-töltő állomások jöttek létre, ahol megfelelő méretűre aprított tűzifát lehetett vásárolni.

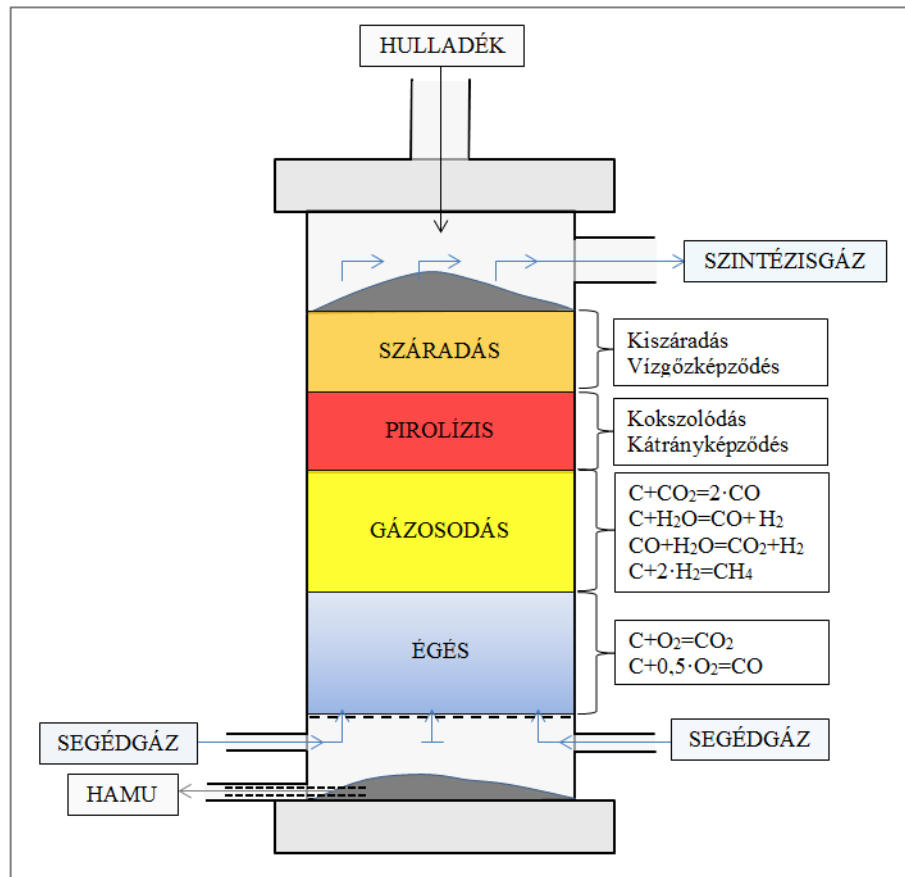
A gázosítás az anyagok gyors hőbontásán alapuló, parciális oxidációval lejátszódó folyamat, amely így a tökéletes égéshez szükséges elméleti oxigénmennyiséghez képest

kisebb oxigénszükséglettel rendelkezik [65]. Az alapanyagban található szerves vegyületek részleges oxidációja közben szintézisgáz szabadul fel, ami akár nyersanyagként, vegyipari szintézisekben, vagy tüzelőanyagként hasznosítható [33]. A folyamat érzékenysége miatt fontos, hogy a beadagolt hulladék jellegzetességei (méret, nedvességtartalom, konzisztencia) bizonyos előre meghatározott határértékek közt maradjon [15]. Az érzékenység hatása jellemzően az energetikai- és a környezeti hatékonyságban jelentkezik.

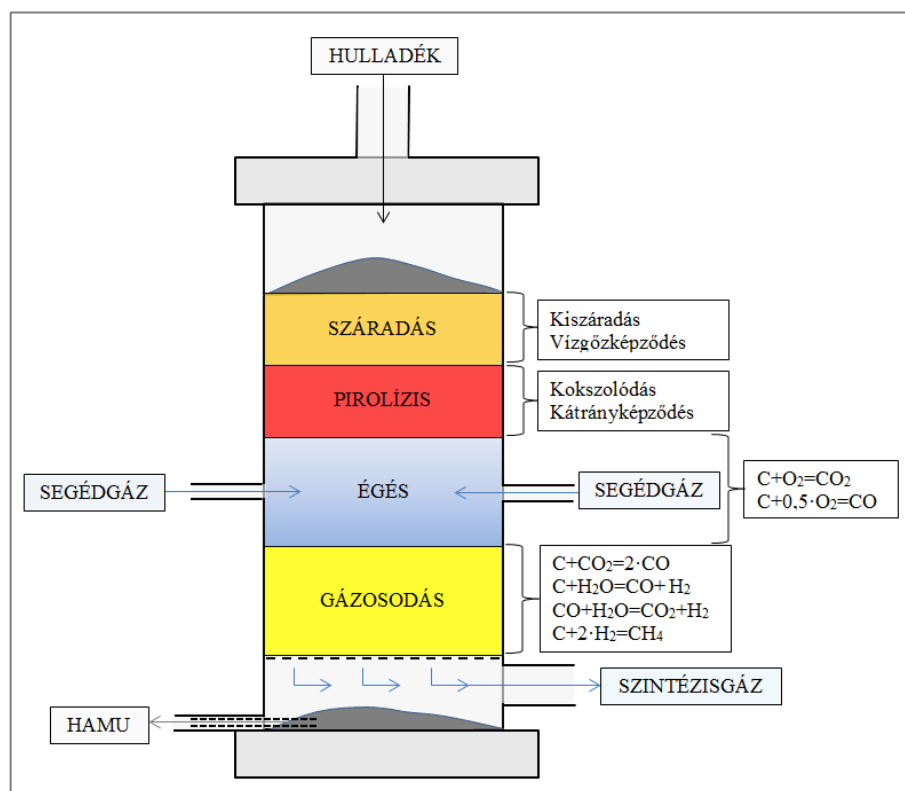
Az eljárás legfőbb célja a hulladék ártalmatlanítása mellett a legnagyobb gázkihozatal, amihez az optimális energetikai hatásfok elérése társul. A gázosítás során előállított szintézisgáz hidrogénben és szén-monoxidban gazdag gázelegy, ami a gázosító közegtől függően más, energetikailag inert összetevőket is tartalmazhat. A leggyakrabban előforduló éghetetlen komponens a szén-dioxid és a vízgőz, amik a reaktortérben részt vesznek a kedvező reakciók lejátszódásában, de a reaktort elhagyva ballasztként viselkednek. A gázosító közeg jelentősen befolyásolja a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét és energiatartalmát, valamint az átalakítás hatékonyságát. A gázosító közeg segít lebontani a szilárd kARBONT és a nagyobb molekulatömegű szén-hidrogéneket, ami eredményeként hidrogén és szén-monoxid szabadul fel [65]. Leggyakrabban levegőt, vízgőzt, vagy tiszta oxigént alkalmazunk, de szén-dioxid és oxigén megfelelő arányú keveréke is kedvező eredményt hozhat [10]. A helytelenül megválasztott segédgáz a technológia működésképtelenségéhez vezethet.

A szintézisgázt hasznosítás előtt célszerű lehűteni, továbbá komplex tisztítási eljárásnak kell alávetni a káros- és a korrozív anyagok (kénsav és kén-dioxid) eltávolítása érdekében. A tisztított szintézisgázból rendszerint gázmotorban, vagy gázturbinában kombinált ciklusban elégetve villamos- és hőenergiát állítanak elő, de számottevő a vegyipari szintézisekben történő alkalmazása, főleg a metanol gyártásban [10].

A gázosítás önállóan nem létező technológia, mert az erre a célra kialakított reaktorban pirolízis és égetési zóna egyaránt kialakul. A megnevezés mégis helytálló, mert a lejátszódó reakciók termodinamikai egyensúly esetén, a sugárzási veszteségeket leszámítva, önfenntartó folyamatot eredményeznek [9]. Termodinamikai egyensúlyi állapotban a rendszer nem hűl és nem melegszik, tehát nem igényel hőbetáplálást (pirolízis), vagy hőelvonást (égetés), valamint éghető szintézisgázt állít elő. A gázosítás négy lépésben valósul meg, ami a reaktorban eltérő hőmérsékletű és sztöchiometriai arányú zónákat eredményez. A zónák egymáshoz való viszonyát a reaktor típusa határozza meg [65]. Anyagáramlási megközelítésben megkülönböztetünk alsó- és felső kiáramlású reaktorokat, ami a hulladék és a szintézisgáz egymáshoz viszonyított áramlási iránya alapján egyen- és ellenáramú lehet. A zónák relatív elhelyezkedése és az áramlási irány befolyásolja a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét, valamint hőmérsékletét [10]. A 4.1. és a 4.2. ábra a kétféle kialakítású reaktor elvi felépítését szemlélteti [10, 52].

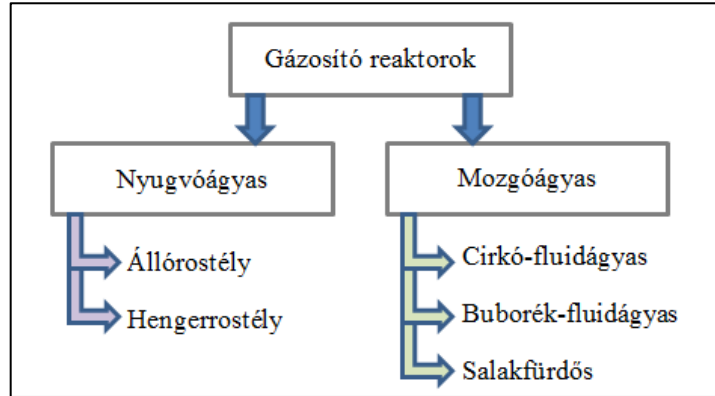


4.1. ábra: Felső kiáramlású gázosító reaktorban kialakuló zónák elvi felépítése



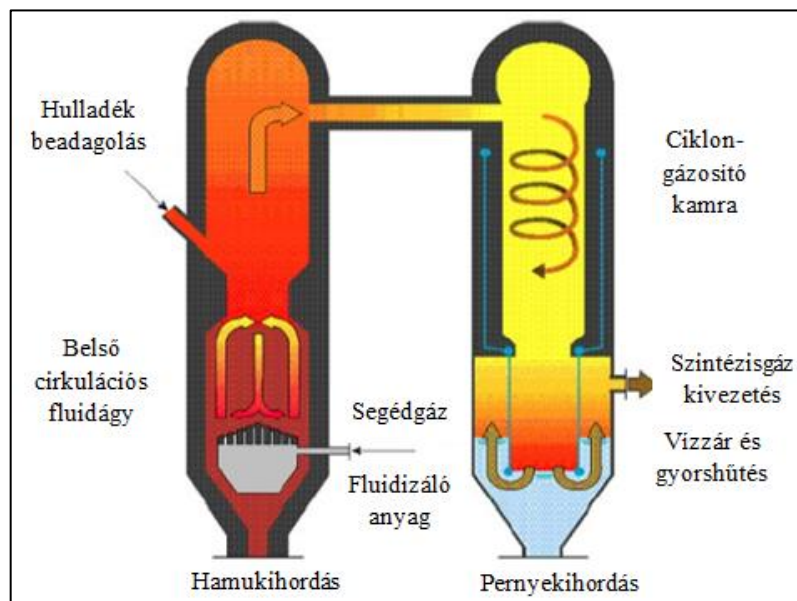
4.2. ábra: Alsó kiáramlású gázosító reaktorban kialakuló zónák elvi felépítése

További csoportosítási lehetőség az ágy típusa alapján történik, ennek megfelelően nyugvó- és mozgóágyas reaktorok alkalmazhatók (4.3. ábra). A nyugvóágy kialakítása álló-, vagy hengerrostély alkalmazásával valósítható meg. Az állórostélyos reaktorokat a nemzetközi irodalmak áramlásos rendszerű gázosítónak nevezik. A mozgóágyat maga a gázosítandó közeg adja [10].



4.3. ábra: Gázosító reaktorok típusai az ágy függvényében

Az alkalmazott hőmérséklettől függően beszélhetünk salakfűrdős fluid-ágyról, ahol a salak és a hamu olvadt állapotban tartózkodik a reaktorban, valamint szilárd fluidágyról, ahol a hőmérséklet a hamuolvadási hőmérséklet alatt marad. A fluidágyas rendszerű gázosítókat gyakran kombinálják ciklonokkal (4.4. ábra), valamint a szintézisgáz hűtéséhez és pernyeleválasztásához használt vízzel, így ciklon és buborékos gázosítók alakíthatók ki. A szintézisgáz visszavezetésével cirkulációs rendszer alakítható ki [65].



4.4. ábra: Fluidágyas gázosító reaktor elvi felépítése

A termikus kezelési technológiák közül a gázosítás az egyetlen, amely a légfelesleg tényező és a hőmérséklet függvényében lehet endoterm és exoterm folyamat [52]. A gázosítás alkalmazása során az önfenntartó folyamat elérése a cél [65]. A rendszer akkor önfenntartó, ha külső energiabetáplálás nélkül állít elő éghető szintézisgázt, továbbá nem melegszik és nem hűl. Ez akkor következik be, ha a reaktor sugárzási és egyéb hővesztéseit figyelembe véve, termodinamikai egyensúlyi állapotban üzemel. A termodinamikai egyensúlyi állapotot a feladott alapanyag nedvességtartalma jelentősen befolyásolja. A légfelesleg tényező értékét a nedvességtartalom és a reaktor hővesztései alapján lehet meghatározni [9].

1. A gázosítás legfőbb alaptípusai [12]:

- A Siemens által kifejlesztett Schwel-Brenn eljárás a pirolízis (gázosítás) és az azt követő gáztermék nagyhőmérsékletű égetéssel történő kombinációja.
- A Lurgi-eljárás a Schwel-Brenn eljárástól a reaktor típusban különbözik, ahol cirkuláló fluidágyas kemencét alkalmaznak.
- A Noell-féle eljárásnál a szilárd hulladék termikus lebontása közvetve fűtött forgódobos reaktorban, 450–550 °C-on történik.
- Thermoselect-eljárást alapvetően szilárd települési és ipari hulladékok kezelésére dolgozták ki. A települési hulladék előkezelés nélkül feldolgozható a berendezésben.
- A Babcock technológia a hulladékot forgódobban gázosítja.

2. A gázosítás előnyei [12, 65]:

- A nagymolekulájú szénhidrogének, főként az ártalmatlan klórtartalmú vegyületek nagyhőmérsékletű lebontása, a dioxinok és furánok redukáló atmoszférával gátolt képződésével.
- Salakolvasztásos eljárásnál az üvegszerű salak-granulátum előállításával (nehézfémek megkötésével) a szilárd maradékok másodlagos környezet-szennyező hatásai minimalizálhatók, egyúttal könnyebben hasznosítható végtermék nyerhető ki (hasonlóan a salak-olvasztásos égetéshez).
- Olyan tiszta gáztermék állítható elő, amely sokoldalúan hasznosítható.

3. A gázosítás hátrányai [12, 65]:

- A gázosítás során keletkező salakmaradék hasonló összetételű a hagyományos égetőkéhez.
- Az üzem olyan hulladékokat igényel a hatékony működéshez (papír, fa, műanyag, ételmaradékok), amelyek éppen az anyagában történő hasznosítás, valamint a fermentálás legjobb alapanyagai.
- Előfordulhat, hogy a hulladékok újrahasznosításával több energiát takarítunk meg, mint amennyit a gázosítást (pirolízist is beleértve) követő szintézisgáz hasznosítása során nyerünk.

4. A gázosítási eljárás speciális jellemzői [12, 65]:

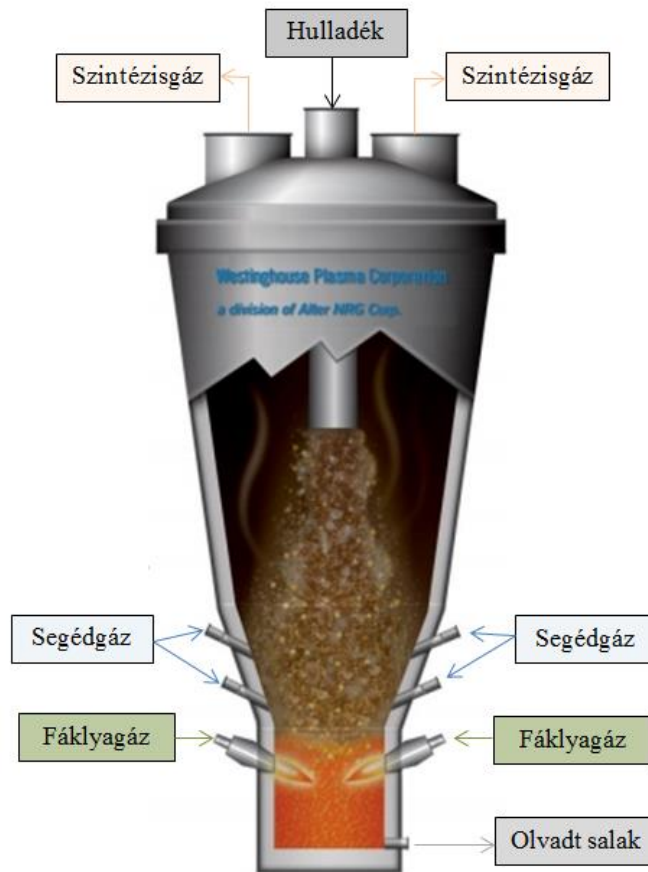
- CO₂ helyett elsősorban CO képződik, ami gázmotorban, vagy turbinában hasznosítható.
- Nagy üzemi nyomás és kis hőmérséklet alkalmazásával nagyobb metán-képződés (egyes eljárásokban).
- Szilárd maradványok felhalmozódása salak formájában (nagy hőmérsékletű salakolvasztásos gázosítóknál).
- Kisméretű és tömör aggregátumok (főleg nagy nyomás mellett végzett gázosításnál).
- A szintézisgáz energetikai és nyersanyagként való felhasználása.
- Kevesebb szennyvíz a szintézisgáz hűtéséből és tisztításából.

4.1.4. PLAZMATECHNOLÓGIA

A plazmatechnológia működésének megértéséhez elsőként célszerű definiálni a plazma fogalmát. A plazma ionizált gáz, ami inert gázáramban nagy áramerősségű elektromos ív hatására alakul ki az elektródok között. A folyamat során a katódból kilépő töltött állapotú elektronok gerjesztik az ívtérben elhelyezkedő atomokat, részecskéket. A gerjesztés fényjelenséget okoz, amit villamos ívnek nevezünk. A nagy átfolyó áramok miatt az ívtérben a kialakuló nagy hőmérséklet hatására, az anyagok plazma állapotba kerülnek, ami a negyedik halmazállapotnak tekinthető [63].

Plazmatechnológiák esetén a maghőmérséklet rendszerint 3.000–5.000 °C közötti, de akár 30.000 °C is elérhető lenne [63]. Műszaki megközelítésből már az 5.000 °C hőmérséklet is jelentős problémát jelent, mert költséges műszaki kerámiák és fémötvözetek alkalmazását teszi szükségessé [28]. Ilyen hőmérsékleten a hulladékok összetevői, mint például a toxikus anyagok, alkotóelemeikre bomlanak. 5.000 °C felett a vegyi anyagok és a mérgező gázok (dioxinok és a furánok) teljesen lebomlanak. Környezetet károsító anyagok csak kis mennyiségben, vagy egyáltalán nem képződnek [29]. Ugyan bevett kereskedelmi technológiának számít, azonban az eljárás rendkívül összetett, drága és képzett üzemeltető közreműködését igényli [14, 30].

A 4.5. ábra egy plazmareaktor elvi felépítését és működését szemléltet az anyagáramokon keresztül. A reaktor felső kiáramlású és ellenáramú működést biztosít. Megfigyelhető, hogy a reaktor három jól elhatárolható térrészre osztható, és lefelé szűkülő kialakítású. A felső térrész a szintézisgáz-gyűjtő rész, amely térfogata a reaktor térfogatának mintegy kétharmadát teszi ki. A középső rész a hulladéktér, amely fogadja a feladott hulladékot és a felszálló szintézisgáz felhasználásával előmelegíti. A segédgáz bevezető csomópontjai is itt helyezkednek el. A segédgáz előmelegítéséről a szintézisgáz hűtéséből származó hő gondoskodik. A harmadik térrész az olvadt salak gyűjtésére szolgál. A plazmafáklya a salakgyűjtő rész felső részén helyezkedik el. A reaktor belső felületei hőálló kerámiaszigeteléssel vannak ellátva [68].



4.5. ábra: Plazmareaktor felépítése és anyagáramai

A reaktor méretei és arányai a méretnövelésnél, a nagyobb kapacitásra történő tervezésénél játszik fontos szerepet. Két eltérő feldolgozó képességű reaktor akkor nevezhető geometriailag, valamint áramlás- és hőtechnikai szempontból is hasonlóknak, ha bennük a hőmérséklet-eloszlás és az áramlási kép azonos képet mutat. Ekkor biztosítható, hogy ugyanaz a folyamat játszódik le bennük. Mivel a plazmafáklyákat teljesítménykategóriákba sorolják, ezért a méretnövelés során az üzemi nyomás lesz a változó paraméter. Így előállhat, hogy két ugyan olyan geometriai méretekkel (térfogattal) rendelkező reaktor eltérő kapacitással rendelkezik. A nagyobb nyomáson üzemelő reaktor nagyobb feldolgozó képességgel bír. Az üzemi nyomás befolyásolja a lejátszódó reakciók milyenségét, ezen keresztül pedig az előállított szintézisgáz összetételét és fűtőértékét [68].

1. Plazmatechnológia hátrányai [12, 13, 29, 51, 67, 68]:

- A kisebb hőmérsékletű (2.000 °C alatti) plazma alapú eljárásokban a gáz-tisztítás összetettebb és komplikáltabb.
- A technológia alkalmazása során keletkező, többnyire erősen szennyezett mosóvizet is komplex módon tisztítani kell.
- Az égetéshez képest nagyobb a lehetősége a nehezen bomló, nem tökéletes égés-termékek képződésének.

2. A plazmatechnológia környezetvédelmi előnyei [12, 13, 29, 51, 67, 68]:

- Nem igényeli a hulladékok előzetes válogatását, tehát azok vegyesen kerülhetnek feladásra, összetételüktől függetlenül.
- A szervetlen hulladékok részben lebomlanak, részben pedig megolvadnak és elüvegesednek.
- A szerves anyagok teljesen lebomlanak.
- A halogének kémiai megkötődnek a keletkező üvegben, és onnan nem oldódnak ki.
- A plazma által kibocsátott erős ultraibolya sugárzás meggyorsítja a klór tartalmú szerves vegyületek lebomlását.
- A plazma térben keletkező ultraibolya sugárzás „bennragad” a plazmaívben, így további gerjesztést idéz elő, mely a hőmérséklet növekedésével jár.

3. A plazmatechnológia műszaki és gazdasági előnyei [12, 51, 65, 67, 68]:

- A plazmatechnológia a nagy hőmérséklet miatt hatékonyan használható minden fajta hulladéktípus (veszélyes, mérgező, halálos) lebontására.
- A folyamat teljesen zárt térben játszódik le, így káros anyagok nem kerülnek a környezetbe.
- A folyamat melléktermékei ártalmatlanok, amelyeket a kohászati valamint az építőipar alapanyagként fel tud használni.
- A hulladékok térfogatának csökkenése 300:1 arányú a hagyományos égetéssel szemben, ahol ez az arány a nagymennyiségű hamu miatt csak 5:1 (szilárd hulladéknál).
- A plazmatechnológia napi kapacitása a legnagyobb, akár 500 tonna/nap is lehet.
- A plazmatechnológiát alkalmazó gépek számítógép-vezéreltek, csendesek, valamint lehetnek helyhez kötött és mobil kivitelűek.
- A plazmatechnológia alkalmazása során keletkező, a salakba távozó szennyező anyagok, mint például a higany, a kadmium, a kén, a különböző dioxinok valamint a nehézfémek mennyisége jelentősen csökkenthető speciális mosóvíz, száraz gázmosók és szűrők alkalmazásával.

A plazmatechnológia alaptípusai [15]:1. Argon alapú plazmaíves technológia [15]:

Az argon alapú technológia „in flight” folyamatra épül, ami azt jelenti, hogy a hulladék közvetlenül keveredik az argon plazmasugárral. Plazmagázként azért az argont használják, mert az argon inert anyag, és nem lép reakcióba a plazmafáklya anyagaival. A roncsolási és eltávolítási hatékonyság ózonkárosító anyagok ártalmatlanítása esetében a jelentések szerint meghaladja a 99,9998%-ot, 120 kg/ó kapacitás és 150 kW elektromos energia felhasználás mellett. A technológia előnye az egyéb plazma alapú rendszerekkel szemben az, hogy több éves, kereskedelmi méretekben történő alkalmazása során

bebizonyította, hogy képes nagy hatásfokkal roncsolni mind a klórvegyületeket (CFC), mind a halogéneket. A technológia ezen kívül csak alacsony szintű dioxin (PCDD) és furán (PCDF) kibocsátással jár. A szennyező anyagok tömeges kibocsátása is alacsony mértékű, mivel az eljárás során csak relatíve kevés füstgáz keletkezik. A rendkívül magas energiasűrűség miatt az eljárás helyigénye igen kicsi, a berendezés szállítása ezért nem okoz gondot.

2. Rádiófrekvenciás induktív csatolású plazma (ICRF) [15]:

Az ICRF alkalmazásokban induktív csatolású plazmafáklyákat használnak, ahol a plazma felé történő energia átadást az indukciós tekercs elektromágneses mezeje biztosítja. Az elektródák hiánya a gázok széles választékának alkalmazását teszi lehetővé (mind inert, mind redukív, mind oxidatív gázok felhasználására lehetőség nyílik), ráadásul a technológia megbízhatóbb, mint a plazmaíves megoldások. Az ICRF plazma alapú eljárás roncsolási és eltávolítási hatékonyság hatásfoka CFC-k ártalmatlanítása esetén meghaladja a 99,99%-ot, 50-80 kg/h kapacitás mellett. Az eljárás a jelentések szerint kereskedelmi méretekben is bizonyíthatóan jó hatásfokkal volt alkalmazható a CFC-k roncsolására, alacsony szennyező anyag kibocsátás mellett. A kismértékű füstgázképződés eredményeként a szennyező anyagok kibocsátása is alacsony mértékű.

3. Váltakozó áramú (AC) plazma [15]:

Az AC plazmát 50/60 Hz-es nagyfeszültségű váltóáram közvetlen felhasználásával nyerik, de egyéb vonatkozásaiban az ICRF plazmához hasonló. A rendszer mind elektronikus, mind mechanikus tulajdonságait tekintve egyszerű felépítésű, ezért igen megbízhatónak tartják. Az eljárás nem igényeli argon felhasználását, és a munkagázok széles választékával üzemeltethető (pl. levegő, gőz, egyéb plazmagázok), ezen kívül nem zavarja meg az ózonkárosító anyagokban esetlegesen jelenlévő olajszenyveződés.

4. Szén-dioxid alapú plazmaíves technológia [15]:

A magas hőmérsékletű plazmát inert légköri gázba, pl. argonba vezetett erős elektromos kisüléssel hozzák létre. A plazmamező kialakulása után a plazma fenntartásához az igényelt végeredménytől függően közönséges sűrített levegőt vagy bizonyos légköri gázokat használnak fel. Keletkezésükkor a plazma hőmérséklete jóval 5.000 °C fölé van. A forró plazmába a folyékony vagy gáz halmazállapotú hulladékot közvetlen befecskendezéssel juttatják be. A felső reaktortérben a hőmérséklet 3.500 °C körül van, és a reakcióterben folyamatosan csökken, míg el nem éri a szigorúan szabályozott kb. 1.300 °C-os hőmérsékletet. E plazma-alkalmazás sajátossága a CO₂ használata, mely az oxidáció során keletkezik, és a plazma fenntartását szolgálja. Az eljárás hőálló anyagok esetében elfogadható kimutathatósággal kitűnő roncsolási és eltávolítási hatékonyságot mutatott. A fontosabb szennyező anyagok kibocsátása alacsony mértékű, főleg az eljárásra jellemző kismértékű füstgázképződés miatt.

5. Mikrohullámú plazma [15]:

Az eljárás során 2,45 GHz-es mikrohullámot vezetnek egy speciálisan kialakított koaxiális üregbe, ahol légköri nyomáson hőplazma keletkezik. A plazma begyújtásához

argont használnak, de egyébként az eljárásban a plazma fenntartásához nincs szükség gázra. A mikrohullámú plazma roncsolási és eltávolítási hatékonyság hatásfoka a jelentések szerint 99,99%, CFC-12 2 kg/h kapacitáson végzett ártalmatlanítás esetében. Az eljárás a jelentések szerint kitűnő hatásfokkal ártalmatlanítja a nem kívánatos anyagokat és a magas üzemhőmérsékletet nagyon rövid idő alatt eléri, így az üzemeltetés rugalmassá válik, és a holtidő csökken. Az eljárás üzemeltetése nem igényel inert gázt, ami javítja az energiahatékonyságot és csökkenti az üzemeltetési költségeket valamint a keletkező füstgáz mennyiségét. Az eljárás helyigénye igen kicsi.

6. Nitrogén alapú plazmaíves technológia [15]:

Az eljárás egyenáramú közvetett plazmaíves fáklyát használ, amely vízhűtéses elektródákat, illetve munkagázként, a hőplazma létrehozásához nitrogént alkalmaz. Az eljárást 1995-ben dolgozták ki és kereskedelmi alkalmazásait is forgalomba hozták. Az eljárás roncsolási és eltávolítási hatékonysága klór tartalmú vegyületek (CFC, HCFC és HFC) ártalmatlanítása során, 10 kg/h kapacitás mellett a jelentések szerint 99,99%-os. A technológia legfontosabb előnye, hogy a berendezés helyigénye igen kicsi. A rendszer mindössze 9 m x 4,25 m-t igényel, ebben benne van a melléktermékek kicsapását és víztelenítését végző egység is. Ennek köszönhetően a rendszer a hulladék termelésének helyszínére akár teherautóval is elszállítható, így a hulladék helyben kezelhető.

4.2. KOMBINÁLT TECHNOLÓGIÁK

A kombinált termikus kezelési technológiák az alaptermotechnológiák kombinálásával létrehozott alternatív megoldások. E technológiák célja az alaptermotechnológiák hátrányos tulajdonságainak a kiküszöbölése, és az előnyök ötvözése. Leggyakoribb ok a beruházási és az üzemeltetési költségek csökkentése, az energetikai hatékonyság növelése, valamint a környezetterhelési mutatók javítása. A kombinált technológiák típusait és jellemző reakciókörülményeit a következő alfejezetekben részletesen tárgyalom.

4.2.1. EGYLÉPCSŐS, FOLYAMATINTEGRÁLT TECHNOLÓGIÁK

1. Pirolízis és égetést kombináló hulladékkezelő rendszerek [12, 15, 38, 44, 68]:

- 1. rendszer:* Pirolízis forgódobos kemencében - koks és szervesanyagok szétválasztása – pirolízis gáz égetése.
- 2. rendszer:* Pirolízis forgódobos kemencében - inert anyagok leválasztása - magas széntartalmú szilárd frakció és pirolízis gáz égetése.
- 3. rendszer:* Pirolízis forgódobos kemencében – pirolízis gáz komponenseinek kondenzálása - gáz, olaj és koks égetése.
- 4. rendszer:* Pirolízis rostélytüzeléssel - közvetlenül kapcsolódó égetés.

II. Pirolízist és gázosítást kombináló hulladékkezelő rendszerek [12, 38, 64, 66]:

1. *rendszer*: Konverziós eljárás - pirolízis forgódobos kemencében - szilárd fázis kivonása és kezelése - gáz fázis kondenzálása - végül pirolízis gáz, valamint az olaj és szén termékek továbbgázosítása.
2. *rendszer*: Kombinált gázosítás - pirolízis és olvasztás - részleges pirolízis pirolizáló kemencében, közvetlenül kapcsolódó reaktorban oxigén jelenlétében végzett gázosítással (pl. Thermoselect eljárás).

III. Gázosító-égető rendszerek [12, 15, 38, 67, 68]:

1. *rendszer*: Szilárdágyas rendszerű gázosítás kétkamrás rostélytüzelésű kemencében, majd a felszabaduló szintézisgáz égetése a második kamrában hővisszanyerés céljából (pl.: biomassza elgázosító kazán).
2. *rendszer*: Salakfürdős gázosító, az előzőekben leírtaknak megfelelően, de ebben az esetben a salak olvadt állapotban kerül kihordásra.
3. *rendszer*: Áramlásos rendszerű- folyékony, pasztás és finomszemcsés hulladék kezelésére, melyek fűvókán keresztül juttathatók a reaktorba. Zónás gázosítás és égetés kombinációja egy térben.
4. *rendszer*: Fluidágyas gázosítás- cirkó-fluidágyas gázosító berendezés előkezelt kommunális hulladék, víztelenített szennyvíziszap és egyes veszélyes hulladékok kezelésére. Véggáz kiégetése hőhasznosító kamrában.
5. *rendszer*: Buborékos fluidágyas gázosítás - a buborékos fluidágyas égetéshez hasonló megoldás, de kisebb, vagy nagyobb hőmérsékleten, gázosításra alkalmazva.

IV. Plazmatechnológia és gázosítás kombinációja [12, 15, 67, 68]:

Gázosítás plazmareaktorban: plazma-gázosítás. Lényege, hogy a plazmafáklás reaktorban a légszerűleg tényező a gázosítási tartományban van, reakcióhőmérséklet a gázosítási és a plazma technológiára jellemző hőmérséklet közötti tartományban található, így a folyamat energiaigénye, valamint beruházási és üzemeltetési költsége csökkenthető.

V. Plazmatechnológia és pirolízis kombinációja [12, 15, 67, 68]:

Pirolízis plazmareaktorban: plazma-pirolízis. Lényege, hogy a hulladékok ártalmatlanítása plazmareaktorban, plazmafáklákkal, de pirolízis hőmérsékleten és a segédgázok teljes kizárása mellett történik. A folyamat során jelentősen kisebb energiafelhasználás mellett állítható elő pirolízis koks, pirolízis olaj, és pirolízis gáz.

VI. Plazmareaktorban végzett pirolitikus elgázosítás kombinációja [67, 68]:

Plazma-pirolitikus-elgázosítás. Lényege, hogy a plazmareaktorban mind a hőmérséklet, mind a légszerűleg tényező a köztes tartományokban helyezkedik el.

Az egy lépcsős, folyamatintegrált technológiák jellemző reakciókörülményeit szemléltetik a 4.3. és a 4.4. táblázatok.

4.3. táblázat: Folyamatintegrált kombinációs termikus kezelési technológiák tipikus reakcióköri-
rűlményei

| Eljárás | Hőmérséklet [°C] | Légfelesleg tényező | Üzemi nyomás [bar] | Segédáramok |
|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|---|
| Pirolízis és Hagyományos égetés | 300–850 (1.150) °C | $\lambda = 0-2,5$ | $p \geq 1$ bar | levegő |
| Gázosítás és Hagyományos égetés | 650–1.150 °C | $\lambda = 0,5-2,5$ | $p \geq 1$ bar | vízgőz és levegő |
| Pirolízis és gázosítás | 300–1.200 °C | $\lambda = 0-0,8$ | $p \geq 1$ bar | vízgőz és levegő |
| Plazma-gázosítás | 1.200–3.000 °C | $0,5 \leq \lambda \leq 0,8$ | $1 \leq p \leq 20$ bar | levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék |
| Plazma-pirolízis | 1.200–3.000 °C | $\lambda = 0$ | $1 \leq p \leq 20$ bar | hidrogén, inert gázok, nitrogén |
| Plazma-pirolitikus-elgázosítás | 1.200–3.000 °C | $0 < \lambda < 0,5$ exoterm | $p \geq 1$ bar | levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék |

4.4. táblázat: Folyamatintegrált kombinációs termikus kezelési technológiák termékei és az alkalmazott erőgépek

| Eljárás | Keletkező közbenső termék | A technológiát elhagyó végtermék | Erőgép |
|---|---|---|-----------------------|
| Pirolízis és Hagyományos égetés | pirogáz, pirolaj, pirokoks | füstgáz (<5% éghető), salak, | gőzkazán, gőzturbina |
| Gázosítás és Hagyományos égetés | szintézisgáz, salak, hamu, pernye | hamu, pernye | gőzkazán, gőzturbina |
| Pirolízis és gázosítás | pirogáz, pirolaj, pirokoks | szintézisgáz ¹ , salak, hamu | gázmotor, gázturbina |
| Plazma-gázosítás | szintézisgáz ¹ , üvegesedett salak | | gázmotor, gázturbina |
| Plazma-pirolízis | pirogáz, pirolaj, pirokoks | szintézisgáz ¹ , nagy karbon tartalmú üvegesedett salak ² | gőzkazán, gőzturbina, |
| Plazma-pirolitikus-elgázosítás | pirogáz, pirolaj, pirokoks | szintézisgáz ¹ , kis karbon tartalmú üvegesedett salak ² | gázmotor, gázturbina |
| <p>Megjegyzések: ¹Az erőgépet követően a szintézisgázból füstgáz keletkezik. ²Az üvegsalak elégetését követően füstgáz és hamu marad vissza.</p> | | | |

4.2.2. KÉT- ÉS TÖBBLÉPCSŐS, TECHNOLÓGIAINTEGRÁLT TECHNOLÓGIÁK

A technológiaiintegrált kialakítás az alap technológiák bármelyik kombinációja, ezért a jellemző reakciókörülmények megegyeznek az alaptechnológiákkal.

I. Az első lépcső pirolízis, a második lépcső lehet:

- Hagyományos égetés (pirolízis rostélytüzeléssel utána következő salak-olvasztó kemencével, alacsony fémtartalmú olvadt salak előállításához-cirkó-fluidágy alkalmazása; kiégett részecskék és gáz eltávolítása).
- Gázosítás (a szilárd és folyadék fázisban visszamaradt pirolízis termékek továbbgázosítása).
- Plazmatechnológia (a szilárd és folyadék fázisban visszamaradt pirolízis termékek kigázosítása, salak olvasztása és üvegesítése, teljes ártalmatlanítása).

II. Az első lépcső hagyományos égetés, a második lépcső:

Plazmatechnológia (a hagyományos égetésből visszamaradt salak, hamu és pernye olvasztása, stabilizálása és üvegesítése, teljes ártalmatlanítása).

III. Az első lépcső a gázosítás, a második lépcső:

Plazmatechnológia (a gázosításból származó salak, hamu és pernye olvasztása, stabilizálása és üvegesítése, teljes ártalmatlanítása).

5. TERMOKINETIKAI MODELLVIZSGÁLAT

5.1. A MODELL ALAPEGYENLETE

A termokinetikai modellvizsgálat során meghatároztam az egyes technológiák által előállított gáztermékek kémiai és energetikai tulajdonságait. A folyamatok modellezésére egy termokinetikai modellt alkalmaztam, ami a moláris tömeg-és energia megmaradás tételén alapul [50]. A modell alkalmazásával közelítő becslést lehet adni a keletkező gáz kémiai összetételére, fűtőértékére, viszkozitására, és a lejátszódó kémiai reakciók energetikai hatékonyságára. Mivel a modell lényege, hogy egyszerűbbé és gyorsabbá tegye a számítást, ezért az egyszerűsített modellegyenletek felírásakor egyes összetevőket, mint például a nitrogénoxidokat, valamint az etilén és acetilén vegyületeket elhanyagoltam. A modellegyenlet a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalmára kerül felírásra [41, 50, 69].

A moláris anyagmegmaradás tételén alapuló modellegyenlet felírásához ismerni kell az alapanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkozó kémiai összetételét tömegszázalékban. Az 5.1. képlet tartalmazza a hulladék egy mólnyi karbon-tartalomra vonatkozó hidrogén és az oxigén tartalom átszámítást, valamint mutatja a felírási formalizmust [50]:

$$a_C \cdot C + a_H \cdot H + a_O \cdot O = C_{a_C} + H_{a_H} + O_{a_O} \rightarrow C + \frac{H_{a_H}}{a_C} + \frac{O_{a_O}}{a_C} \rightarrow C \frac{H_{a_H}}{a_C} O \frac{a_O}{a_C} \rightarrow CH_k O_l, \quad (5.1.)$$

ahol: a_C a tüzelőanyag moláris karbon, a_H a hidrogén és a_O az oxigén tartalma [mol/kg_{tüzelőanyag}]; k és l a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott hidrogén és oxigéntartalma, tehát a H/C és az O/C arány.

Példaként az átszámítási módszerre a bükkfát fogom bemutatni. A bükkfa átlagos karbon tartalma $A_C = 51,6\%$, a hidrogéntartalom $A_H = 6,3\%$, az oxigéntartalom pedig $A_O = 41,5\%$. A számításokat egy kilógramm mennyiségre végzem el.

Ismerjük a karbon, a hidrogén és az oxigén atom mol tömegét. Ezek sorra a következők: $m_C = 12,011g/mol$, $m_H = 1,00794g/mol$, $m_O = 15,9994g/mol$.

Ennek megfelelően a moláris anyagmennyiség:

$$a_C = \frac{1 \cdot A_C \cdot 10}{m_C} = \frac{1 \cdot 51,6 \cdot 10}{12,011} = 42,9606 \text{ mol}, \quad (5.2.)$$

$$a_H = \frac{1 \cdot A_H \cdot 10}{m_H} = \frac{1 \cdot 6,3 \cdot 10}{1,00794} = 62,5037 \text{ mol}, \quad (5.3.)$$

$$a_O = \frac{1 \cdot A_O \cdot 10}{m_O} = \frac{1 \cdot 41,5 \cdot 10}{15,9994} = 25,9385 \text{ mol}, \quad (5.4.)$$

ahol: az 1 mutatja, hogy egy kilogramm alapanyagot vizsgálok, a 10 pedig a váltószám, hogy a százalékban megadott összetételt kilógrammból grammra váltsam.

Az egy mólnyi karbon tartalomra vonatkoztatott hidrogén és oxigén mennyisége:

$$k = \frac{a_H}{a_C} = \frac{62,50037}{42,9606} = 1,45, \quad (5.5.)$$

$$l = \frac{a_O}{a_C} = \frac{25,9385}{42,9606} = 0,60. \quad (5.6.)$$

Ennek megfelelően a bükkfa fajlagos összetétele alapján a képlete $CH_{1,45}O_{0,60}$.

Néhány jellegzetes fafajta H/C és O/C arányát szemlélteti az 5.1. táblázat, amiket az elemi összetételek függvényében az ismertetett módon határoztam meg.

5.1. táblázat: Fafajták H/C és O/C aránya

| | Akác | Bükk | Energiafűz | Erdeifenyő | Juhar | Nyár | Tölgy |
|-----|------|------|------------|------------|-------|------|-------|
| H/C | 1,42 | 1,45 | 1,31 | 1,45 | 1,41 | 1,45 | 1,20 |
| O/C | 0,66 | 0,60 | 0,62 | 0,65 | 0,63 | 0,60 | 0,56 |

A kibővített modellegyenlet levegő gázosító közeg alkalmazása esetén a moláris anyagmegmaradás tétele alapján a következő módon írható fel [50]:

$$\begin{aligned} CH_k O_l + n_m \cdot H_2O + m \cdot O_2 + (3,76 \cdot m + a) \cdot N_2 \\ = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 \\ + x_7 \cdot NO + x_8 \cdot NO_2 + x_9 \cdot N_2 + x_{10} \cdot N_2O + x_i \cdot C_d H_f O_g, \end{aligned} \quad (5.7.)$$

ahol: n_m a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma; m a moláris oxigénigény; 3,76 a nitrogén és az oxigén aránya a levegőben, a a tüzelőanyag nitrogéntartalma, x_1 a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma, x_2 a szén-monoxidtartalma; x_3 a vízgőztartalma és x_4 a szén-dioxidtartalma; x_5 a metántartalom, x_6 a maradó oxigéntartalom, x_7 a nitrogén-monoxid, x_8 a nitrogén-dioxid tartalom, x_9 a nitrogéntartalom; x_{10} a dinitrogén-oxid-tartalom; x_i a keletkező egyéb összetevők moláris mennyisége a szintézisgázban (pl.: etilén, acetilén).

A száraz bükkfára vonatkozóan a modell alapegyenlete a következő módon írható fel:

$$\begin{aligned} CH_{1,45}O_{0,6} + 0 \cdot H_2O + m \cdot O_2 + (3,76 \cdot m + 0) \cdot N_2 \\ = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 \\ + x_7 \cdot NO + x_8 \cdot NO_2 + x_9 \cdot N_2 + x_{10} \cdot N_2O + x_j \cdot C_dH_fO_g, \end{aligned} \quad (5.8.)$$

ahol: m a moláris oxigénigény a légfelesleg tényező függvényében határozható meg, a keresett $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_j$ értékek a keletkező gázösszetevők moláris mennyisége a modellegyenlet megoldásával adódnak.

A paraméteres alapegyenletek megadása azért szükséges, mert ezeket felhasználva építettem fel a modellvizsgálatokat. A bemeneteli összetételek függvényében és a keletkező termékek ismeretében felírt, a jobb oldalon ismeretlen mennyiségeket tartalmazó egyenletek megoldására az egyensúlyi állandók módszerét választottam, amelyhez a Gaseq nevű szoftvert használtam.

Értelmezzük a légfelesleg tényezőt (λ):

$$\lambda = \frac{m}{m_{elméleti}}, \quad (5.9.)$$

ahol: $m_{elméleti}$ a tökéletes égéshez tartozó elméleti moláris oxigénigény.

A gázosító közeg változtatása során az egyenletbe egyéb összetevők is bekerülnek. Vízgőzzel történő gázosítás esetében hidrogén, szén-dioxiddal történő gázosítás során pedig további karbon rendszerbejuttatásával kell számolni.

A modellezés folyamata során arra az eredményre jutottam, hogy a nitrogén-oxidok, valamint a nagyobb rendszámú molekulák (főként szén-hidrogének) elhanyagolható mértékben keletkeznek, ezért a modellegyenlet egyszerűsíthető (5.10. képlet):

$$\begin{aligned} CH_kO_l + n_m \cdot H_2O + m \cdot O_2 + (3,76 \cdot m + a) \cdot N_2 \\ = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 \\ + (3,76 \cdot m + a) \cdot N_2. \end{aligned} \quad (5.10.)$$

Alkalmazzuk az egyensúlyi állandók módszerét, ehhez előbb írjuk fel minden egyes komponensre a moláris anyagmérleg egyenletet és ellenőrizzük, hogy teljesül-e a moláris anyagmegmaradás tétele (5.11.-5.15. összefüggések), majd határozzuk meg az egyensúlyi állandókat (5.14. és 5.15. képlet) [50, 69]:

$$\text{Karbon egyensúly} \quad 1 = x_2 + x_4 + x_5. \quad (5.11.)$$

$$\text{Hidrogén egyensúly} \quad k + 2 \cdot n_m = 2 \cdot x_1 + 2 \cdot x_3 + 4 \cdot x_5. \quad (5.12.)$$

$$\text{Oxigén egyensúly} \quad l + n_m + 2 \cdot m = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 + 2 \cdot x_6. \quad (5.13.)$$

$$\text{Víz-gáz reakció egyensúlyi} \quad K_1 = \frac{x_1 \cdot x_4}{x_2 \cdot x_3}. \quad (5.14.)$$

állandó

$$\begin{array}{l} \text{Metánképződés egyensúlyi} \\ \text{állandója} \end{array} \quad K_2 = \frac{x_5}{x_1^2}, \quad (5.15.)$$

ahol: K_1 és K_2 a víz-gáz és a metánképződés egyensúlyi állandók, amik függenek a hőmérséklettől és a nyomástól. Az egyenletrendszer megoldható analóg módon, valamint egy erre a célra készített szoftver felhasználásával is.

Vízgőzzel történő gázosítás esetében a modellegyenlet az alábbiak szerint módosul:

$$\begin{aligned} CH_kO_l + n_m \cdot H_2O + 2 \cdot m \cdot H_2O + a \cdot N_2 \\ = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 \\ + a \cdot N_2. \end{aligned} \quad (5.16.)$$

Az egyensúlyi egyenleteknél csak a hidrogén egyensúly módosul, úgy, ahogy azt az 5.17. összefüggés mutatja.

$$\text{Hidrogén egyensúly} \quad k + 2 \cdot n_m + 4 \cdot m = 2 \cdot x_1 + 2 \cdot x_3 + 4 \cdot x_5. \quad (5.17.)$$

Szén-dioxid és oxigén gázkeveréknél a modellegyenlet az alábbi alakban (5.18. képlet) írható fel:

$$\begin{aligned} CH_kO_l + n_m \cdot H_2O + m_1 \cdot CO_2 + m_2 \cdot O_2 + a \cdot N_2 \\ = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 \\ + a \cdot N_2. \end{aligned} \quad (5.18.)$$

Az egyensúlyi egyenleteknél a karbon és az oxigén egyensúly módosul (5.19-5.21. összefüggések):

$$\text{Moláris oxigénigény} \quad m = m_1 + m_2, \quad (5.19.)$$

$$\text{Karbon egyensúly} \quad 1 + m_1 = x_2 + x_4 + x_5, \quad (5.20.)$$

$$\begin{aligned} \text{Oxigén egyensúly} \quad l + n_m + 2 \cdot m_1 + 2 \cdot m_2 \\ = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 + 2 \cdot x_6. \end{aligned} \quad (5.21.)$$

Az egyenletek a gázosító közegek összetételének függvényében tovább variálhatók.

5.2. EGYENSÚLYI ÁLLANDÓK MÓDSZERE

A modellvizsgálatokat az egyensúlyi állandók módszerével, előre definiált elemi összetételű alapanyagra vonatkozóan (I. számú melléklet), rögzített hőmérséklet és üzemi nyomás mellett végeztem el (5.2. táblázat). Az egyensúlyi állandók módszere a megadott hőmérsékleten, az egyensúlyi átalakuláshoz tartozó számítás, a Gibbs- féle szabadenergia minimalizálásának elve alapján határozza meg, a vizsgált folyamatok során keletkező termékek összetételét [43]. Az elemzések elkészítéséhez a Gaseq nevű,

a NASA- módszeren alapuló szoftvert alkalmaztam, amit Chris Morley fejlesztett ki és mindenki számára térítésmentesen elérhető, valamint szabadon felhasználható. Elsősorban gázfázisú reagensek kölcsönhatását leíró egyenletek megoldására használható, de a termikus kezelési technológiák termokinetikai folyamatait is megfelelően szimulálja. Abban az esetben, ha az elméleti és az alkalmazott moláris oxigénigény aránya egyenlő egyel ($\lambda=1$), akkor visszakapjuk az égési egyenleteket.

A modellvizsgálatok arra irányulnak, hogy meghatározzam a keletkező gáztermék kémiai összetételét, amiből származtatni tudjuk a technológia, valamint az energetikai hatékonyságot jellemző tulajdonságokat és paramétereket. A modellvizsgálatokat az 5.2. táblázatban szereplő technológiákra és reakciókörülményekre vonatkozóan végeztem el.

5.2. táblázat: Vizsgált technológiák reakciókörülményei

| Eljárás | Hőmérséklet [°C] | Légfelesleg tényező | Üzemi nyomás [bar] | Segéd-áramok | Erőgép típusa |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--|
| Pirolízis | 500 | $\lambda = 0$ | $p = 1$ | - | Gázmotor és Gőzkazán ellennyomásos gőzturbinával |
| Gázosítás | 850 | $0,5 \leq \lambda \leq 0,7$ | $1 \leq p \leq 20$ | levegő | Gázmotor |
| Plazma-technológia | 3.000 | $\lambda = 0,5$ | $1 \leq p \leq 20$ | levegő | Gázmotor |
| Referencia: Hagyományos égetés | 850 | $\lambda = 1,5$ | $p = 1$ | levegő | Gőzkazán ellennyomásos gőzturbinával |

Az egyes keletkező termékek moláris mennyiségben kifejezett értékét az egyensúlyi mól számmal (x) jelöljük. Az egyensúlyi mól szám megmutatja, hogy a keletkező komponens milyen mennyiségben keletkezik a többi termékkomponenshez képest. A Gibbs- féle szabadenergia az egyensúlyi számok, a nyomás és a hőmérséklet függvényében az 5.22. képlet alapján írható fel [50, 70]:

$$\frac{G}{R \cdot T} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i \cdot G_i^0}{R \cdot T} + x_i \cdot \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + x_i \cdot \ln p \right), \quad (5.22.)$$

ahol: G a Gibbs-féle szabad energia, G_i^0 az i -edik alapanyag 1 mol anyagmennyiségre vonatkoztatott fajlagos szabadenergiája atmoszférikus nyomáson, R az egyetememes gázállandó, T a rendszer hőmérséklete, p a rendszer nyomása, x_i az i -edik komponens egyensúlyi mól száma, azaz az i -edik alapanyag anyagmennyisége a keverékben, n a kémiai elemek száma, $\sum x_i$ a végtermék egyensúlyi mól számainak összege, a keverék anyagmennyisége.

Termodinamikai egyensúlyi állapotban a $\frac{G}{R \cdot T}$ hányados minimalizálása a cél, amit az elemi összetétel határoz meg. Kezdetben az első elem j . Minden j -edik elemre igaznak kell lennie, hogy [70]:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot x_i - b_j = 0, \quad (5.23.)$$

ahol: b_j a j -edik elem atomjainak teljes moláris koncentrációja, a_{ij} a j -edik elem atomszáma az i -edik komponensre vonatkoztatva.

A $\frac{G}{R \cdot T}$ értékének a minimalizálását úgy kell végrehajtani, hogy figyelembe kell venni az 5.23. képletben szereplő feltétel okozta korlátot. Ehhez vezessük be a Lagrange-együtthatókat, azaz a λ_j -t, $j=m$ értéket vehet fel, ahol m a vegyületek száma. Vezessük be az F függvényt és írjuk fel 5.22. alapján a transzformált egyenletet a következő alakban [70]:

$$F = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \left(\frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p \right) - \sum_{j=1}^m \lambda_j \sum_{i=1}^n (a_{ij} \cdot x_i - b_j). \quad (5.24.)$$

A megoldáshoz szükség van az F függvény minimumára. A keresett megoldás előállítható, ha az F függvényt x_i szerint parciálisan deriváljuk. Az F függvény akkor veszi fel a minimális értékét, ha $\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$ [70].

Ennek megfelelően előállítható n db vegyületre és az m darab elemi összetevőre vonatkozó egyenlet, ahogy az 5.25. és az 5.26. képletek szemléltetik:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p + x_i \cdot \frac{\partial \ln x_i}{\partial x_i} - \sum_{k=1}^n x_k \cdot \frac{\partial \ln \sum x_i}{\partial x_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij}, \quad (5.25.)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij}. \quad (5.26.)$$

Ehhez tartozik n darab x_i ismeretlen anyagmennyiség és m darab λ_j Lagrange-féle együttható. Az egyenletek nem lineárisak x_i -re nézve, megoldásuk iteratív módon keresendő. Legyen x_i közelítő értéke y_i . Bővítsük ki a $\frac{\partial F}{\partial x_i}$ függvényt és fejtsük Taylor-sorba [70]:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \approx \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{x_i=y_i} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \right)_{x_i=y_i} \cdot (x_i - y_i). \quad (5.27.)$$

Az 5.27. összefüggéshez tartozó parciális deriváltak értékeit megkapjuk [70]:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_k \partial x_i} = -\frac{1}{\sum x_i} \quad \text{ha } i \neq k, \quad (5.28.)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_k \partial x_i} = \frac{1}{x_i} - \frac{1}{\sum x_i} \quad \text{ha } i = k, \quad (5.29.)$$

$$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial x_k \partial x_i} \right)_{x_i=y_i} = -\frac{1}{\sum y_i} \quad \text{ha } i \neq k, \quad (5.30.)$$

$$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial x_k \partial x_i} \right)_{x_i=y_i} = \frac{1}{y_i} - \frac{1}{\sum y_i} \quad \text{ha } i = k. \quad (5.31.)$$

Az 5.28.-5.31. összefüggéseket behelyettesítve az 5.27. egyenletbe adódik [70]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_i} \approx & \frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{y_i}{\sum y_i} + \ln p - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} + \frac{1}{y_i} \cdot (x_i - y_i) \\ & - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sum y_i} \cdot (x_i - y_i). \end{aligned} \quad (5.32.)$$

Egyszerűbb alakban felírva az 5.32. összefüggést, adódik [70]:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \approx \frac{h_i}{y_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} + \frac{x_i}{y_i} - \frac{\sum x_i}{\sum y_i}, \quad (5.33.)$$

ahol [70]:

$$h_i \equiv y_i \cdot \left(\frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p \right). \quad (5.34.)$$

A $\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$, azaz a minimum értékre állítva és átrendezve kapjuk, hogy [70]:

$$x_i = -h_i + y_i \cdot \left(\frac{\sum x_i}{\sum y_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} \right). \quad (5.35.)$$

Összegezve az összes anyagra adódik, hogy [70]:

$$\sum_{i=1}^n x_i = -\sum_{i=1}^n h_i + \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij}. \quad (5.36.)$$

Ebből kifejezve következik, hogy [70]:

$$\sum_{i=1}^n h_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} . \quad (5.37.)$$

Behelyettesítve az 5.35 képletbe az 5.23. képletet kapjuk a kifejezést [70]:

$$\sum_{i=1}^n (-a_{ij} \cdot h_i) + \frac{\sum x_i}{\sum y_i} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot a_{ij} \cdot y_i - b_j = 0 . \quad (5.38.)$$

Az 5.37. és az 5.38. egyenletek összesen $m + 1$ darab egyenletet jelentenek az ismeretlen λ_k és a $\frac{\sum x_i}{\sum y_i}$ értékekre nézve. Az egyenleteket megoldva, majd behelyettesítve az 5.35. egyenletbe, jobban közelítő becslést kapunk x_i -re. Amikor az egyensúlyi mól szám kicsi, akkor elhanyagolható mértékben járul hozzá $\sum x_i$ értékéhez. Ekkor az 5.25. egyenletet közvetlenül használhatjuk [70]:

$$x_i = \sum x_i \cdot \exp \left(\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} - \frac{G_i^0}{RT} - \ln p \right) . \quad (5.39.)$$

5.2.1. REAKCIÓKÉPES KÖZTI TERMÉKEK

Ha megfelelőek a reakciókörülmények, akkor a bimolekuláris (gyors) reakciók dominálnak. A termolekuláris (trimolekuláris) reakciók lassan játszódnak le, ezért az ő bekövetkezési valószínűségük kicsi. Amennyiben ez így van, akkor a mól szám állandó [70, 73].

Ez egy kiegészítő kényszerfeltételt képez:

$$\sum_{i=1}^n x_i = n_{tm} , \quad (5.40.)$$

ahol: n_{tm} a teljes mól szám. Ennek megfelelően az 5.24. egyenlet a következő alakban írható fel [70]:

$$F = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \left(\frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p \right) - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^n (a_{ij} \cdot x_i - b_i) - \lambda_s \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i - n_{tm} \right) . \quad (5.41.)$$

A levezetés az előzőeknek megfelelően, a következő [70]:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{G_i^0}{R \cdot T} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} - \lambda_s = 0, \quad (5.42.)$$

$$x_i = -h_i + y_i \cdot \left(\frac{\sum x_i}{\sum y_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot a_{ij} + \lambda_s \right), \quad (5.43.)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (-a_{ij} \cdot h_i + \sum_{\text{rögzített}} a_{ij} \cdot x_i + \frac{\sum x_i}{\sum y_i} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij}, \\ + \lambda_s \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} + \sum_{j=1}^m \lambda_k \cdot \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot a_{ij} \cdot y_i - b_j = 0. \end{aligned} \quad (5.44.)$$

Vegyük $\frac{\sum x}{\sum y} = 1 - nek$, ekkor

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot h_i - \sum_{\text{rögzített}} a_{ij} \cdot x_i \\ - \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} + b_j = \lambda_s \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} + \sum_{j=1}^m \lambda_k \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot a_{ij} \cdot y_i. \end{aligned} \quad (5.45.)$$

Behelyettesítve az eredeti egyenletbe [70]:

$$\sum_{i=1}^n h_i + n - \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_{ij} + \lambda_s \cdot \sum_{i=1}^n y_i. \quad (5.46.)$$

Végül oldjuk meg az egyenleteket n-re nézve.

Adiabaticus állapotváltozás során a gázkeverék hőmérsékletét addig állítjuk, amíg az egyensúlyi összetétel entalpiája (vagy a belső energiája állandó térfogaton) meg nem egyezik a reagensek entalpiájával [70].

5.3. A MODELLEGYENLETEK SZOFTVERES MEGOLDÁSA

A modellvizsgálatok során a modellegyenletek megoldására a Gaseq szoftverben az állandó nyomáson és hőmérsékleten vett egyensúlyi állandók módszerét alkalmaztam. A szoftver kémiai egyensúlyi folyamatok elemzése céljából fejlesztették ki, így használata megfelelő a termikus kezelési technológiák vizsgálatára. A kezelési folyamatok szimulálásával megfigyelhettem, hogy a bemenő paraméterek változtatása hogyan befolyásolja az egyes technológiák alkalmazása során keletkező gáztermék összetételét.

A modellezés kiinduló lépéseként meg kell adni az összetételnél az alapanyagot felépítő molekulát, ezt követően a keletkező termék összetevőinek listáját, valamint az üzemi nyomást és a hőmérsékletet. Legideálisabb a biomasszát felépítő cellulóz molekula lenne, de ezt a vegyületet a program nem tartalmazza, ezért kerestem a tüzelő anyag listában egy, a cellulózhoz hasonló vegyületet. A fenolt (C_6H_5OH) választottam ki erre a célra, ami egy aromás szerkezetű, kristályos szilárd anyag.

Mivel a fenol molekula nem tartalmaz elegendő oxigén- és hidrogénmennyiséget, ezért szükséges volt korrekciót alkalmazni, hogy megfelelő legyen a kémiai összetétel. Ezen kívül a valóságos tüzelőanyagoknak van nedvességtartalma is, így annak a hozzászámítása is elengedhetetlen volt. A korrekcióhoz készítettem egy MathCad fájlt, amit a *II. számú melléklet* tartalmaz. Az így kiszámított összetétel már helyes közelítése a valóságos biomassza anyagának. A fenoltartalom teljes mértékben magában foglalja a szénmennyiséget, ennek megfelelően a hidrogénmennyiséget kisebb, az oxigénét viszont nagyobb mértékben kell módosítani, külön hozzáadni a modellben. Az így kapott mennyiségeket vittem be input oldalon a Gaseq szoftverbe.

A *III. számú melléklet* példaként szemlélteti a három vizsgált technológiára vonatkozó Gaseq-ben felépített modellt, valamint az „1” jelű elemi összetétellel rendelkező 1 kg biomasszára vonatkozó eredményeket. A többi 45 biomassza kategória esetében ugyan ezeket az értékeket határoztam meg, amelyek alapjául szolgáltak az energetikai hatékonyságvizsgálatoknak.

6. ENERGETIKAI HATÉKONYSÁG-VIZSGÁLATOK

Az energiahatékonyság napjaink egyik kulcsfontosságú kérdése. A fejlett országokban a politika szintjén nap, mint nap felmerül. Az energiahatékonysági politika szorosan kapcsolódik a kereskedelmi, az ipari versenyképesség, valamint az energiabiztonsági tevékenységekhez, de egyre fontosabbá vált a környezetvédelmi előnyök, mint a szén-dioxid kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések egyik alapeszköze [31]. A hatékony energiatermelés- és felhasználás hozzájárul a fenntartható fejlődéshez, ami a Burtland- és a Stockholmi Egyezmények egyik alappillére [37].

Az energia átalakításának hatékonyságára számos hagyományos és nem konvencionális mérőszám ismert és alkalmazhatott. A leggyakrabban meghatározásra kerülő jelzőszámok megnevezését, jelét és mértékegységét a 6.1. és a 6.2. táblázat tartalmazza.

6.1. táblázat: Energetikai hatékonyságot leíró mérőszámok

| Megnevezés | Jele | Mértékegysége |
|--|--|--|
| Reakció-, vagy kémiaihatások | η_r | -; % |
| Égési hatásfok | η_ϵ | -; % |
| Erőgéphatásfok villamos, termikus össz | η_{egv} η_{egth} η_{eg} | -; % |
| Energiakonverziós hatásfok villamos termikus össz | η_{ekv} η_{ekth} η_{ek} | -; % |
| Fajlagos energiakihozatal | e_k | MJ/kg _{tüzelőanyag} |
| Fajlagos gáztermelés | k_{gt} | kg _{gáz} /kg _{tüzelőanyag} |

6.2. táblázat: *Energiasűrűség változást leíró mérőszámok*

| Megnevezés | Jele | Mértékegysége |
|---|--|---------------|
| Abszolút energiasűrűség változás villamos termikus összesített | Δe_{av} Δe_{ath} Δe_{ak} | -; % |
| Relatív energiasűrűség változás villamos termikus összesített | Δe_{rv} Δe_{rth} Δe_{rk} | -; % |

A reakció-, vagy más néven a kémiai hatások megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiataralmának mekkora része jelenik meg az előállított gáztermékben (6.1.) [52, 53]. A reakció hatásfok ismeretében meghatározható az égetés tökéletességét jellemző paraméter. Számítási módszerét a 6.2. képlet mutatja. Ezek alapján:

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}}, \quad (6.1.)$$

$$\eta_e = 1 - \eta_r, \quad (6.2.)$$

ahol: η_r a reakció hatásfok, \dot{m}_{gt} a gáztermék tömegárama, és F_{gt} a gáztermék fűtőértéke, \dot{m}_{szt} a szilárd tüzelőanyag tömegárama és F_{szt} a tüzelőanyag fűtőértéke.

Az erőgép hatásfoka megmutatja, hogy a gáz halmazállapotú tüzelőanyaggal bevitt hőenergia mekkora része alakul át hasznos energiává. A hasznos energia továbbosztható villamos és hőenergiára [41, 53]. Az összefüggések sorra adódnak:

$$\eta_{eg} = \frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (6.3.)$$

$$\eta_{egv} = \frac{P_v}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (6.4.)$$

$$\eta_{egth} = \frac{P_{th}}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (6.5.)$$

$$\eta_{eg} = \eta_{egv} + \eta_{egth} \leq 1, \quad (6.6.)$$

ahol: η_{eg} az erőgép eredő nettó hatásfoka, P_v az erőgép által leadott nettó villamos teljesítmény, P_{th} az erőgép által leadott nettó termikus teljesítmény, η_{egv} az erőgép nettó villamos hatásfoka, η_{egth} az erőgép nettó termikus hatásfoka.

A fajlagos energiakihozatal megmutatja, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkoztatva, mekkora energiamennyiség állítható elő. Felhasználásával közvetlenül számítható az eredő energiakonverziós hatásfok.

A fajlagos energiakihozatal

$$e_k = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt}} = \eta_r \cdot F_{szt}, \quad (6.7.)$$

összefüggéssel írható fel, ahol: e_k a fajlagos energiakihozatal.

Energetikai szempontból van egy lényeges technológiai paraméter, a fajlagos gáztermelés, amely megmutatja, hogy egy kg tüzelőanyagból (a segédgázokat is figyelembe véve) hány kg gáztermék állítható elő [9]. A fajlagos gáztermelés:

$$k_{gt} = \frac{\dot{m}_{gt}}{\dot{m}_{szt}}, \quad (6.8.)$$

ahol: k_{gt} a fajlagos gáztermelés.

Pirolízis esetében a gáztermék mellett éghető piroolaj és pirokoks is keletkezik, amikre vonatkozóan szintén meghatározható a fajlagos pirokoks kihozatal (k_{pk}), és a fajlagos piroolaj kihozatal (k_{po}) mértéke. A fajlagos kihozatalok összege egyet ad.

Az energiakonverziós hatások megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiataartalmának mekkora része hasznosult villamos és hőenergia formájában [31]. E jelzőszám mutatja meg, hogy egy kg szilárd tüzelőanyag mekkora hatásokkal alakítható át energiává. Az energiakonverziós hatások felírható külön-külön alakban a villamos- és a hőenergiára vonatkozóan is:

$$\eta_{ek} = \frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} = \frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{szt} \cdot e_k} = \eta_r \cdot \eta_{eg}, \quad (6.9.)$$

$$\eta_{ekv} = \frac{P_v}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} = \eta_r \cdot \eta_{egv}, \quad (6.10.)$$

$$\eta_{ekth} = \frac{P_{th}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} = \eta_r \cdot \eta_{egth}, \quad (6.11.)$$

$$\eta_{ek} = \eta_{ekv} + \eta_{ekth} \leq \eta_{eg}, \quad (6.12.)$$

ahol: η_{ek} a nettó erdő energiakonverziós hatások, η_{ekv} a nettó villamosenergiakonverziós hatások, η_{ekth} a nettó hőenergia-konverziós hatások.

Az energiasűrűség változás mértékének meghatározására kétféle vonatkoztatási alapot is alkalmazhatunk. Az abszolút energiasűrűség változás megmutatja, hogyan változik az energia kihozatal a segédáramok, valamint a technológia reakciókörülményeinek a változtatása következtében. A relatív mutató pedig a hagyományos égetéshez viszonyítva számszerűsíti az egyes technológiák jóságát. Villamos-energetikai szemszögből a villamos energiatermelés a kulcsfontosságú, ezért ennél a kategóriánál célszerű külön is értelmezni az energiasűrűség változást.

E mutatók sorra a következők:

$$\Delta e_{ak} = \frac{e'_k}{e_k}, \quad (6.13.)$$

$$\Delta e_{av} = \frac{e'_k}{e_k} \cdot \eta_{egv}, \quad (6.14.)$$

$$\Delta e_{ath} = \frac{e'_k}{e_k} \cdot \eta_{egth}, \quad (6.15.)$$

$$\Delta e_{rk} = \frac{e_{ktechnológia}}{e_{kégetés}}, \quad (6.16.)$$

$$\Delta e_{rv} = \frac{e_{ktechnológia}}{e_{kégetés}} \cdot \eta_{egv}, \quad (6.17.)$$

$$\Delta e_{rth} = \frac{e_{ktechnológia}}{e_{kégetés}} \cdot \eta_{egth}, \quad (6.18.)$$

ahol: Δe_{ak} az abszolút energiasűrűség változás, e'_k a (gázosító közeg cseréje, vagy a megváltoztatott technológiai paraméterek által okozott) módosult fajlagos energia-kihozatal, Δe_{av} az abszolút villamosenergia-sűrűségváltozás nettó mértéke, Δe_{ath} az abszolút hőenergia-sűrűségváltozás nettó mértéke, Δe_{rk} a relatív energiasűrűség változás, $e_{ktechnológia}$ a vizsgált technológia fajlagos energia kihozatala, $e_{kégetés}$ a hagyományos égetés fajlagos energia kihozatal, Δe_{rv} a relatív villamosenergia-sűrűségváltozás nettó mértéke, Δe_{rth} a relatív hőenergia-sűrűségváltozás nettó mértéke.

A további energiahatékonysági vizsgálatokat, a szoftveres szimulációk eredményeire támaszkodva, a fajlagos energiakihozatalra, a reakció hatásfokára, valamint a fajlagos fagázstermelésre vonatkozóan végeztem el. Az így kapott eredményeket hatékonyságtérképeken ábrázoltam.

6.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZÁK HATÉKONYSÁGTÉRKÉPEI

A fás szárú biomasszák kémiai összetétele alapján készítettem egy összefoglaló táblázatot (6.3. táblázat), ami a H/C és az O/C arányok alapján tartalmazza az egyes fajtákat. Összesen 46 kategóriát különíttem el, ami jellemzően lefedi az ismert fafajtákat, valamint a fahulladékokat [9]. Megfigyelhető, hogy nem létezik olyan fás szárú biomassza, amely 1,15–1,20 H/C arány mellett 0,40 vagy 0,65 O/C aránnyal rendelkezik [10]. A feltüntetett arányok alapján elkészítettem az elemzéseket, pirolízisre, gázosításra, valamint plazmatechnológiára vonatkozóan, az említett reakciókörülmények mellett, változó nedvességtartalom esetében. A kapott eredményeket a következő alfejezetekben részletezem. A további számítások megkönnyítése érdekében a 6.4. táblázatban részletezem az adott fajlagos összetételű biomasszák alsó fűtőértékét MJ/kg mértékegységben, a száraz bázisra vonatkoztatva. A nedvességtartalom fűtőértékre gyakorolt hatá-

sa a 6.5. táblázat alapján vehető figyelembe, MJ/kg mértékegységben 10%-os nedvességtartalom növekedés esetén.

6.3. táblázat: Fás szárú biomasszák H/C és O/C kategóriái [-]

| H/C arány | O/C arány | O/C arány | O/C arány | O/C arány | O/C arány | O/C arány |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,15 | - | 0,45 | 0,50 | 0,55 | - | - |
| 1,20 | - | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | - |
| 1,25 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | - |
| 1,30 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,40 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,45 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,50 | - | - | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,55 | - | - | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,60 | 0,65 |

6.4. táblázat: Fás szárú biomasszák fűtőértéke a száraz bázisra nézve, F_{sz} [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | 14,7069 | 14,0940 | 13,9320 | - | - |
| 1,20 | - | 14,7150 | 14,0400 | 13,5945 | 13,2300 | - |
| 1,25 | 14,9040 | 14,6205 | 13,7700 | 13,3920 | 12,8790 | - |
| 1,30 | 14,8500 | 14,4180 | 13,6350 | 13,1112 | 12,6495 | 12,0960 |
| 1,35 | 14,7231 | 14,1291 | 13,4136 | 12,9276 | 12,1230 | 11,8530 |
| 1,40 | 14,4423 | 13,9185 | 13,2300 | 12,6360 | 12,0690 | 11,7450 |
| 1,45 | 14,2884 | 13,6080 | 12,9600 | 12,3255 | 11,7990 | 11,5020 |
| 1,50 | - | - | 12,6900 | 12,1230 | 11,5965 | 11,0430 |
| 1,55 | - | - | 12,4740 | 11,9070 | 11,2320 | 11,0160 |
| 1,60 | - | - | - | - | 11,0700 | 10,8810 |

6.5. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fás szárú biomasszák fűtőértékére, ΔF_{sz} [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | -1,4707 | -1,4094 | -1,3932 | - | - |
| 1,20 | - | -1,4715 | -1,4040 | -1,3595 | -1,3230 | - |
| 1,25 | -1,4904 | -1,4621 | -1,3770 | -1,3392 | -1,2879 | - |
| 1,30 | -1,4850 | -1,4418 | -1,3635 | -1,3111 | -1,2650 | -1,2096 |
| 1,35 | -1,4723 | -1,4129 | -1,3414 | -1,2928 | -1,2123 | -1,1853 |
| 1,40 | -1,4442 | -1,3919 | -1,3230 | -1,2636 | -1,2069 | -1,1745 |
| 1,45 | -1,4288 | -1,3608 | -1,2960 | -1,2326 | -1,1799 | -1,1502 |
| 1,50 | - | - | -1,2690 | -1,2123 | -1,1597 | -1,1043 |
| 1,55 | - | - | -1,2474 | -1,1907 | -1,1232 | -1,1016 |
| 1,60 | - | - | - | - | -1,1070 | -1,0881 |

6.1.1. PIROLÍZIS HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI

A 46 fás szárú biomassza kategóriákra vonatkozóan elsőként a pirolízist vizsgáltam folyamatos üzemben. A reakció hőmérsékletet 500 °C-ra választottam és segédgázt nem alkalmaztam. Az üzemi nyomás 1 bar. Az ismertetésre kerülő hatékonyságtérképek e reakciókörülményekre vonatkoznak. A felállított modell és az így kapott eredmények maximum 35%-os nedvességtartalmú fás szárú biomasszára alkalmazható. A modellezés folyamata során a száraz fa és a 35%-os nedvességtartalom közötti tartományában a nedvesség hatása lineáris függvénnyel írható le. 35%-nál nagyobb nedvességtartalom esetében a linearizált modell nem alkalmazható. Nagyobb nedvességtartalom esetében a modell 100%-nál nagyobb kémiai hatásfokot eredményez. Az energetikai hatékonyságot jellemző paraméterek közül, kiindulásként a fajlagos energiakihozatalt határoztam meg az előállított pirolízis gáz kémiai összetétele alapján (6.6. táblázat). Az eredményeket táblázatból történő kiolvashatóságát, a hatékonyságtérképek alkalmazását három példán keresztül mutatom be, amelyek a III. számú mellékletben találhatóak.

A fajlagos energiakihozatal tekintetében (6.6. táblázat) megfigyelhető, hogy az alapanyag H/C arányának növekedése nagyobb fajlagos energiakihozatalt eredményez. Az O/C aránynál fordított tendencia figyelhető meg.

6.6. táblázat: Fajlagos energia kihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 5,0557 | 4,6962 | 4,6143 | - | - |
| 1,20 | - | 5,3548 | 4,9392 | 4,6350 | 4,4128 | - |
| 1,25 | 5,7804 | 5,5874 | 4,9653 | 4,7949 | 4,4936 | - |
| 1,30 | 6,0386 | 5,7008 | 5,1989 | 4,8707 | 4,5893 | 4,1822 |
| 1,35 | 6,2317 | 5,8263 | 5,3213 | 5,0088 | 4,5337 | 4,3322 |
| 1,40 | 6,2237 | 5,9501 | 5,4605 | 5,0723 | 4,7053 | 4,4967 |
| 1,45 | 6,4525 | 5,9798 | 5,5505 | 5,0955 | 4,7363 | 4,4724 |
| 1,50 | - | - | 5,5769 | 5,1337 | 4,8342 | 4,4310 |
| 1,55 | - | - | 5,6990 | 5,2298 | 4,7961 | 4,5427 |
| 1,60 | - | - | - | - | 4,8978 | 4,7612 |

A nedvességtartalom fajlagos energiakihozatalra gyakorolt hatását a 6.7. táblázatból olvashatjuk le, amely 10%-os nedvességtartalom növekedésre vonatkozik. Látható, hogy a növekvő nedvességtartalom pirolízis alkalmazása során pozitív irányban befolyásolja a fajlagos energiakihozatalt. Ugyan ez a tendencia jellemző a pirolízis reakció hatásfokának alakulására is (6.8. és 6.9. táblázat).

6.7. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energia kihozatalra pirolízis esetében, Δe_k [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,5436 | 0,5796 | 0,5875 | - | - |
| 1,20 | - | 0,5129 | 0,5553 | 0,5849 | 0,6069 | - |
| 1,25 | 0,4696 | 0,4896 | 0,5528 | 0,5702 | 0,5990 | - |
| 1,30 | 0,4423 | 0,4778 | 0,5294 | 0,5623 | 0,5892 | 0,6274 |
| 1,35 | 0,4223 | 0,4655 | 0,6145 | 0,5485 | 0,5942 | 0,6131 |
| 1,40 | 0,4236 | 0,4528 | 0,5029 | 0,5417 | 0,5774 | 0,5971 |
| 1,45 | 0,4003 | 0,4497 | 0,4942 | 0,5388 | 0,5739 | 0,5986 |
| 1,50 | - | - | 0,4914 | 0,5353 | 0,5647 | 0,6024 |
| 1,55 | - | - | 0,4795 | 0,5264 | 0,5676 | 0,5914 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,5581 | 0,5709 |

6.8. táblázat: A pirolízis reakció hatásfoka, Γ_r [%]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 34,38% | 33,32% | 33,12% | - | - |
| 1,20 | - | 36,39% | 35,18% | 34,09% | 33,35% | - |
| 1,25 | 38,78% | 38,22% | 36,06% | 35,80% | 34,89% | - |
| 1,30 | 40,66% | 39,54% | 38,13% | 37,15% | 36,28% | 34,58% |
| 1,35 | 42,33% | 41,24% | 39,67% | 38,75% | 37,40% | 36,55% |
| 1,40 | 43,09% | 42,75% | 41,27% | 40,14% | 38,99% | 38,29% |
| 1,45 | 45,16% | 43,94% | 42,83% | 41,34% | 40,14% | 38,88% |
| 1,50 | - | - | 43,95% | 42,35% | 41,69% | 40,13% |
| 1,55 | - | - | 45,69% | 43,92% | 42,70% | 41,24% |
| 1,60 | - | - | - | - | 44,24% | 43,76% |

6.9. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis reakció hatásfokára, $\Delta\Gamma_r$ [%]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 12,91% | 13,47% | 13,63% | - | - |
| 1,20 | - | 12,89% | 13,52% | 13,96% | 14,34% | - |
| 1,25 | 14,41% | 12,97% | 13,79% | 14,18% | 14,73% | - |
| 1,30 | 12,74% | 13,15% | 13,93% | 14,48% | 14,99% | 15,63% |
| 1,35 | 12,84% | 13,42% | 15,01% | 14,69% | 15,63% | 15,97% |
| 1,40 | 13,10% | 13,62% | 14,35% | 15,02% | 15,71% | 16,12% |
| 1,45 | 13,23% | 13,93% | 14,65% | 15,40% | 16,06% | 16,45% |
| 1,50 | - | - | 14,96% | 15,66% | 16,35% | 17,12% |
| 1,55 | - | - | 15,23% | 15,95% | 16,87% | 17,17% |
| 1,60 | - | - | - | - | 17,12% | 17,41% |

A fajlagos fagáztermelésnél eltérő hatás figyelhető meg (6.10. táblázat). Ennél a kategóriánál mind a H/C, mind az O/C arány növekedése nagyobb fajlagos gáztermelést eredményez. A növekvő nedvességtartalom hatására nagyobb a fajlagos gáztermelés (6.11. táblázat), azonban itt a H/C és az O/C aránypárok fordítottan arányosak.

6.10. táblázat: Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,1652 | 0,2200 | 0,2348 | - | - |
| 1,20 | - | 0,1671 | 0,2268 | 0,2668 | 0,3002 | - |
| 1,25 | 0,1538 | 0,1781 | 0,2523 | 0,2868 | 0,3339 | - |
| 1,30 | 0,1616 | 0,1980 | 0,2667 | 0,3138 | 0,3561 | 0,4076 |
| 1,35 | 0,1754 | 0,2261 | 0,2884 | 0,3320 | 0,4060 | 0,4312 |
| 1,40 | 0,2012 | 0,2468 | 0,3067 | 0,3599 | 0,4117 | 0,4419 |
| 1,45 | 0,2180 | 0,2759 | 0,3327 | 0,3893 | 0,4375 | 0,4650 |
| 1,50 | - | - | 0,3582 | 0,4087 | 0,4572 | 0,5089 |
| 1,55 | - | - | 0,3794 | 0,4296 | 0,4917 | 0,5117 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,5075 | 0,5251 |

6.11. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis fajlagos fagáztermelésére,

$$\Delta k_{gt} [kg_{gáz}/kg_{fa}]$$

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,1438 | 0,1384 | 0,1369 | - | - |
| 1,20 | - | 0,1436 | 0,1377 | 0,1337 | 0,1303 | - |
| 1,25 | 0,1448 | 0,1425 | 0,1351 | 0,1317 | 0,1269 | - |
| 1,30 | 0,1440 | 0,1405 | 0,1337 | 0,1290 | 0,1247 | 0,1194 |
| 1,35 | 0,1426 | 0,1377 | 0,1335 | 0,1272 | 0,1196 | 0,1171 |
| 1,40 | 0,1400 | 0,1356 | 0,1297 | 0,1244 | 0,1191 | 0,1160 |
| 1,45 | 0,1383 | 0,1327 | 0,1271 | 0,1214 | 0,1165 | 0,1137 |
| 1,50 | - | - | 0,1245 | 0,1195 | 0,1146 | 0,1092 |
| 1,55 | - | - | 0,1224 | 0,1174 | 0,1111 | 0,1090 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,1095 | 0,1077 |

Mivel a pirolízis az oxigén kizárása mellett lejátszódó hőbontási folyamat, ezért éghető gázterméken (pirogáz) kívül szilárd fázisban éghető maradékanyag, névszerint pirolízis kokszt keletkezik. A pirokokszt keletkezése a gázképződéssel fordítottan arányos. A 6.12. táblázatból látható, hogy az alapanyag H/C és O/C arányának növekedése csökkenti a fajlagos kokszttermelést. A növekvő nedvességtartalom pedig a gázképződésnek kedvez, így kokszttermelésnél negatív előjel figyelhető meg. A keletkező fajlagos pirolízis olaj mennyisége azon elv szerint határozható meg, hogy a keletkező fajlagos gáz-, kokszt- és olajtermékek összege egységnyi értéket képvisel.

6.12. táblázat: Fajlagos kokszttermelés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [kg_{kocsz}/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,4084 | 0,3810 | 0,3736 | - | - |
| 1,20 | - | 0,4074 | 0,3776 | 0,3576 | 0,3409 | - |
| 1,25 | 0,4141 | 0,4019 | 0,3648 | 0,3476 | 0,3241 | - |
| 1,30 | 0,4102 | 0,3920 | 0,3576 | 0,3341 | 0,3130 | 0,2872 |
| 1,35 | 0,4033 | 0,3780 | 0,3468 | 0,3250 | 0,2880 | 0,2754 |
| 1,40 | 0,3904 | 0,3676 | 0,3377 | 0,3111 | 0,2851 | 0,2701 |
| 1,45 | 0,3820 | 0,3530 | 0,3247 | 0,2963 | 0,2722 | 0,2585 |
| 1,50 | - | - | 0,3119 | 0,2867 | 0,2624 | 0,2366 |
| 1,55 | - | - | 0,3013 | 0,2762 | 0,2451 | 0,2352 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,2373 | 0,2285 |

6.13. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízis fajlagos kokszttermelésére, Δk_{pk} [kg_{kocsz}/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | -0,0714 | -0,0687 | -0,0679 | - | - |
| 1,20 | - | -0,0713 | -0,0683 | -0,0663 | -0,0646 | - |
| 1,25 | -0,0719 | -0,0707 | -0,0671 | -0,0653 | -0,0630 | - |
| 1,30 | -0,0715 | -0,0697 | -0,0663 | -0,0640 | -0,0618 | -0,0592 |
| 1,35 | -0,0708 | -0,0683 | -0,0658 | -0,0631 | -0,0593 | -0,0580 |
| 1,40 | -0,0695 | -0,0673 | -0,0643 | -0,0617 | -0,0591 | -0,0575 |
| 1,45 | -0,0687 | -0,0658 | -0,0630 | -0,0602 | -0,0578 | -0,0563 |
| 1,50 | - | - | -0,0618 | -0,0592 | -0,0568 | -0,0541 |
| 1,55 | - | - | -0,0607 | -0,0582 | -0,0550 | -0,0540 |
| 1,60 | - | - | - | - | -0,0542 | -0,0533 |

A 6.14. táblázat példaként mutatja három hazai fafajta pirolizálására vonatkozó eredményeket különböző nedvességtartalom mellett.

6.14. táblázat: Összefoglaló táblázat egyes fafajták pirolizálására vonatkozóan

| Fafajta | Nedvességtartalom [%] | e_k [MJ/kg _{fa}] | η_r [%] | k_{gt} [kg _{gt} /kg _{fa}] | k_{pk} [kg _{pk} /kg _{fa}] |
|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------|--|--|
| Bükkfa | 0 | 4,7363 | 40,14 | 0,4375 | 0,4074 |
| Bükkfa | 20 | 5,8841 | 72,26 | 0,6705 | 0,2648 |
| Tölgyfa | 0 | 4,5906 | 33,98 | 0,2735 | 0,3543 |
| Tölgyfa | 23 | 4,6007 | 66,78 | 0,5794 | 0,2011 |
| Energia fűz | 0 | 4,4032 | 35,89 | 0,3846 | 0,2988 |
| Energia fűz | 15 | 5,3056 | 59,79 | 0,5673 | 0,2082 |

A fás szárú biomassza pirolízissel történő hasznosítás során a nedvességtartalom növekedése a fajlagos energiakihozatalt (6.7. táblázat), a kémiai hatásfokot (6.9. táblázat) és a fajlagos fagázstermelést (6.11. táblázat) pozitív irányba változtatja. A nagyobb nedvességtartalom nagyobb energiataralmú és mennyiségű fagázt eredményez. A pirolízis olaj és a pirokoks mennyisége a nedvességtartalommal fordított arányban áll.

6.1.2. GÁZOSÍTÁS HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI

Második technológiaként a gázosítást vizsgáltam. A modellvizsgálatokat 600 és 850 °C gázosítási hőmérséklettartományban 50 °C lépésközönként; a légfelesleg tényezőt 0,5 és 0,8 között, 0,05 lépésenként választva; 1 és 20 bar üzemi nyomás értéktartományban 1 bar lépésekkel; levegő segédgáz alkalmazásával végeztem el. Adott légfelesleg tényezőnél a nyomás növelésének hatására a fajlagos energia kihozatal és a kémiai hatásfok is lineárisan, szigorúan monoton csökken, a csökkenés mértéke 20 bar mellett, $\lambda=0,5$ légfelesleg tényezőnél 3,05%-ot, $\lambda=0,6$ -nál 1,14%-ot, $\lambda=0,7$ -nél 0,38%-ot képvisel. A légfelesleg növelése adott nyomáson egyre kisebb mértékben növeli a fajlagos energiakihozatalt, a csökkenés exponenciális jellegű. 20 bar nyomás mellett a légfelesleg tényező hatását a 6.19. képlet értelmezi:

$$\Delta e_{kfa\ 20bar}(\lambda) = 567,39 \cdot e^{-10,41 \cdot \lambda}. \quad (6.19.)$$

A hőmérséklet növelésével az előállított fagáz fajlagos energiataralma és mennyisége a vizsgált 46 biomassza kategóriában rendre 850 °C hőmérsékletig elérte a maximumot (800–850 °C között). A hőmérséklet további növelése nem eredményezett számottevő javulást, ezért a végeredményeket 850 °C hőmérsékleten, egy bar üzemi nyomáson, 0% nedvességtartalom és 0 légfelesleg tényező mellett rögzítettem. A légfelesleg tényező növelése a fajlagos energia kihozatalt csökkentette, a fajlagos nyers fagázstermelést növelte [71].

A légfelesleg tényező értéke a gázosítási folyamat önfenntarthatóságát befolyásolja. Célszerűen olyan értéken kell tartani, ami alkalmazása mellett a reaktor sugárzási és egyéb veszteségeit is figyelembe véve, külső energia bevitelt vagy hőelvonást ne igényeljen. A nedvességtartalom és a légfelesleg tényező hatása az energetikai hatékonyságot jellemző paraméterekre nézve kétváltozós lineáris függvényekkel írhatók le. A linearizált modell értelmezési tartománya 0%-tól 40%-os nedvességtartalomig terjed.

A maximális légfelesleg tényező értéke 0,8; ennél nagyobb légfelesleg mellett az égés a jellemző folyamat, ami ez által torzítja az eredményeket, jellemzően alulbecsüli a keletkező gáz energiataralmát.

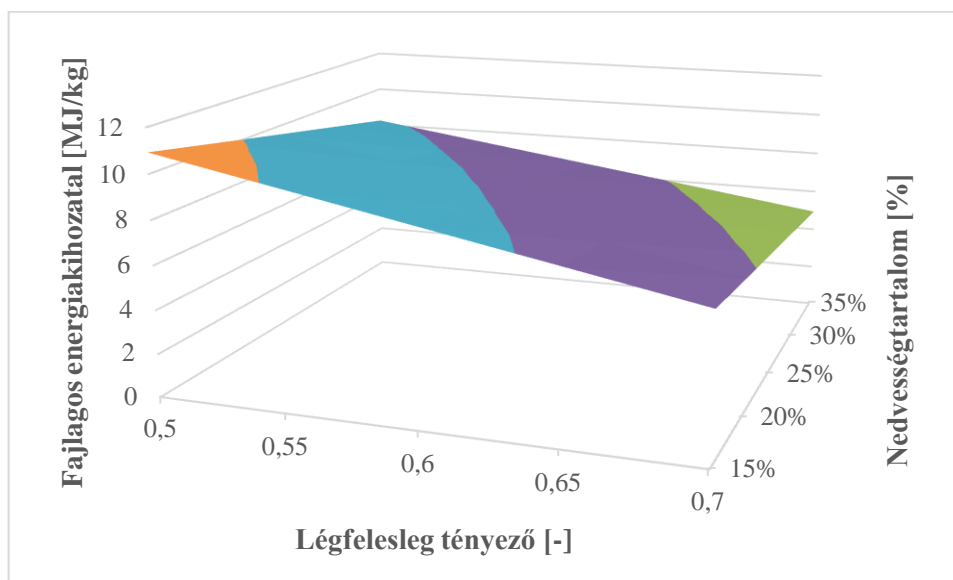
A fajlagos energia kihozatal, a nedvességtartalom és a légfelesleg tényező függvényében a 6.20. képlet alkalmazásával határozható meg:

$$e_{kn\lambda}(n, \lambda) = (K_e - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k, \quad (6.20.)$$

ahol: K_e a fajlagos energia kihozatali konstans, K_k a korrekciós tényező, amely értéke a 6.15. táblázatból határozható meg.

Az összefüggés alapján elmondható, hogy a nagyobb nedvességtartalmú alapanyag és a nagyobb légfesleg tényezővel üzemeltetett gázosítás csökkenti a keletkező gáztermék fajlagos energiakihozatalát [72].

A fajlagos energiakihozatal légfesleg tényezőtől és az alapanyag nedvességtartalmától való függését a 6.1. ábra szemlélteti az „1” jelű elemi összetételű biomasszára vonatkozóan.



6.1. ábra: Fajlagos energiakihozatal függése a légfeszleg tényezőtől és az alapanyag nedvességtartalmától az „1” jelű elemi összetételű biomasszára vonatkozóan

6.15. táblázat: Fajlagos energia kihozatali konstans gázosításnál, K_e [MJ/kg]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | 20,1924 | 19,7698 | 19,5403 | - | - |
| 1,20 | - | 20,6087 | 20,0323 | 19,5009 | 19,3948 | - |
| 1,25 | 20,3530 | 20,7888 | 19,6870 | 19,6412 | 19,2970 | - |
| 1,30 | 20,6211 | 20,6715 | 19,7770 | 19,5336 | 19,3515 | 18,8999 |
| 1,35 | 20,7145 | 20,4048 | 19,6100 | 19,4839 | 18,9780 | 18,8376 |
| 1,40 | 20,3820 | 20,2760 | 19,5828 | 19,3661 | 18,9770 | 18,8044 |
| 1,45 | 20,4528 | 19,8779 | 19,6211 | 19,2140 | 18,8098 | 18,7221 |
| 1,50 | - | - | 19,4828 | 19,0758 | 18,7785 | 18,4157 |
| 1,55 | - | - | 19,5329 | 19,2992 | 18,6371 | 18,2148 |
| 1,60 | - | - | - | - | 18,4492 | 18,4579 |

A K_k korrekciós tényező definiálása azért szükséges, mert a lineáris interpoláció alkalmazásakor a közelítés pontossága 90%-ot képvisel. A korrekciós tényező alkalmazásával a pontosság növelhető. Mivel a linearizált modell 20%-nál kisebb nedvességtartalom és 0,6 légfeszleg tényező alatt túlbecsül, ezért ezeknél az eseteknél 0,9–1 közötti korrekciós tényező alkalmazása válik szükségessé. 25%-nál nagyobb nedvességtartalom

és 0,6 feletti légfelesleg tényezőnél az alulbecslés a jellemző, ezért ott a korrekciós tényező értékét célszerűen 1–1,1 közé célszerű választani.

A K_k korrekciós szám értéke

$$K_k = 0,00285 \cdot n + 1,09182 \cdot \lambda^{0,28} \quad (6.21)$$

összefüggés alapján származtatható.

A gázosítás reakció hatásfokának nedvességtartalomtól és légfelesleg tényezőtől való függését a 6.22. képlet írja le:

$$\eta_{rn\lambda}(n, \lambda) = (K_\eta - 0,0005366 \cdot n - 1,648 \cdot \lambda) \cdot K_k \cdot 100\%, \quad (6.22.)$$

ahol: K_η a reakció hatásfok konstans.

A reakció hatásfok nedvesség tartalom és a légfelesleg tényező függvényében történő meghatározásához alkalmazandó K_η konstans értékét a 6.16. táblázat tartalmazza. A korrekciós tényező az előzőeknek megfelelően alkalmazandó. A gázosítás reakció hatásfoka az alapanyag nedvességtartalmával és a légfelesleg tényezővel fordított arányban áll. Ugyan ez a tendencia figyelhető meg, ha az alapanyag H/C és O/C arányok függvényében vizsgálódunk.

6.16. táblázat: Reakció hatásfok konstans alakulása gázosításnál, K_η [%]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 1,6815 | 1,6328 | 1,6639 | - | - |
| 1,20 | - | 1,7025 | 1,6492 | 1,6767 | 1,6531 | - |
| 1,25 | 1,7370 | 1,7158 | 1,6411 | 1,6724 | 1,6481 | - |
| 1,30 | 1,7527 | 1,7175 | 1,6534 | 1,6783 | 1,6361 | 1,5983 |
| 1,35 | 1,7624 | 1,7175 | 1,6550 | 1,6748 | 1,4105 | 1,5979 |
| 1,40 | 1,7544 | 1,7201 | 1,6716 | 1,6679 | 1,6254 | 1,5874 |
| 1,45 | 1,7662 | 1,7125 | 1,6777 | 1,6806 | 1,6223 | 1,6054 |
| 1,50 | - | - | 1,7541 | 1,6875 | 1,6085 | 1,7223 |
| 1,55 | - | - | 1,7856 | 1,6892 | 1,6193 | 1,6314 |
| 1,60 | - | - | - | - | 1,5869 | 1,6150 |

A gázosítás fajlagos szintézisgáz termelését a nedvességtartalomtól és légfelesleg tényező függvényében történő leírását a 6.23. képlet tartalmazza:

$$k_{szgn\lambda}(n, \lambda) = (K_{kszg} - 0,04003 \cdot n + 3,99 \cdot \lambda) \cdot K_k \quad (6.23.)$$

ahol: K_{kszg} a fajlagos szintézisgáz termelési konstans.

Az összefüggés arra világít rá, hogy a légfelesleg tényező növelése nagyobb fajlagos gáztermelést eredményez. A technológiát elhagyó úgynevezett nyers szintézisgáz vizgőzt is tartalmaz, amit hasznosítás előtt le kell választani, mindemellett le is kell hűteni, mert kicsi az energiasűrűsége [54]. A lehűtött, tisztított és víztelenített szintézisgázt nevezzük száraz gáznak.

6.17. táblázat: A fajlagos szintézisgáz termelési konstans gázosításra vonatkozóan,

$$K_{kszg} [kg_{gáz}/kg_{fa}]$$

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 2,0988 | 1,9176 | 1,8913 | - | - |
| 1,20 | - | 2,1720 | 1,9296 | 1,7174 | 1,6705 | - |
| 1,25 | 2,3522 | 2,1511 | 1,8638 | 1,7342 | 1,5926 | - |
| 1,30 | 2,2580 | 2,1799 | 1,8446 | 1,6818 | 1,5336 | 1,3878 |
| 1,35 | 2,2504 | 2,0289 | 1,8050 | 1,6813 | 1,4117 | 1,3341 |
| 1,40 | 2,2060 | 1,9828 | 1,8233 | 1,5933 | 1,4144 | 1,3295 |
| 1,45 | 2,1963 | 1,9704 | 1,7096 | 1,5191 | 1,3806 | 1,2525 |
| 1,50 | - | - | 1,6711 | 1,4857 | 1,3140 | 1,1434 |
| 1,55 | - | - | 1,6370 | 1,4699 | 1,2143 | 1,1390 |
| 1,60 | - | - | - | - | 1,2069 | 1,1481 |

A 6.18. táblázat összefoglalja néhány jellegzetes fajfajta eltérő nedvességtartalmú és légfesleg tényezővel gázosított fajfajta kapott eredményeket. A számítási módszer részletesen a III. számú mellékletben található.

6.18. táblázat: Összefoglaló táblázat az ismertetett fajfajta gázosítására vonatkozóan

| Fajfajta | Nedvességtartalom [%] | Légfeszleg tényező | e_k [MJ/kg _{fa}] | η_r [%] | k_{gt} [kg _g /kg _{fa}] |
|-------------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--------------|---|
| Bükkfa | 0 | 0,50 | 8,9053 | 71,85 | 3,0380 |
| Bükkfa | 20 | 0,60 | 6,2514 | 62,28 | 2,9686 |
| Tölgyfa | 0 | 0,55 | 8,9385 | 70,82 | 3,6181 |
| Tölgyfa | 23 | 0,63 | 6,0973 | 62,14 | 3,2948 |
| Energia fűz | 0 | 0,53 | 9,3164 | 76,95 | 3,4189 |
| Energia fűz | 15 | 0,58 | 7,5003 | 71,30 | 3,1649 |

Összességében elmondható, hogy a nedvességtartalom növekedése csökkenti a fajlagos energiakihozataalt (6.21. összefüggés), ezen keresztül a reakció hatásfokát (6.22. összefüggés), valamint a fajlagos szintézisgáz-termelést (6.23. összefüggés). Ennek magyarázata abban rejlik, hogy a nagyobb nedvességtartalom egy része nem vesz részt a lejátszódó reakciókban, így nem kedvez a hidrogén felszabadulásnak, ezáltal vízgőzként jelenik meg a szintézisgázban.

A száraz gáz a gázosítást elhagyó nagy hőmérsékletű és gőztartalmú nyers szintézisgáz hűtéséből és víztelenítéséből kapott gázterméket jelenti. A légfeszleg tényező növelése közvetlenül a nyers szintézis gáz mennyiségét növeli (6.23. összefüggés), de a száraz gáz, valamint a reakció hatásfoka (6.22. összefüggés) és a fajlagos energiakihozatal (6.21. összefüggés) tekintetében csökkenő tendencia figyelhető meg.

Itt jegyezném meg, hogy a gázosítással kapott szintézisgáz fűtőértéke kisebb, mint a pirolízis során keletkező pirogáznak, ezért a jövőben további vizsgálatok szükségesek a gáztermékek hasznosíthatóságának megállapítására vonatkozóan. A gázosítás során a légfeszleg tényező növelésének hatására nagyobb a fajlagos szintézisgáz terme-

lés (6.23. összefüggés), ugyanakkor csökken a fajlagos energiakihozatal (6.21. összefüggés), amelyek eredményeként kisebb energiasűrűségű, kisebb fűtőértékű szintézisgázt kapunk. A gyengébb minőségi tulajdonságot nem minden esetben lehet kompenzálni a mennyiséggel, ezért a hasznosítás során hatékonyságcsökkenés ezen keresztül pedig az erőmű teljesítményének csökkenése jelentkezhet. A kutatás folytatásaként szeretném megvizsgálni, hogy a szintézisgáz változó energetikai tulajdonságai, hogyan, milyen mértékben befolyásolják az erőgép hatásfokát, valamint a Wobbe- számot.

6.1.3. PLAZMATECHNOLÓGIA HATÉKONYSÁG-TÉRKÉPEI

A harmadik vizsgált termikus kezelési eljárás a plazma-technológia. A vizsgálatokat a plazmatechnológiára jellemző 0,5 légfeszültség tényező mellett, 3.000 °C maghőmérsékletű plazmára vonatkozóan végeztem el. A nyomást 1 és 20 bar közötti értéken vizsgáltam. A nyomás növelésének hatására a fajlagos energia kihozatal és a kémiai hatásfok is lineárisan, szigorúan monoton csökken, a csökkenés mértéke 20 bar üzemi nyomás mellett 0,17%-ot képvisel, ezért a reaktorban uralkodó nyomás fajlagos energia kihozatalra és kémiai hatásfokra gyakorolt hatása elhanyagolható. Ezek alapján a méretnövelésnél a nyomás független változónak tekinthető a fajlagos energia kihozatal tekintetében, ezért a táblázatokban ismertetett eredmények egy bar üzemi nyomásra vonatkoznak 0%-os nedvességtartalmú alapanyag kezelése során. A reakciók lejátszódásához szükséges segédgáz és fáklyagáz egyaránt levegő. A linearizált modell csak 40%-os nedvességtartalomig használható.

A 6.19. táblázatban láthatjuk, hogy a tüzelőanyag fajlagos összetételének (H/C és O/C arányok), valamint nedvességtartalmának növekedése egyértelműen csökkenti a fajlagos energiakihozatal, ezen keresztül a reakció hatásfokot (6.21. és 6.22. táblázat). A fajlagos fagázstermelésnél ugyan ez a tendencia figyelhető meg (6.23. és 6.24. táblázat). A III. számú mellékletben feltüntettem a modellvizsgálat alapadatait az „1” jelű biomassza összetételre vonatkozóan. A mintapéldául szolgáló három fafajta plazmatechnológiával történő kezelésre kapott eredményeket a 6.25. táblázat foglalja össze.

6.19. táblázat: Fajlagos energia kihozatal mértéke plazmatechnológiánál, e_k [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1,15 | - | 12,4843 | 11,6221 | 11,3993 | - | - |
| 1,20 | - | 12,6494 | 11,6946 | 11,0407 | 10,5140 | - |
| 1,25 | 13,0720 | 12,6670 | 11,4136 | 10,9068 | 10,1746 | - |
| 1,30 | 13,1430 | 12,5058 | 11,3896 | 10,6423 | 9,9764 | 9,1285 |
| 1,35 | 13,1032 | 12,2586 | 11,2174 | 10,5169 | 9,3647 | 8,9494 |
| 1,40 | 12,7979 | 12,0961 | 11,0926 | 10,2340 | 9,4054 | 8,9278 |
| 1,45 | 12,7470 | 11,7754 | 10,8814 | 9,9076 | 9,1266 | 8,6452 |
| 1,50 | - | - | 10,5688 | 9,7098 | 8,9615 | 8,1143 |
| 1,55 | - | - | 10,4001 | 9,5255 | 8,5398 | 8,1530 |
| 1,60 | - | - | - | - | 8,4215 | 8,1310 |

6.20. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energia kihozatalra plazmatechnológiánál, Δe_k [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | -1,2956 | -1,2068 | -1,1844 | - | - |
| 1,20 | - | -1,3121 | -1,2137 | -1,1469 | -1,0934 | - |
| 1,25 | -1,3544 | -1,3130 | -1,1849 | -1,1329 | -1,0572 | - |
| 1,30 | -1,3429 | -1,2965 | -1,1834 | -1,1051 | -1,0371 | -0,9500 |
| 1,35 | -1,3564 | -1,2694 | -1,1628 | -1,0734 | -0,9729 | -0,9310 |
| 1,40 | -1,3244 | -1,2527 | -1,1501 | -1,0622 | -0,9771 | -0,9283 |
| 1,45 | -1,3183 | -1,2188 | -1,1245 | -1,0279 | -0,9482 | -0,8989 |
| 1,50 | - | - | -1,0952 | -1,0073 | -0,9306 | -0,8437 |
| 1,55 | - | - | -1,0777 | -0,9881 | -0,8874 | -0,8475 |
| 1,60 | - | - | - | - | -0,8746 | -0,8446 |

6.21. táblázat: A plazmatechnológia reakció hatásfoka, η_r [%]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 84,89% | 82,46% | 81,82% | - | - |
| 1,20 | - | 85,96% | 83,29% | 81,21% | 79,47% | - |
| 1,25 | 87,71% | 86,64% | 82,89% | 81,44% | 79,00% | - |
| 1,30 | 88,51% | 86,74% | 83,53% | 81,17% | 78,87% | 75,47% |
| 1,35 | 89,00% | 86,76% | 83,63% | 81,35% | 77,25% | 75,50% |
| 1,40 | 88,61% | 86,91% | 83,84% | 80,99% | 77,93% | 76,01% |
| 1,45 | 89,21% | 86,53% | 83,96% | 80,38% | 77,35% | 75,16% |
| 1,50 | - | - | 83,28% | 80,09% | 77,28% | 73,48% |
| 1,55 | - | - | 83,37% | 80,00% | 76,03% | 74,01% |
| 1,60 | - | - | - | - | 76,08% | 74,73% |

6.22. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a plazmatechnológia reakció hatásfokára, $\Delta\eta_r$ [%]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,15 | - | -0,6219% | -0,6174% | -0,6211% | - | - |
| 1,20 | - | -0,6203% | -0,6137% | -0,6148% | -0,6181% | - |
| 1,25 | -0,6118% | -0,6121% | -0,6131% | -0,6122% | -0,6056% | - |
| 1,30 | -0,6086% | -0,6138% | -0,6234% | -0,6072% | -0,6076% | -0,6014% |
| 1,35 | -0,6033% | -0,5979% | -0,5970% | -0,6080% | -0,5893% | -0,5946% |
| 1,40 | -0,5968% | -0,5986% | -0,5974% | -0,5981% | -0,5916% | -0,5912% |
| 1,45 | -0,5889% | -0,5885% | -0,5936% | -0,5871% | -0,5857% | -0,5834% |
| 1,50 | - | - | -0,5860% | -0,5852% | -0,5804% | -0,5714% |
| 1,55 | - | - | -0,5839% | -0,5799% | -0,5783% | -0,5720% |
| 1,60 | - | - | - | - | -0,5706% | -0,5612% |

6.23. táblázat: *Fajlagos fagáztermelés mértéke plazmatechnológia esetén, k_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 3,9929 | 3,7700 | 3,7124 | - | - |
| 1,20 | - | 4,0311 | 3,7840 | 3,6158 | 3,4803 | - |
| 1,25 | 4,1358 | 4,0312 | 3,7082 | 3,5761 | 3,3868 | - |
| 1,30 | 4,1501 | 3,9855 | 3,6978 | 3,5027 | 3,3308 | 3,0043 |
| 1,35 | 4,1355 | 3,9161 | 3,6467 | 3,4655 | 3,1672 | 3,0609 |
| 1,40 | 4,0531 | 3,8693 | 3,6095 | 3,3870 | 3,1730 | 3,0497 |
| 1,45 | 4,0347 | 3,7819 | 3,5483 | 3,2978 | 3,0963 | 2,9739 |
| 1,50 | - | - | 3,4642 | 3,2422 | 3,0481 | 2,8307 |
| 1,55 | - | - | 3,4150 | 3,1898 | 2,9341 | 2,8875 |
| 1,60 | - | - | - | - | 2,8982 | 2,8252 |

6.24. táblázat: *10%-os nedvességtartalom hatása a plazmatechnológia fajlagos gáztermelésére, Δk_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,15 | - | -0,3793 | -0,3581 | -0,3524 | - | - |
| 1,20 | - | -0,3833 | -0,3596 | -0,3434 | -0,3304 | - |
| 1,25 | -0,3914 | -0,3836 | -0,3525 | -0,3399 | -0,3216 | - |
| 1,30 | -0,3908 | -0,3797 | -0,3515 | -0,3331 | -0,3166 | -0,2959 |
| 1,35 | -0,3943 | -0,3731 | -0,3472 | -0,3242 | -0,3013 | -0,2911 |
| 1,40 | -0,3865 | -0,3689 | -0,3439 | -0,3225 | -0,3020 | -0,2902 |
| 1,45 | -0,3850 | -0,3607 | -0,3375 | -0,3142 | -0,2949 | -0,2832 |
| 1,50 | - | - | -0,3304 | -0,3090 | -0,2904 | -0,2697 |
| 1,55 | - | - | -0,3259 | -0,3042 | -0,2798 | -0,2704 |
| 1,60 | - | - | - | - | -0,2765 | -0,2694 |

6.25. táblázat: *Összefoglaló táblázat az ismertetett fajták plazma-technológiával történő kezelésre vonatkozóan*

| Fajta | Nedvességtartalom [%] | e_k [MJ/kg _{fa}] | η_r [%] | k_{szg} [kg _{szg} /kg _{fa}] |
|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------|--|
| Bükkfa | 0 | 9,1266 | 77,35 | 3,0963 |
| Bükkfa | 20 | 7,2302 | 76,18 | 2,5065 |
| Tölgyfa | 0 | 10,9354 | 80,86 | 3,5887 |
| Tölgyfa | 23 | 8,3221 | 79,44 | 2,8049 |
| Energia fűz | 0 | 9,5495 | 77,41 | 3,1851 |
| Energia fűz | 15 | 8,0600 | 76,51 | 2,7257 |

Az hatékonyság-térképekből azt a következtetést vontam le, hogy a nagyobb H/C és O/C aránnyal rendelkező fás szárú biomassza tüzelőanyagok kisebb fajlagos energia kihozattal (6.19. táblázat), és szintézisgáz-termeléssel (6.23. táblázat), valamint csökkenő reakció hatásfokkal kezelhetők (6.21. táblázat). A vizsgált fás szárú biomasszák plazmatechnológiával történő kezelése során a gázosításnál tapasztalt tendencia figyelhető meg, miszerint a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező tüzelőanyag kisebb hatékonysággal alakítható át éghető gáztermékké.

7. ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS

Az életciklus-elemzés (LCA- Life Cycle Assessment) napjainkban, az egyik legjobban teret hódító környezetmenedzsment rendszereszköz, amelynek alkalmazása elsősorban az egymást helyettesítő szolgáltatások, termékek és technológiák esetén a legcélravezetőbb. Az LCA kapcsán számszerűsítést és becslést végzünk arra vonatkozóan, hogy egy termék teljes élettartama során (előállítás, annak elosztása, felhasználása át a belőle képződő hulladék ártalmatlanításáig) milyen környezeti terheléseket okoz, illetve milyen és mennyi természeti erőforrást használ fel (beleértve az energiakiadásokat is) [3, 76].

Az ISO 14040 szabvány alapján az életciklus-elemzés a következőképp definiálható: *"a termékkel kapcsolatos környezeti tényezők és potenciális hatások értékelésének olyan módszere, amely leltárt készít a termékkel kapcsolatos folyamatok rendszerének bemeneteiről és kimeneteiről; kiértékeli az ezekkel kapcsolatos potenciális környezeti hatásokat; értelmezi a leltári elemzésnek és a hatásértékelés fázisainak eredményeit a tanulmány céljainak figyelembevételével"*.

Az életciklus szemlélet a felelős vállalati magatartás eredményeként született meg. A folyamatosan változó piacon egyetlen vállalat sem képes tartósan sikereket elérni, ha nincs a vállalatnak környezeti menedzsmentje. A környezeti menedzsment az a tevékenység, amelyet egy vagy több személy végez, a szervezet környezettel összefüggő tevékenységeinek összehangolása vagy koordinálása céljából. Más szóval egy vállalkozás környezettel kapcsolatos felelős tevékenysége [3, 49].

A környezeti menedzsmentnek rengeteg eszköze és módszere létezik, amelyek a hatékonyabb környezeti problémák kezeléséhez járulnak hozzá. A megfelelő módszerek kiválasztását számtalan tényező nehezíti és befolyásolhatja, ilyen például a környezetpolitikai célok és a környezetvédelmi szabályozás. A környezeti politika célja a szolgáltatási és termelési tevékenységek, valamint a technológiák kibocsátásaiból származó környezetet károsító hatások minimalizálása. Ennek érdekében a termelés teljes életciklusa során figyelembe kell venni a környezetbarát termékek, illetve a tisztább termelési

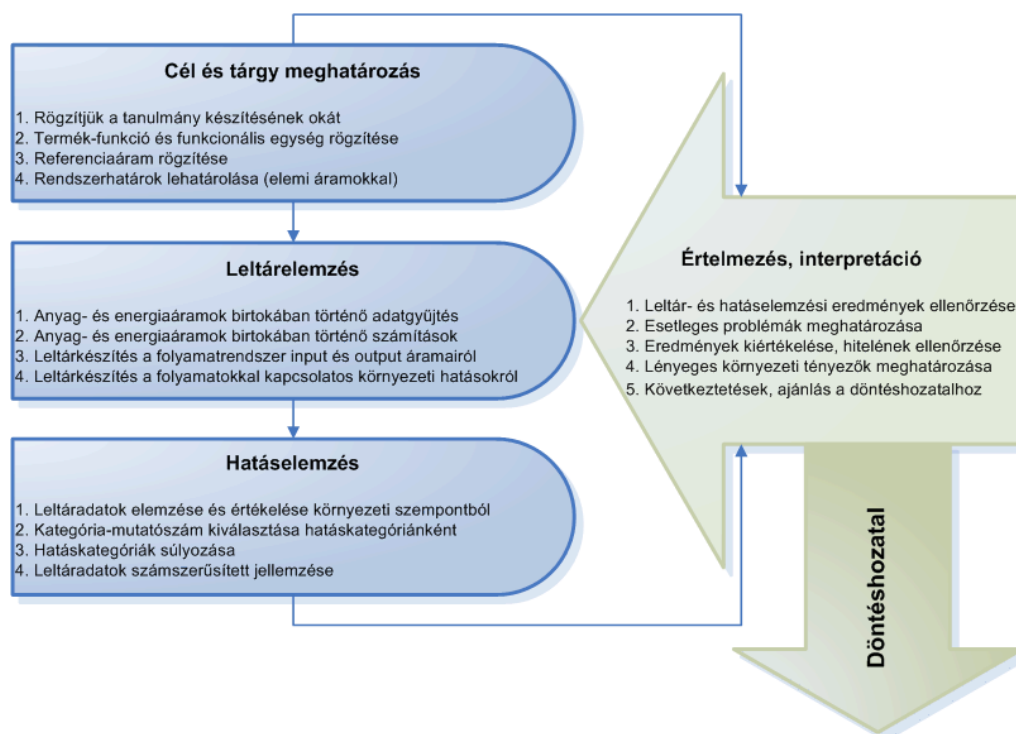
technológiák alkalmazásának előtérbe helyezési lehetőségét, továbbá meg kell találnunk a legkisebb környezeti kockázatot jelentő hulladékkezelési módszereket [3, 60].

Klasszikus értelemben környezetbarátnak csak akkor nevezhetünk egy terméket, vagy egy technológiát, ha maga a termék, illetve a gyártása és fogyasztása során keletkező hulladékoknak közvetve és közvetlenül nincs környezetterhelő hatásuk. Ebben az értelemben az adott termékre vonatkozó ökológiai mérleg a „bölcsőtől a sírig” terjedő szemléletben pozitív, de legalábbis semleges a környezetre nézve [49]. A gyakorlatban elképzelhetetlen egy olyan termelési, és fogyasztási folyamat, ami hulladékmentesnek tekinthető, ezért maga a pozitív jelző használata ez esetben arra utal, hogy a termékekre és technológiákra vonatkozó kedvezőtlen környezeti hatások kisebbek. Egy termék vagy egy technológia környezetbarát jellegének felismerése nem egyszerű feladat és a gyakorlatban számos ellentmondással találkozhatunk.

Igaz, az LCA szükségességét és hasznosságát senki sem vitatja, ennek ellenére gyakran fogalmazódnak meg olyan kritikák, miszerint a módszer nagyon időigényes, költséges és sokszor hiányos is, mivel nem mindig állnak rendelkezésre megfelelő adatok az életciklus minden egyes folyamatáról. Az eredmények értelmezésénél gyakran előfordul, hogy a rendelkezésre álló életciklus-elemzési eredmények nehezen, vagy egyáltalán nem illeszthetők a terméktervezéshez vagy a vállalati környezetirányítás dinamikus rendszerébe [3].

A 2012. évi CLXXXV. törvényben kiemelkedő szerepet kap az életciklus-szemlélet, ami ez által a hulladékgazdálkodás szerves részévé vált. Az életciklus-értékelés egyes szakaszait az *7.1. ábra* szemlélteti, ahol az eredmény szakasz a hatás-elemzési szakaszt jelenti. A hatásértékelésnél (ISO 14044:2006 szabvány szerint) a folyamatrendszer input és output áramait környezeti hatáskategóriákba soroljuk, az előző szakasz leltáreredményeinek hozzárendelésével. Minden egyes hatáskategóriára vonatkoztatva meghatározunk egy referencia egységet, majd súlyozzuk őket a rendelkezésre álló hatásvizsgálati módszer segítségével. Az életciklus teljes anyag-, ill. energiamérlegének ismeretében, adott hatásvizsgálati módszer kiválasztásával a kívánt eredményhez jutunk [6, 76, 78].

Az elemzések megkezdése előtt célszerű definiálni az elemzés tárgyát és röviden megfogalmazni az elérendő célt. Ezt követően vázoljuk a vizsgálni kívánt folyamat vázlatát, valamint írjuk le az anyag-és energiaáramokat, lehatárolva a rendszert a külső környezettől. Második lépésként ellenőrizzük, hogy érvényesülnek-e az alapvető fizikai törvényszerűségek, az anyag- és az energia megmaradási tételek. Ezek meglétét követően léphetünk tovább a már említett hatásértékelési szakaszba. Az így kapott környezeti hatáskategóriákat összehasonlíthatjuk a referenciaadatokkal, értelmezzük és ezek alapján javaslatot tehetünk a döntéshozók számára [6, 76].



7.1. ábra: Az életciklus-értékelés szakaszai [6]

Az elemzés folyamán minden egyes hatáskategóriára vonatkoztatva meghatározunk egy referencia egységet, amihez viszonyítjuk a többi, azonos hatást kifejtő leltáradatot. Pl. az üvegház-hatású gázokat kg CO₂-egyenértékben mérjük. 1 kg CO₂ globális felmelegedésre gyakorolt hatása 1 kg CO₂-egyenértéket képvisel. A metán emissziók globális felmelegedéshez való hozzájárulását kg CO₂- egyenértékben kifejezett érték adja meg, ami az alkalmazott módszertől függően lehet 21, 23, vagy 25 kg is. Egy leltáradat több hatáskategóriához is kapcsolható [49, 77].

A hatáskategóriák súlyozására különböző módszerek léteznek, amelyek az életciklus modellezését követően lehetővé teszik a lehetséges környezeti hatások kifejezését indikátor segítségével. Vizsgálataim során a GaBi 5 nevű kereskedelmi forgalomban kapható életciklus-elemző szoftvert alkalmaztam. A GaBi 5 szoftver mintegy 100 módszert tartalmaz (CML 96, CML 2001, EDIP 97, EDIP 2003, EPFL 2002+, TRACI, Eco-indicator 95, Eco-indicator 99 stb.), és ezzel gyakorlatilag lefedi a jelenleg legelterjedtebben használt módszereket [77]. Példaképpen a leggyakrabban alkalmazott CML 2001 módszer hatáskategóriáit a 7.1. táblázat foglalja össze [77]. A GaBi hatáselemző funkciója megfelel normalizálási és súlyozási módszerek alkalmazására is. Az eredmények gyors értelmezését specifikus funkciók segítik: az életciklus folyamatai (termelő folyamatok, szállítási folyamatok stb.) különböző kritériumok alapján csoportosíthatók, lehetőség van-e csoportok környezeti hatásának külön vizsgálatára, statisztikai elemzés végezhető el az elemzés minőségét illetően, átfogó képet kaphatunk a felhasznált adatok származásáról, a folyamatok alkalmasságáról, és az elkészített modell teljességéről [49].

7.1. táblázat: Környezeti hatáskategóriák (CML 2001, 2010. november kiértékelési módszer)

| Hatáskategóriák megnevezése | Hatáskategóriák értelmezése | Egyenérték |
|---|--|--------------------------------|
| Globális Felmelegedési Potenciál (GWP) | A különböző üvegházhatású gázok globális felmelegedéshez való hozzájárulásának a mértéke egységnyi CO ₂ -hoz viszonyítva. | kg CO ₂ -egyenérték |
| Savasodási Potenciál (AP) | A SO ₂ -hoz viszonyított savasodás. | kg SO ₂ -egyenérték |
| Eutrofizációs Potenciál (EP) | Az algásodás mértéke. | kg Foszfát-egyenérték |
| Humán Toxicitási Potenciál (HTP) | Az emberi szervezetre mérgező hatású anyagokra vonatkozó, maximálisan megengedett koncentráció mértéke 1,4 diklórbenzol (DCB) egyenértékben. | kg DCB-egyenérték |
| Fotokémiai Ózonképződési Potenciál (POCP) | Az illékony szerves vegyületek ózontermelő képessége. | kg Etilén-egyenérték |
| Ózonréteg Elvékonyodási Potenciál (ODP) | Főként a halogénezett szénhidrogének rovására írható, referens összetevőként az R11 került kiválasztásra. | kg R11-egyenérték |
| Földi Öko-toxicitási Potenciál (TETP) | Növény és állatvilágra vonatkozó mérgező anyagok, DCB egyenértékben. | kg DCB-egyenérték |
| Tengervízi Öko-toxicitási Potenciál (MAETP) | | |
| Édesvízi Öko-toxicitási Potenciál (FAETP) | | |
| Abiotikus kimerülő források (ADP elemets) | Magába foglalja a nagyszámú fémércet. | kg antimon-egyenérték |
| Abiotikus kimerülő fosszilis források (ADP fossil) | Magába foglalja a kimerülő fosszilis energiaforrásokat. | MJ |

A környezetvédelmi hatáskategóriák közül kiválasztottam hat gyakran alkalmazott mérőszámot, és ezekre vonatkozóan készítettem el az életciklus-térképeket. Az életciklus-térkép azokat a táblázatos formában megadott eredményeket tartalmazza, amelyek a tüzelőanyagul szolgáló alapanyagok H/C és O/C arányainak függvényében határozza meg az egyes hatáskategóriákat. Az elemzések során azonos körülményeket vettem figyelembe és annak megfelelően rögzítettem a kapott eredményeket. Az elemzések pontos paramétereit a 7.2. táblázat foglalja össze. Az életciklus-térképek alkalmazása, leolvasása az előzőekben bemutatott módszerrel történik. A mintaszámításokat a IV. számú melléklet tartalmazza.

Az elkészített életciklus-elemzések célja az volt, hogy egy összefoglaló képet adjak a különböző fajlagos összetételű fás szárú biomasszák eltérő termikus kezelési módokkal történő hasznosítására vonatkozóan. Az elemzések eredményeire támaszkod-

va készítettem az életciklus-térképeket, amely a 46 fás szárú biomassza kategória H/C és O/C függvényében vázolt táblázatokat jelenti. A vizsgálatokat a négy alap termikus kezelési technológiára vonatkozóan végeztem el.

7.2. táblázat: A vizsgált környezeti hatáskategóriák és az elemzések jellemző paraméterei

| <u>Vizsgált környezeti hatáskategóriák</u> | | | | | |
|---|----|--|--|--|------------|
| GWP | AP | EP | ODP | HTP | ADP fossil |
| <u>Rendszerhatár:</u> | | | | | |
| Biomassza esetén: A biomassza és az erőmű teljes életciklusára vonatkozóan, figyelembe véve a kitermelést és feldolgozást (szállítás nélkül). | | | Települési szilárd hulladék esetén: A hulladék feladásától a keletkező termékek energiatermelésre történő hasznosításáig (közvetlen kibocsátások). | | |
| <u>Energiatermelés módja:</u> Kapcsolt energiatermelés | | <u>Üzemállapot:</u> Normál állandósult üzemviteli állapot. | | <u>Értékelési módszer:</u> CML 2001, 2010. novemberi | |
| <u>Funkcionális egység:</u> 1 kg biomassza, illetve hulladék | | | <u>Kihasznátság:</u> Évi 75,34 %-os teljesítmény-kihasználtság a karbantartási idők figyelembevételével. | | |
| <u>Erőművek élettartama:</u> Gázmotoros és gőzturbinás energiatermelésnél egyformán 100.000 üzemóra, ami az éves kihasználtság alapján 15 év | | | <u>Technikai körfolyamatok:</u> Égetésnél Rankine-Clausius-körfolyamat Gázosításnál és Plazmatechnológiánál Diesel-körfolyamat Pirólízisnél mindkét körfolyamat | | |

A kutatásom során különböző rendszerhatárok szerepét vizsgáltam, és értelmeztem az általuk okozott eltéréseket. Amikor figyelembe vettem a logisztikai műveleteket, mint például a szállítást, akkor minden technológiánál a kapott értékek egy konstanssal eltolódtak. Mivel minden esetben ez az eltolódás állandó értéket mutatott, ezért a szállítási folyamatot függetlenítettem a technológiáktól. Hasonló megfontolások figyelhetők meg a [70] jelű irodalomban is.

Ennek megfelelően biomassza esetében az elemzéseket teljes életciklusra vonatkozóan készítettem el, feltételezve azt, hogy maga a biomassza a teljes életszakasza során a környezetre nézve semleges, ezért csak a kezelési műveletek (pl.: kitermelés, erőműépítés és üzemeltetés) kibocsátásaival számoltam. Települési szilárd hulladék kezelésénél a közvetlen kibocsátásokra végeztem el az elemzéseket [38].

Az erőművek éves teljesítmény-kihasználtságának megállapításakor figyelembe vettem a karbantartási és az állási időket.

A hagyományos égetésnél alkalmazott erőgép gőzkazán és gőzturбина, pirólízisnél a keletkező pirogáz gázmotorban, a pirokoksok gőzkazánban és gőzturbinás hasznosítást

vettem figyelembe. A gázosítás és a plazmatechnológia gáztermékeit gázmotoros hasznosítással vettem figyelembe.

Funkcionális egységként az 1 kg fás szárú biomasszát választottam. Mivel energetikai célú hasznosításról beszélünk, ezért célszerűen az egységnyi megtermelt villamos energiára vonatkoztatva kellene megadni a környezetterhelési mutatókat, viszont itt abba a problémába ütköztem, hogy az egyes alapanyagokból származó gáztermékek a változó összetétel és energetikai, valamint minőségi tulajdonságaik miatt eltérő hatásfokkal hasznosíthatók, ezért reálisabbnak láttam, ha a további vizsgálatokat egységnyi tömegre vonatkozóan végzem el. Ha tömeg alapon vizsgálódunk, akkor az egyes technológiák és gépeik tekintetében elsősorban szabályozástechnikai úton részben kiküszöbölhetők az alapanyagok és gáztermékek változó tulajdonságaiból származó különbségek, természetesen ehhez változó erőgéphatásfok társul. E megfontolás alapján végül a tömegalapon történő vizsgálatok mellett döntöttem.

Mint minden új módszer, így a tüzelőanyag fajlagos összetétele és a tömeg alapon megvalósított vizsgálat is hordoz magában kockázatot, egyes esetekben nem is teszi lehetővé az alternatív technikák, technológiák szakszerű összehasonlítását, ezért a jövőben szeretném a felállított modell alkalmazhatóságát kibővíteni. Amennyiben a bemutatott technológiákhoz az alapanyag és az előállított gáztermékek minőségi tulajdonságainak függvényében energiakonverziós hatásfokot (erőgéphatásfokot) rendelünk, tisztább képet kaphatunk a tényleges környezeti hatásokra vonatkozóan, így az egyes technológiák szakszerűbben összehasonlíthatóvá válhatnak.

7.1. FÁS SZÁRÚ BIOMASSZA ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEI

A fás szárú biomasszák energetikai célú hasznosításának vizsgálata során második lépésként a technológiák életciklus-elemzést végeztem el. Az így kapott eredmények alapján elkészítettem az életciklus-térképeket, amik alkalmazása lehetővé teszik, hogy életciklus-elemző szoftver hiányában is számszerűsíteni tudjuk a technológiák környezetre gyakorolt hatását a biomassza fajtájának függvényében.

7.1.1. HAGYOMÁNYOS ÉGETÉS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK

A fás szárú biomasszák hagyományos égetéssel történő energetikai hasznosítása a legelterjedtebb megoldás. Az égetést gyakran kombinálják gázosítással egy lépcsőben, amire a legismertebb példa a faelgázosító kazán. Erre az esetre szintén az alábbi életciklus-térképek érvényesek. A továbbiakban táblázatos formában feltüntetésre kerülő életciklus-térképek 850 °C hőmérsékleten, 1 bar üzemi nyomáson, és 1,5 légfelesleg tényező mellett megvalósított hagyományos égetésre vonatkoznak. Három fafajta égetésre vonatkozó környezeti hatáskategóriák értékeit példaként a 7.10. táblázat tartalmazza.

Amennyiben egységnyi tömegű tüzelőanyagra végezzük el a vizsgálatokat, annak teljes életciklusára vonatkozóan, arra az eredményre jutunk, hogy az alapanyag fajlagos kARBONTARTALMÁRA vonatkoztatott hidrogén és oxigén arányának növekedése csökkenő hatást fejt ki a környezeti hatáskategóriákra (7.3.-7.8. táblázatok). Ez arra vezethető vissza, hogy a gyengébb minőségű, kisebb fűtőértékkel rendelkező alapanyag hasznosításához kisebb teljesítményű erőgép szükséges. További fontos tényező, hogy a nagyobb H/C és O/C aránnyal rendelkező tüzelőanyag kitermelésénél és a tüzeléshez történő előkészítésénél (aprítás) kisebb energiaigény jelentkezik, ami tovább csökkenti a környezetterhelési mutatókat.

7.3. táblázat: GWP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm CO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 445,78 | 426,96 | 422,06 | - | - |
| 1,20 | - | 445,53 | 425,33 | 411,83 | 400,79 | - |
| 1,25 | 451,50 | 442,91 | 417,15 | 405,70 | 390,16 | - |
| 1,30 | 449,87 | 436,78 | 413,06 | 397,19 | 383,20 | 366,44 |
| 1,35 | 446,02 | 428,03 | 406,35 | 391,63 | 367,26 | 359,08 |
| 1,40 | 437,52 | 421,65 | 400,79 | 382,80 | 365,62 | 355,80 |
| 1,45 | 432,85 | 412,24 | 392,61 | 373,39 | 357,44 | 348,44 |
| 1,50 | - | - | 384,43 | 367,26 | 351,31 | 334,54 |
| 1,55 | - | - | 377,89 | 360,71 | 340,26 | 333,72 |
| 1,60 | - | - | - | - | 335,36 | 329,63 |

7.4. táblázat: AP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, gramm SO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 3,2079 | 3,0725 | 3,0372 | - | - |
| 1,20 | - | 3,2061 | 3,0607 | 2,9636 | 2,8841 | - |
| 1,25 | 3,2491 | 3,1873 | 3,0019 | 2,9195 | 2,8076 | - |
| 1,30 | 3,2373 | 3,1431 | 2,9724 | 2,8582 | 2,7576 | 2,6369 |
| 1,35 | 3,2096 | 3,0801 | 2,9242 | 2,8182 | 2,6428 | 2,5840 |
| 1,40 | 3,1484 | 3,0342 | 2,8841 | 2,7546 | 2,6310 | 2,5604 |
| 1,45 | 3,1149 | 2,9665 | 2,8253 | 2,6870 | 2,5722 | 2,5074 |
| 1,50 | - | - | 2,7664 | 2,6428 | 2,5280 | 2,4074 |
| 1,55 | - | - | 2,7193 | 2,5957 | 2,4486 | 2,4015 |
| 1,60 | - | - | - | - | 2,4133 | 2,3721 |

7.5. táblázat: EP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan,
gramm foszfát-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,2749 | 0,2633 | 0,2603 | - | - |
| 1,20 | - | 0,2747 | 0,2623 | 0,2540 | 0,2472 | - |
| 1,25 | 0,2784 | 0,2731 | 0,2572 | 0,2502 | 0,2406 | - |
| 1,30 | 0,2774 | 0,2693 | 0,2547 | 0,2449 | 0,2363 | 0,2260 |
| 1,35 | 0,2750 | 0,2640 | 0,2506 | 0,2415 | 0,2265 | 0,2214 |
| 1,40 | 0,2698 | 0,2600 | 0,2472 | 0,2361 | 0,2255 | 0,2194 |
| 1,45 | 0,2669 | 0,2542 | 0,2421 | 0,2303 | 0,2204 | 0,2149 |
| 1,50 | - | - | 0,2371 | 0,2265 | 0,2166 | 0,2063 |
| 1,55 | - | - | 0,2330 | 0,2224 | 0,2098 | 0,2058 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,2068 | 0,2033 |

7.6. táblázat: HTP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan,
gramm DCB-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 121,79 | 116,65 | 115,31 | - | - |
| 1,20 | - | 121,72 | 116,20 | 112,51 | 109,50 | - |
| 1,25 | 123,35 | 121,00 | 113,96 | 110,84 | 106,59 | - |
| 1,30 | 122,90 | 119,33 | 112,85 | 108,51 | 104,69 | 100,11 |
| 1,35 | 121,85 | 116,94 | 111,01 | 106,99 | 100,33 | 98,10 |
| 1,40 | 119,53 | 115,19 | 109,50 | 104,58 | 99,89 | 97,21 |
| 1,45 | 118,26 | 112,62 | 107,26 | 102,01 | 97,65 | 95,19 |
| 1,50 | - | - | 105,03 | 100,33 | 95,98 | 91,40 |
| 1,55 | - | - | 103,24 | 98,55 | 92,96 | 91,17 |
| 1,60 | - | - | - | - | 91,62 | 90,05 |

7.7. táblázat: ODP értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan,
gramm R11-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,15 | - | 6,03E-09 | 5,77E-09 | 5,71E-09 | - | - |
| 1,20 | - | 6,02E-09 | 5,75E-09 | 5,57E-09 | 5,42E-09 | - |
| 1,25 | 6,11E-09 | 5,99E-09 | 5,64E-09 | 5,49E-09 | 5,28E-09 | - |
| 1,30 | 6,08E-09 | 5,91E-09 | 5,59E-09 | 5,37E-09 | 5,18E-09 | 4,95E-09 |
| 1,35 | 6,03E-09 | 5,79E-09 | 5,49E-09 | 5,30E-09 | 4,97E-09 | 4,86E-09 |
| 1,40 | 5,92E-09 | 5,70E-09 | 5,42E-09 | 5,18E-09 | 4,94E-09 | 4,81E-09 |
| 1,45 | 5,85E-09 | 5,57E-09 | 5,31E-09 | 5,05E-09 | 4,83E-09 | 4,71E-09 |
| 1,50 | - | - | 5,20E-09 | 4,97E-09 | 4,75E-09 | 4,52E-09 |
| 1,55 | - | - | 5,11E-09 | 4,88E-09 | 4,60E-09 | 4,51E-09 |
| 1,60 | - | - | - | - | 4,53E-09 | 4,46E-09 |

7.8. táblázat: ADP fossil értéke fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan, MJ/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,6921 | 0,6633 | 0,6556 | - | - |
| 1,20 | - | 0,6925 | 0,6607 | 0,6397 | 0,6226 | - |
| 1,25 | 0,7014 | 0,6880 | 0,6480 | 0,6302 | 0,6061 | - |
| 1,30 | 0,6988 | 0,6785 | 0,6417 | 0,6170 | 0,5953 | 0,5692 |
| 1,35 | 0,6929 | 0,6649 | 0,6312 | 0,6084 | 0,5705 | 0,5578 |
| 1,40 | 0,6796 | 0,6550 | 0,6226 | 0,5946 | 0,5680 | 0,5527 |
| 1,45 | 0,6724 | 0,6404 | 0,6099 | 0,5800 | 0,5553 | 0,5413 |
| 1,50 | - | - | 0,5972 | 0,5705 | 0,5457 | 0,5197 |
| 1,55 | - | - | 0,5870 | 0,5603 | 0,5286 | 0,5184 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,5209 | 0,5121 |

A 7.9. táblázat a nedvességtartalom hatását mutatja százalékban kifejezve. Ez azt fogalmazza meg, amennyiben a tüzelőanyag nedvességtartalma 10%-kal nő, akkor a környezeti hatáskategóriák értéke hány százalékkal csökken. Mivel teljes életciklus szemléletű elemzést végeztem, ezért ez a hatás egységes, minden környezeti hatáskategóriára. A nagyobb nedvességtartalom csökkenti a kitermelési és aprítási műveletek energiaigényét, valamint a hasznosításhoz szükséges erőgép méretét, teljesítményét.

7.9. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a környezeti hatáskategóriákra fás szárú biomassza égetésére vonatkozóan

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | -3,92% | -3,63% | -3,56% | - | - |
| 1,20 | - | -3,91% | -3,61% | -3,40% | -3,24% | - |
| 1,25 | -4,00% | -3,87% | -3,48% | -3,31% | -3,07% | - |
| 1,30 | -3,97% | -3,78% | -3,42% | -3,18% | -2,97% | -2,71% |
| 1,35 | -3,92% | -3,65% | -3,32% | -3,09% | -2,72% | -2,59% |
| 1,40 | -3,79% | -3,55% | -3,24% | -2,96% | -2,69% | -2,54% |
| 1,45 | -3,72% | -3,41% | -3,11% | -2,81% | -2,57% | -2,42% |
| 1,50 | - | - | -2,98% | -2,72% | -2,47% | -2,20% |
| 1,55 | - | - | -2,88% | -2,62% | -2,29% | -2,19% |
| 1,60 | - | - | - | - | -2,22% | -2,13% |

A példaként bemutatott fafajták eredményei alapján (7.10. táblázat) azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a biomassza nedvességtartalma, valamint a H/C és O/C arányok növekedése csökkenti a környezeti hatáskategóriák értékeit, ha 1 kg alapanyagra vonatkoztatva adjuk meg az életciklus-elemzés eredményeit. Amennyiben egységnyi megtermelt energiára vonatkozóan végezzük el az elemzéseket, akkor ettől eltérő eredményeket kaphatunk.

7.10. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fajták égetésére vonatkozóan

| Fajta | GWP | AP | EP | HTP | ODP | ADP fossil |
|--|--------|--------|--------|--------|----------|------------|
| Bükkfa száraz | 357,44 | 2,5722 | 0,2204 | 97,65 | 4,83E-09 | 0,5553 |
| Bükkfa 20% nedvességtartalom | 339,10 | 2,4402 | 0,2091 | 92,64 | 4,59E-09 | 0,5268 |
| Tölgyfa száraz | 409,62 | 2,9477 | 0,2526 | 111,91 | 5,54E-09 | 0,6363 |
| Tölgyfa 23% nedvességtartalom | 377,88 | 3,8702 | 0,2330 | 103,24 | 5,11E-09 | 0,5870 |
| Energia fűz száraz | 373,99 | 2,6913 | 0,2306 | 102,17 | 5,06E-09 | 0,5810 |
| Energia fűz 15% nedvességtartalom | 357,36 | 2,5716 | 0,2204 | 97,63 | 4,83E-09 | 0,5551 |

7.1.2. PIROLÍZIS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK

Az életciklus-térképek elkészítése során második technológiaként a pirolízist vizsgáltam. A pirolízis során keletkező pirolízis gáz gázmotorban, a pirokokszt gőzkazán-gőzturbina együttesben kerül hasznosításra. Az életciklus-térképek alkalmazásának megkönnyebbítése érdekében mintapéldák találhatók a *IV. számú mellékletben*. A bemutatott példákra vonatkozó eredményeket a *7.18. táblázat* foglalja össze. Az elvégzett életciklus-elemzések eredményeire alapozva elkészített életciklus-térképek 500 °C hőmérsékletű kezelésre vonatkoznak, egy bár üzemi nyomás és a levegő teljes kizárása mellett.

A *7.11. táblázat* alapján elmondható, hogy ha funkcionális egységként egy kg biomasszát veszünk és annak teljes életciklusra határozzuk meg a globális felmelegedési potenciált, akkor a H/C és az O/C arányok növekedése növeli a kibocsátásokat. Ez a tendencia azzal magyarázható, hogy az elemi összetétel oxigén és hidrogén arányának növekedése nagyobb fajlagos pirolízisgáz-termelést eredményez. A többi hatáskategória esetében is ez a hatás érvényesül.

7.11. táblázat: GWP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm CO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 272,36 | 282,36 | 292,83 | - | - |
| 1,20 | - | 282,23 | 288,25 | 295,53 | 293,33 | - |
| 1,25 | 288,14 | 300,58 | 292,49 | 306,81 | 311,16 | - |
| 1,30 | 289,49 | 304,12 | 295,72 | 313,41 | 314,01 | 314,43 |
| 1,35 | 290,21 | 310,62 | 314,29 | 331,03 | 330,71 | 334,37 |
| 1,40 | 296,13 | 311,54 | 319,43 | 340,91 | 343,03 | 353,84 |
| 1,45 | 310,80 | 318,34 | 322,31 | 347,68 | 350,93 | 370,47 |
| 1,50 | - | - | 326,20 | 351,11 | 360,75 | 382,50 |
| 1,55 | - | - | 333,37 | 360,53 | 369,65 | 384,85 |
| 1,60 | - | - | - | - | 373,14 | 400,57 |

7.12. táblázat: AP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során,
gramm SO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 1,9599 | 2,0319 | 2,1073 | - | - |
| 1,20 | - | 2,0309 | 2,0743 | 2,1267 | 2,1108 | - |
| 1,25 | 2,0735 | 2,1630 | 2,1048 | 2,2078 | 2,2392 | - |
| 1,30 | 2,0832 | 2,1885 | 2,1281 | 2,2553 | 2,2597 | 2,2626 |
| 1,35 | 2,0884 | 2,2353 | 2,2616 | 2,3821 | 2,3798 | 2,4062 |
| 1,40 | 2,1310 | 2,2419 | 2,2986 | 2,4532 | 2,4685 | 2,5463 |
| 1,45 | 2,2366 | 2,2908 | 2,3194 | 2,5019 | 2,5253 | 2,6660 |
| 1,50 | - | - | 2,3474 | 2,5266 | 2,5960 | 2,7525 |
| 1,55 | - | - | 2,3989 | 2,5944 | 2,6600 | 2,7694 |
| 1,60 | - | - | - | - | 2,6851 | 2,8825 |

7.13. táblázat: EP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során,
gramm foszfát-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,1680 | 0,1741 | 0,1806 | - | - |
| 1,20 | - | 0,1740 | 0,1778 | 0,1822 | 0,1809 | - |
| 1,25 | 0,1777 | 0,1854 | 0,1804 | 0,1892 | 0,1919 | - |
| 1,30 | 0,1785 | 0,1875 | 0,1824 | 0,1933 | 0,1936 | 0,1939 |
| 1,35 | 0,1790 | 0,1916 | 0,1938 | 0,2041 | 0,2039 | 0,2062 |
| 1,40 | 0,1826 | 0,1921 | 0,1970 | 0,2102 | 0,2115 | 0,2182 |
| 1,45 | 0,1917 | 0,1963 | 0,1988 | 0,2144 | 0,2164 | 0,2285 |
| 1,50 | - | - | 0,2012 | 0,2165 | 0,2225 | 0,2359 |
| 1,55 | - | - | 0,2056 | 0,2223 | 0,2280 | 0,2373 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,2301 | 0,2470 |

7.14. táblázat: HTP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során,
gramm DCB-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1,15 | - | 74,41 | 77,14 | 80,00 | - | - |
| 1,20 | - | 77,10 | 78,75 | 80,74 | 80,14 | - |
| 1,25 | 78,72 | 82,12 | 79,91 | 83,82 | 85,01 | - |
| 1,30 | 79,09 | 83,08 | 80,79 | 85,62 | 85,79 | 85,90 |
| 1,35 | 79,28 | 84,86 | 85,86 | 90,44 | 90,35 | 91,35 |
| 1,40 | 80,90 | 85,11 | 87,27 | 93,14 | 93,72 | 96,67 |
| 1,45 | 84,91 | 86,97 | 88,06 | 94,98 | 95,87 | 101,21 |
| 1,50 | - | - | 89,12 | 95,92 | 98,56 | 104,50 |
| 1,55 | - | - | 91,07 | 98,50 | 100,99 | 105,14 |
| 1,60 | - | - | - | - | 101,94 | 109,43 |

7.15. táblázat: ODP értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, gramm R11-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,15 | - | 3,68E-09 | 3,82E-09 | 3,96E-09 | - | - |
| 1,20 | - | 3,82E-09 | 3,90E-09 | 4,00E-09 | 3,97E-09 | - |
| 1,25 | 4,20E-09 | 4,06E-09 | 3,95E-09 | 4,15E-09 | 4,21E-09 | - |
| 1,30 | 3,90E-09 | 4,11E-09 | 4,00E-09 | 4,24E-09 | 4,25E-09 | 4,25E-09 |
| 1,35 | 3,91E-09 | 4,20E-09 | 4,25E-09 | 4,48E-09 | 4,47E-09 | 4,52E-09 |
| 1,40 | 3,92E-09 | 4,21E-09 | 4,32E-09 | 4,61E-09 | 4,64E-09 | 4,78E-09 |
| 1,45 | 4,00E-09 | 4,30E-09 | 4,36E-09 | 4,70E-09 | 4,75E-09 | 5,01E-09 |
| 1,50 | - | - | 4,41E-09 | 4,75E-09 | 4,88E-09 | 5,17E-09 |
| 1,55 | - | - | 4,51E-09 | 4,88E-09 | 5,00E-09 | 5,20E-09 |
| 1,60 | - | - | - | - | 5,05E-09 | 5,42E-09 |

7.16. táblázat: ADP fossil értéke fás szárú biomassza pirolizálása során, MJ/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,4231 | 0,4386 | 0,4549 | - | - |
| 1,20 | - | 0,4384 | 0,4478 | 0,4591 | 0,4557 | - |
| 1,25 | 0,4476 | 0,4669 | 0,4544 | 0,4766 | 0,4834 | - |
| 1,30 | 0,4497 | 0,4724 | 0,4594 | 0,4869 | 0,4878 | 0,4884 |
| 1,35 | 0,4508 | 0,4825 | 0,4882 | 0,5142 | 0,5137 | 0,5194 |
| 1,40 | 0,4600 | 0,4840 | 0,4962 | 0,5296 | 0,5329 | 0,5497 |
| 1,45 | 0,4828 | 0,4945 | 0,5007 | 0,5401 | 0,5451 | 0,5755 |
| 1,50 | - | - | 0,5067 | 0,5454 | 0,5604 | 0,5942 |
| 1,55 | - | - | 0,5179 | 0,5601 | 0,5742 | 0,5978 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,5796 | 0,6222 |

7.17. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása a környezeti hatáskategóriákra fás szárú biomassza pirolizálása során

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 11,83% | 13,28% | 13,29% | - | - |
| 1,20 | - | 11,24% | 12,91% | 13,18% | 14,37% | - |
| 1,25 | 11,27% | 10,87% | 12,46% | 13,04% | 14,35% | - |
| 1,30 | 10,03% | 10,77% | 12,38% | 13,04% | 14,26% | 15,36% |
| 1,35 | 9,81% | 10,70% | 12,06% | 13,01% | 14,09% | 15,32% |
| 1,40 | 9,95% | 10,62% | 11,89% | 13,01% | 14,04% | 15,09% |
| 1,45 | 9,72% | 10,73% | 11,82% | 12,99% | 14,03% | 15,06% |
| 1,50 | - | - | 11,78% | 12,85% | 14,02% | 14,92% |
| 1,55 | - | - | 11,78% | 12,82% | 13,99% | 14,70% |
| 1,60 | - | - | - | - | 13,92% | 14,70% |

A 7.17. táblázatban azt figyelhetjük meg, hogy az alapanyagul szolgáló biomassza nedvességtartalmának 10%-os növekedése esetén milyen mértékben nőnek a környezeti hatáskategóriák értékei. A kibocsátás-növekedés annak a következménye, hogy a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező alapanyag pirolizálása során nő a kibocsátott pirolízisgáz mennyisége, valamint a fajlagos energiakihozatal, amik nagyobb méretű és teljesítményű erőgépek alkalmazását teszik szükségessé.

Az életciklus-elemzések eredményei alapján elmondható, hogy a mind a nedvességtartalom, mind a H/C és O/C arányok növekedése fás szárú biomasszák pirolizálása során növeli a környezeti hatáskategóriák értékét. E tendencia megfigyelhető az összefoglaló táblázatban (7.18. táblázat).

7.18. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fajták pirolizálására vonatkozóan

| Fafajta | GWP | AP | EP | HTP | ODP | ADP fossil |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|------------|
| Bükkfa száraz | 350,93 | 2,5253 | 0,2164 | 95,87 | 4,75E-09 | 0,5451 |
| Bükkfa 20% nedvességtartalom | 449,40 | 3,2339 | 0,2771 | 122,78 | 6,08E-09 | 0,6981 |
| Tölgyfa száraz | 295,09 | 2,1235 | 0,1820 | 80,62 | 3,99E-09 | 0,4584 |
| Tölgyfa 23% nedvességtartalom | 386,18 | 2,7790 | 0,2381 | 105,50 | 5,22E-09 | 0,5999 |
| Energia fűz száraz | 317,78 | 2,2868 | 0,1087 | 86,82 | 4,30E-09 | 0,4936 |
| Energia fűz 15% nedvességtartalom | 387,72 | 2,7901 | 0,1326 | 105,92 | 5,24E-09 | 0,6023 |

7.1.3. GÁZOSÍTÁS ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK

Ha a gázosítást kapcsolt energiatermeléssel egybekötött erőműben (IGCC) valósítjuk meg, akkor alkalmazhatók a kutatómunkám során elkészült életciklus-térképek. A kibocsátásokat az alapanyag nedvességtartalmától és a gázosítási technológiánál alkalmazott légfesleges tényező függvényeként, egyenletek formájában írtam el. Az egyenletben szereplő konstansok 0%-os nedvességtartalom és 0,5 légfesleges tényezőre vonatkoznak. A nedvességtartalom és a légfesleges tényező hatását a kibocsátásokra függvények formájában írtam fel. A függvények és a táblázatok alkalmazásának, leolvasásának megkönnyítése érdekében a IV. számú mellékletben példaszámításokat mutatok be.

A gázosítás fajlagos globális felmelegedési potenciálját a nedvességtartalomtól és légfesleges tényező függvényében történő leírását a 7.1. képlet tartalmazza, gramm CO₂-egyenérték/kg_{fa} mértékegységben:

$$GWP_{n\lambda}(n, \lambda) = K_{GWP} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda, \quad (7.1.)$$

ahol: K_{GWP} a fajlagos globális felmelegedési potenciál konstans.

7.19. táblázat: Globális felmelegedési potenciál konstans,
 K_{GWP} [gramm CO₂-egyenérték/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1,15 | - | 189,54 | 163,41 | 156,62 | - | - |
| 1,20 | - | 194,64 | 165,64 | 145,75 | 129,77 | - |
| 1,25 | 207,51 | 195,18 | 157,10 | 141,77 | 119,51 | - |
| 1,30 | 209,72 | 189,32 | 156,47 | 133,76 | 113,56 | 86,95 |
| 1,35 | 208,50 | 182,89 | 151,27 | 129,99 | 94,98 | 82,35 |
| 1,40 | 199,27 | 178,02 | 147,51 | 121,45 | 96,24 | 81,74 |
| 1,45 | 198,75 | 168,28 | 143,01 | 111,52 | 87,79 | 73,12 |
| 1,50 | - | - | 131,65 | 99,63 | 82,81 | 57,02 |
| 1,55 | - | - | 126,55 | 99,95 | 69,98 | 62,31 |
| 1,60 | - | - | - | - | 66,42 | 57,54 |

A gázosítás fajlagos savasodási potenciálját a nedvességtartalomtól és légfesleleg tényező függvényében történő leírását a 7.2. képlet tartalmazza, gramm SO₂-egyenérték/kg_{fa} mértékegységben:

$$AP_{n\lambda}(n, \lambda) = K_{AP} - 0,02772 \cdot n + 2,7442 \cdot \lambda, \quad (7.2.)$$

ahol: K_{AP} a fajlagos savasodási potenciál konstans.

7.20. táblázat: Savasodási potenciál konstans, K_{AP} [gramm SO₂-egyenérték/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 1,3640 | 1,1759 | 1,1271 | - | - |
| 1,20 | - | 1,4006 | 1,1920 | 1,0489 | 0,9338 | - |
| 1,25 | 1,4933 | 1,4045 | 1,1305 | 1,0202 | 0,8600 | - |
| 1,30 | 1,5091 | 1,3660 | 1,1260 | 0,9626 | 0,8172 | 0,6257 |
| 1,35 | 1,5004 | 1,3161 | 1,0885 | 0,9354 | 0,6835 | 0,5926 |
| 1,40 | 1,4340 | 1,2811 | 1,0615 | 0,8740 | 0,6926 | 0,5882 |
| 1,45 | 1,4266 | 1,2110 | 1,0291 | 0,8025 | 0,6317 | 0,5262 |
| 1,50 | - | - | 0,9474 | 0,7318 | 0,5959 | 0,4103 |
| 1,55 | - | - | 0,9107 | 0,7193 | 0,5036 | 0,4484 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,4780 | 0,4141 |

A gázosítás fajlagos eutrofizáció potenciálját a nedvességtartalomtól és légfesleleg tényező függvényében történő leírását a 7.3. képlet tartalmazza, gramm foszfát-egyenérték/kg_{fa} mértékegységben:

$$EP_{n\lambda}(n, \lambda) = K_{EP} - 0,00238 \cdot n + 0,2352 \cdot \lambda, \quad (7.3.)$$

ahol: K_{EP} a fajlagos eutrofizációs potenciál konstans.

7.21. táblázat: Eutrofizációs potenciál konstans, K_{EP} [gramm foszfát-egyenérték/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,1169 | 0,1008 | 0,0966 | - | - |
| 1,20 | - | 0,1200 | 0,1021 | 0,0899 | 0,0800 | - |
| 1,25 | 0,1280 | 0,1204 | 0,0969 | 0,0874 | 0,0737 | - |
| 1,30 | 0,1293 | 0,1167 | 0,0965 | 0,0825 | 0,0700 | 0,0536 |
| 1,35 | 0,1286 | 0,1128 | 0,0933 | 0,0802 | 0,0586 | 0,0508 |
| 1,40 | 0,1229 | 0,1098 | 0,0910 | 0,0749 | 0,0593 | 0,0504 |
| 1,45 | 0,1226 | 0,1038 | 0,0882 | 0,0688 | 0,0541 | 0,0451 |
| 1,50 | - | - | 0,0812 | 0,0651 | 0,0511 | 0,0352 |
| 1,55 | - | - | 0,0780 | 0,0616 | 0,0432 | 0,0384 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,0410 | 0,0355 |

A gázosítás fajlagos humán toxicitási potenciálját a nedvességtartalomtól és légszegesleg tényező függvényében történő leírását a 7.4. képlet tartalmazza, gramm DCB-egyenérték/kg_{fa} mértékegységben:

$$HTP_{n\lambda}(n, \lambda) = K_{HTP} - 1,05228 \cdot n + 104,1835 \cdot \lambda, \quad (7.4.)$$

ahol: K_{HTP} a fajlagos humán toxicitási potenciál konstans.

7.22. táblázat: Humán toxicitási potenciál konstans, K_{HTP} [gramm DCB-egyenérték/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,15 | - | 51,78 | 44,64 | 42,79 | - | - |
| 1,20 | - | 53,18 | 45,25 | 39,82 | 35,45 | - |
| 1,25 | 56,69 | 53,32 | 42,92 | 38,73 | 32,65 | - |
| 1,30 | 57,30 | 51,72 | 42,75 | 36,54 | 31,02 | 23,75 |
| 1,35 | 56,97 | 49,97 | 41,33 | 35,51 | 25,95 | 22,50 |
| 1,40 | 54,44 | 48,64 | 40,30 | 33,18 | 26,29 | 22,33 |
| 1,45 | 54,30 | 45,98 | 39,07 | 30,47 | 23,98 | 19,98 |
| 1,50 | - | - | 35,97 | 27,22 | 22,62 | 15,58 |
| 1,55 | - | - | 34,57 | 27,31 | 19,12 | 17,02 |
| 1,60 | - | - | - | - | 18,15 | 15,72 |

A gázosítás fajlagos ózonréteg elvékonyodási potenciálját a nedvességtartalomtól és légszegesleg tényező függvényében történő leírását a 7.5. képlet tartalmazza, gramm R11-egyenérték/kg_{fa} mértékegységben:

$$ODP_{n\lambda}(n, \lambda) = K_{ODP} - 5,21E - 11 \cdot n + 5,16E - 09 \cdot \lambda, \quad (7.5.)$$

ahol: K_{ODP} a fajlagos ózonréteg elvékonyodási potenciál konstans.

7.23. táblázat: Ózonréteg elvékonyodási potenciál konstans, K_{ODP} [gramm R11-egyenérték/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,15 | - | 2,56E-09 | 2,21E-09 | 2,12E-09 | - | - |
| 1,20 | - | 2,63E-09 | 2,24E-09 | 1,97E-09 | 1,75E-09 | - |
| 1,25 | 2,81E-09 | 2,64E-09 | 2,12E-09 | 1,92E-09 | 1,62E-09 | - |
| 1,30 | 2,84E-09 | 2,57E-09 | 2,12E-09 | 1,81E-09 | 1,54E-09 | 1,18E-09 |
| 1,35 | 2,82E-09 | 2,47E-09 | 2,05E-09 | 1,76E-09 | 1,28E-09 | 1,11E-09 |
| 1,40 | 2,69E-09 | 2,41E-09 | 1,99E-09 | 1,64E-09 | 1,30E-09 | 1,11E-09 |
| 1,45 | 2,68E-09 | 2,28E-09 | 1,93E-09 | 1,51E-09 | 1,19E-09 | 9,89E-10 |
| 1,50 | - | - | 1,78E-09 | 1,37E-09 | 1,12E-09 | 7,71E-10 |
| 1,55 | - | - | 1,71E-09 | 1,35E-09 | 9,46E-10 | 8,43E-10 |
| 1,60 | - | - | - | - | 8,98E-10 | 7,78E-10 |

A gázosítás fajlagos abiotikus kimerülő fosszilis források potenciálját a nedves-ségtartalomtól és légfeszültség tényező függvényében történő leírását a 7.6. képlet tartalmazza, MJ/kg_{fa} mértékegységben:

$$ADP_{fossil_{n\lambda}}(n, \lambda) = K_{ADP_{fossil}} - 0,00598 \cdot n + 0,5924 \cdot \lambda, \quad (7.6.)$$

ahol: $K_{ADP_{fossil}}$ a fajlagos abiotikus kimerülő fosszilis források potenciál konstans.

7.24. táblázat: Abiotikus kimerülő fosszilis források potenciál konstans, $K_{ADP_{fossil}}$ [MJ/kg_{fa}]

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,2944 | 0,2538 | 0,2433 | - | - |
| 1,20 | - | 0,3024 | 0,2573 | 0,2264 | 0,2016 | - |
| 1,25 | 0,3223 | 0,3032 | 0,2440 | 0,2202 | 0,1856 | - |
| 1,30 | 0,3258 | 0,2949 | 0,2431 | 0,2078 | 0,1764 | 0,1351 |
| 1,35 | 0,3239 | 0,2841 | 0,2350 | 0,2019 | 0,1475 | 0,1279 |
| 1,40 | 0,3096 | 0,2765 | 0,2291 | 0,1887 | 0,1495 | 0,1270 |
| 1,45 | 0,3080 | 0,2614 | 0,2221 | 0,1732 | 0,1364 | 0,1136 |
| 1,50 | - | - | 0,2045 | 0,1580 | 0,1286 | 0,0886 |
| 1,55 | - | - | 0,1966 | 0,1553 | 0,1087 | 0,0968 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,1032 | 0,0894 |

A három ismertett fajta gázosítására vonatkozó környezeti hatáskategóriák értékeit a 7.25. táblázat foglalja össze. Megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom növekedése (7.24. táblázat) csökkenti a technológia környezetre gyakorolt hatását. A csökkenés oka megegyezik a hagyományos égetésnél elmondottakkal.

7.25. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fafajták gázosítására vonatkozóan

| Fafajta | GWP | AP | EP | HTP | ODP | ADP fossil |
|---|--------|--------|--------|-------|----------|------------|
| Bükkfa száraz 0,5 légfesleg | 278,46 | 2,0037 | 0,1717 | 76,08 | 3,77E-09 | 0,4326 |
| Bükkfa 20% nedvességtartalom 0,6 légfesleg | 239,56 | 1,7237 | 0,1476 | 65,45 | 5,33E-09 | 0,3722 |
| Tölgyfa száraz 0,55 légfesleg | 352,30 | 2,5352 | 0,2173 | 96,25 | 4,76E-09 | 0,5473 |
| Tölgyfa 23% nedvességtartalom 0,63 légfesleg | 294,21 | 2,1172 | 0,1814 | 80,38 | 6,38E-09 | 0,4571 |
| Energia fűz száraz 0,53 légfesleg | 302,43 | 2,1763 | 0,1865 | 82,62 | 4,09E-09 | 0,4698 |
| Energia fűz 15% nedvességtartalom 0,58 légfesleg | 263,72 | 1,8977 | 0,1626 | 72,05 | 5,13E-09 | 0,4097 |

7.1.4. PLAZMATECHNOLÓGIA ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK

Végezetül a plazmatechnológia életciklus-térképeit ismertetem. E technológiát ugyan ritkán alkalmazzák biomasszák energetikai célú hasznosítására, de jó alternatíva lehet a kedvező környezetvédelmi oldala miatt, főleg a nehézfémekkel szennyezett biomasszák kezelésére vonatkozóan. Az életciklus-térképek a 3.000 °C maghőmérsékletű, egy bár üzemi nyomáson és 0,5 légfesleg tényező mellett megvalósított plazmatechnológia eredményeit tartalmazzák. A példaként bemutatott fafajták plazmatechnológiával történő kezelés hatáskategóriáira kapott eredményeket a 7.33. táblázat foglalja össze.

7.26. táblázat: GWP értéke plazmatechnológiánál, gramm CO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 383,73 | 354,28 | 345,33 | - | - |
| 1,20 | - | 383,20 | 352,08 | 334,47 | 318,51 | - |
| 1,25 | 398,16 | 378,85 | 345,76 | 330,41 | 308,23 | - |
| 1,30 | 396,95 | 378,20 | 345,04 | 322,40 | 302,23 | 276,54 |
| 1,35 | 396,01 | 371,36 | 339,82 | 318,60 | 284,93 | 271,11 |
| 1,40 | 387,70 | 366,44 | 336,04 | 310,03 | 283,69 | 270,46 |
| 1,45 | 386,16 | 356,73 | 329,64 | 300,14 | 276,48 | 261,90 |
| 1,50 | - | - | 320,17 | 294,15 | 271,48 | 246,99 |
| 1,55 | - | - | 315,06 | 288,57 | 258,70 | 246,32 |
| 1,60 | - | - | - | - | 255,12 | 245,82 |

7.27. táblázat: AP értéke plazmatechnológiánál, gramm SO₂-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 2,7614 | 2,5494 | 2,4850 | - | - |
| 1,20 | - | 2,7576 | 2,5336 | 2,4069 | 2,2921 | - |
| 1,25 | 2,8652 | 2,7263 | 2,4882 | 2,3777 | 2,2181 | - |
| 1,30 | 2,8565 | 2,7216 | 2,4829 | 2,3200 | 2,1749 | 1,9900 |
| 1,35 | 2,8497 | 2,6724 | 2,4454 | 2,2927 | 2,0504 | 1,9510 |
| 1,40 | 2,7899 | 2,6369 | 2,4182 | 2,2310 | 2,0415 | 1,9463 |
| 1,45 | 2,7788 | 2,5670 | 2,3721 | 2,1598 | 1,9896 | 1,8847 |
| 1,50 | - | - | 2,3040 | 2,1167 | 1,9536 | 1,7774 |
| 1,55 | - | - | 2,2672 | 2,0766 | 1,8617 | 1,7726 |
| 1,60 | - | - | - | - | 1,8359 | 1,7689 |

7.28. táblázat: EP értéke plazmatechnológiánál, gramm foszfát-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,2366 | 0,2185 | 0,2130 | - | - |
| 1,20 | - | 0,2363 | 0,2171 | 0,2063 | 0,1964 | - |
| 1,25 | 0,2455 | 0,2336 | 0,2132 | 0,2038 | 0,1901 | - |
| 1,30 | 0,2448 | 0,2332 | 0,2128 | 0,1988 | 0,1864 | 0,1705 |
| 1,35 | 0,2442 | 0,2290 | 0,2096 | 0,1965 | 0,1757 | 0,1672 |
| 1,40 | 0,2391 | 0,2260 | 0,2072 | 0,1912 | 0,1749 | 0,1668 |
| 1,45 | 0,2381 | 0,2200 | 0,2033 | 0,1851 | 0,1705 | 0,1615 |
| 1,50 | - | - | 0,1974 | 0,1814 | 0,1674 | 0,1523 |
| 1,55 | - | - | 0,1943 | 0,1780 | 0,1595 | 0,1519 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,1573 | 0,1516 |

7.29. táblázat: HTP értéke plazmatechnológiánál, gramm DCB-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1,15 | - | 104,84 | 96,79 | 94,34 | - | - |
| 1,20 | - | 104,69 | 96,19 | 91,38 | 87,02 | - |
| 1,25 | 108,78 | 103,50 | 94,46 | 90,27 | 84,21 | - |
| 1,30 | 108,45 | 103,32 | 94,26 | 88,08 | 82,57 | 75,55 |
| 1,35 | 108,19 | 101,46 | 92,84 | 87,04 | 77,84 | 74,07 |
| 1,40 | 105,92 | 100,11 | 91,81 | 84,70 | 77,50 | 73,89 |
| 1,45 | 105,50 | 97,46 | 90,06 | 82,00 | 75,53 | 71,55 |
| 1,50 | - | - | 87,47 | 80,36 | 74,17 | 67,48 |
| 1,55 | - | - | 86,07 | 78,84 | 70,68 | 67,29 |
| 1,60 | - | - | - | - | 69,70 | 67,16 |

7.30. táblázat: ODP értéke plazmatechnológiánál, gramm R11-egyenérték/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,15 | - | 5,19E-09 | 4,79E-09 | 4,67E-09 | - | - |
| 1,20 | - | 5,18E-09 | 4,76E-09 | 4,52E-09 | 4,31E-09 | - |
| 1,25 | 5,38E-09 | 5,12E-09 | 4,68E-09 | 4,47E-09 | 4,17E-09 | - |
| 1,30 | 5,37E-09 | 5,11E-09 | 4,67E-09 | 4,36E-09 | 4,09E-09 | 3,74E-09 |
| 1,35 | 5,35E-09 | 5,02E-09 | 4,59E-09 | 4,31E-09 | 3,85E-09 | 3,67E-09 |
| 1,40 | 5,24E-09 | 4,95E-09 | 4,54E-09 | 4,19E-09 | 3,84E-09 | 3,66E-09 |
| 1,45 | 5,22E-09 | 4,82E-09 | 4,46E-09 | 4,06E-09 | 3,74E-09 | 3,54E-09 |
| 1,50 | - | - | 4,33E-09 | 3,98E-09 | 3,67E-09 | 3,34E-09 |
| 1,55 | - | - | 4,26E-09 | 3,90E-09 | 3,50E-09 | 3,33E-09 |
| 1,60 | - | - | - | - | 3,45E-09 | 3,32E-09 |

7.31. táblázat: ADP fossil értéke plazmatechnológiánál, MJ/kg_{fa}

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | 0,5961 | 0,5503 | 0,5364 | - | - |
| 1,20 | - | 0,5953 | 0,5469 | 0,5196 | 0,4948 | - |
| 1,25 | 0,6185 | 0,5885 | 0,5371 | 0,5133 | 0,4788 | - |
| 1,30 | 0,6166 | 0,5875 | 0,5360 | 0,5008 | 0,4695 | 0,4296 |
| 1,35 | 0,6152 | 0,5769 | 0,5279 | 0,4949 | 0,4426 | 0,4212 |
| 1,40 | 0,6023 | 0,5692 | 0,5220 | 0,4816 | 0,4407 | 0,4201 |
| 1,45 | 0,5999 | 0,5541 | 0,5121 | 0,4662 | 0,4295 | 0,4068 |
| 1,50 | - | - | 0,4974 | 0,4569 | 0,4217 | 0,3837 |
| 1,55 | - | - | 0,4894 | 0,4483 | 0,4019 | 0,3826 |
| 1,60 | - | - | - | - | 0,3963 | 0,3819 |

7.32. táblázat: 10%-os nedvességtartalom hatása fás szárú biomassza plazmatechnológiával történő kezelés esetén

| H/C; O/C | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,15 | - | -5,49% | -5,21% | -5,13% | - | - |
| 1,20 | - | -5,48% | -5,18% | -4,98% | -4,81% | - |
| 1,25 | -5,57% | -5,45% | -5,06% | -4,89% | -4,65% | - |
| 1,30 | -5,55% | -5,35% | -5,00% | -4,76% | -4,54% | -4,28% |
| 1,35 | -5,49% | -5,22% | -4,90% | -4,67% | -4,29% | -4,17% |
| 1,40 | -5,36% | -5,13% | -4,81% | -4,53% | -4,27% | -4,11% |
| 1,45 | -5,30% | -4,98% | -4,69% | -4,39% | -4,14% | -4,00% |
| 1,50 | - | - | -4,56% | -4,29% | -4,04% | -3,78% |
| 1,55 | - | - | -4,46% | -4,19% | -3,87% | -3,77% |
| 1,60 | - | - | - | - | -3,79% | -3,70% |

A 7.32. táblázat alapján elmondható, hogy a nedvességtartalom növekedése csökkenti a technológia környezetre gyakorolt hatását. A csökkenés oka megegyezik a hagyományos égetésnél elmondottakkal. A 7.33. táblázatban a három mintapéldaként szolgáló fafajta plazmatechnológiával történő kezelésének környezeti hatáskategóriára kapott eredmények láthatók.

7.33. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat a példaként bemutatott fafajták plazmatechnológiával történő kezelésére vonatkozóan

| Fafajta | GWP | AP | EP | HTP | ODP | ADP fossil |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|-------|----------|------------|
| Bükkfa száraz | 276,48 | 1,9896 | 0,1705 | 75,53 | 3,74E-09 | 0,4295 |
| Bükkfa 20% nedvességtartalom | 253,59 | 1,8249 | 0,1564 | 69,28 | 3,43E-09 | 0,3939 |
| Tölgyfa száraz | 331,28 | 2,3839 | 0,2043 | 90,51 | 4,48E-09 | 0,5146 |
| Tölgyfa 23% nedvességtartalom | 293,58 | 2,1126 | 0,1811 | 80,21 | 3,97E-09 | 0,4560 |
| Energia fűz száraz | 289,44 | 2,0829 | 0,1785 | 79,08 | 3,92E-09 | 0,4496 |
| Energia fűz 15% nedvességtartalom | 270,34 | 1,9454 | 0,1667 | 73,86 | 3,66E-09 | 0,4199 |

7.2. TELEPÜLÉSI SZILÁRD HULLADÉK ÉLETCIKLUS-ELEMZÉSE

A települési szilárd hulladékok bonyolultabb összetétele miatt az életciklus-elemzéseket több variációra, valamint a 3.3. táblázatban ismertetett átlagos összetételre vonatkozóan készítettem el. Az így kapott eredmények alapján felírtam egy-egy függvényt a vizsgált hatáskategóriákra vonatkozóan, amiknek segítségével a tömegszázalékban megadott fajlagos összetétel alapján határozhatóak meg az egyes környezeti hatáskategóriák értékei. Az elemzések során 850 °C hőmérsékletet alkalmazó, rostélytüzelő berendezésben történő kezelést, hőhasznosítóval és komplex füstgáztisztító rendszerrel ellátott égetőművet tekintettem. A felhasznált adatokat az V. melléklet tartalmazza. Az egyenletek sorra a következő módon adódtak:

$$\begin{aligned}
 GWP = & x_{mü} \cdot 259,38 + x_{bi} \cdot 687,16 + x_{pa} \cdot 1086,25 + \\
 & x_{fé} \cdot 77,84 + x_{hi} \cdot 867,37 + x_{üv} \cdot 62,04 + x_{te} \cdot 1490,94 + \\
 & x_{ka} \cdot 373,45 + x_{ét} \cdot 65,72 + x_{éh} \cdot 1896,38 + x_{ko} \cdot 726,17 + \\
 & x_{ve} \cdot 660,73 + x_{fi} \cdot 1333,82,
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

$$\begin{aligned}
 AP = & x_{mü} \cdot 0,644 + x_{bi} \cdot 0,455 + x_{pa} \cdot 0,140 + \\
 & x_{fé} \cdot 0,263 + x_{hi} \cdot 0,137 + x_{üv} \cdot 0,144 + x_{te} \cdot 0,904 + \\
 & x_{ka} \cdot 0,288 + x_{ét} \cdot 0,184 + x_{éh} \cdot 0,438 + x_{ko} \cdot 0,504 + \\
 & x_{ve} \cdot 0,976 + x_{fi} \cdot 0,177,
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

$$\begin{aligned}
 EP &= x_{m\ddot{u}} \cdot 0,048 + x_{bi} \cdot 0,088 + x_{pa} \cdot 0,046 + \\
 &x_{f\acute{e}} \cdot 0,022 + x_{hi} \cdot 0,017 + x_{\ddot{u}v} \cdot 0,034 + x_{te} \cdot 0,104 + \\
 &x_{ka} \cdot 0,015 + x_{\acute{e}t} \cdot 0,043 + x_{\acute{e}h} \cdot 0,043 + x_{ko} \cdot 0,043 + \\
 &x_{ve} \cdot 0,227 + x_{fi} \cdot 0,088,
 \end{aligned} \tag{7.9.}$$

$$\begin{aligned}
 ODP &= x_{m\ddot{u}} \cdot 7,20E - 07 + x_{bi} \cdot 3,19E - 06 + x_{pa} \cdot 8,35E - 07 + \\
 &x_{f\acute{e}} \cdot 3,70E - 06 + x_{hi} \cdot 1,13E - 06 + x_{\ddot{u}v} \cdot 2,80E - 07 + \\
 &x_{te} \cdot 2,90E - 06 + x_{ka} \cdot 1,41E - 06 + x_{\acute{e}t} \cdot 2,18E - 06 + \\
 &x_{\acute{e}h} \cdot 3,48E - 06 + x_{ko} \cdot 1,21E - 06 + x_{ve} \cdot 3,56E - 06 + \\
 &x_{fi} \cdot 1,67E - 06,
 \end{aligned} \tag{7.10.}$$

$$\begin{aligned}
 HTP &= x_{m\ddot{u}} \cdot 42,18 + x_{bi} \cdot 5,03 + x_{pa} \cdot 1,71 + \\
 &x_{f\acute{e}} \cdot 13,24 + x_{hi} \cdot 8,69 + x_{\ddot{u}v} \cdot 10,47 + x_{te} \cdot 8,78 + \\
 &x_{ka} \cdot 0,49 + x_{\acute{e}t} \cdot 11,58 + x_{\acute{e}h} \cdot 28,81 + x_{ko} \cdot 11,42 + \\
 &x_{ve} \cdot 30,93 + x_{fi} \cdot 8,55,
 \end{aligned} \tag{7.1.}$$

$$\begin{aligned}
 ADP \text{ fossil} &= x_{m\ddot{u}} \cdot 0,565 + x_{bi} \cdot 0,506 + x_{pa} \cdot 0,256 + \\
 &x_{f\acute{e}} \cdot 1,224 + x_{hi} \cdot 0,419 + x_{\ddot{u}v} \cdot 0,493 + x_{te} \cdot 0,568 + \\
 &x_{ka} \cdot 0,695 + x_{\acute{e}t} \cdot 0,493 + x_{\acute{e}h} \cdot 0,493 + x_{ko} \cdot 0,453 + \\
 &x_{ve} \cdot 2,547 + x_{fi} \cdot 0,687,
 \end{aligned} \tag{7.12.}$$

ahol: $x_{m\ddot{u}}$ a műanyag, x_{bi} a biológiai úton lebomló, x_{pa} a papír, $x_{f\acute{e}}$ a fém, x_{hi} a higiéniai, $x_{\ddot{u}v}$ az üveg, x_{te} a textil, x_{ka} a karton, $x_{\acute{e}t}$ a nem azonosítható éghetetlen, $x_{\acute{e}h}$ a nem azonosítható éghető, x_{ko} a kompozit, x_{ve} a veszélyes x_{fi} és a finom szemcsés anyagkomponensek fajlagos mennyisége.

Az átlagos összetétel alapján meghatározott környezeti hatáskategóriák értékeit a 7.34. táblázat tartalmazza a hulladék hagyományos égetéssel történő kezelésére vonatkozóan.

7.34. táblázat: Összefoglaló életciklus-táblázat az átlagos összetételű hulladék égetésére vonatkozóan

| | GWP | AP | EP | ODP | HTP | ADP fossil |
|--------------------|--------|-------|-------|---------|-------|------------|
| Hagyományos égetés | 899,77 | 0,311 | 0,067 | 1,79E-6 | 12,95 | 0,61 |

8. EGYSZERŰSÍTETT ENERGETIKAI KÖLTSÉG-HASZON ELEMZÉS

A költség-haszon elemzés egy olyan döntéstámogató módszer, amely segítséget ad egy termék, technológia, vagy szolgáltatás egységnyi költség befektetésével elérhető haszon becslésére. A módszer a releváns költségek és hasznok beazonosításának kiindulópontjaként szolgál, az alternatív lehetőségek összehasonlításához és értékeléséhez. Vizsgálja az adott projektberuházás során felhasználni kívánt források és az általuk nyerhető bevételeket az összes lehetséges megoldási módozatra vonatkozóan [76]. Ideális esetben a költség-haszon elemzés bebizonyítja, hogy az egységnyi beruházási költségre jutó haszon nagyobb értékű, ekkor célszerű az adott beruházást végrehajtani. A legfőbb cél tehát mindig a maximális nettó haszon elérése [56].

A gazdasági haszon bármely olyan jólét-növekedéssel mérhető nyereség, amely a projekt által érintett egyéneknél, vagy program, politika esetén társadalmi szinten jelentkezik. A költséghaszon elemzés elvégzésének kétségtelenül a legnehezebb és legidőigényesebb feladata a hasznok azonosítása és számszerűsítése [56, 76].

A költség-haszon elemzést gyakran egészítik ki kockázatelemzéssel, hogy a reális választási lehetőségek közül a gazdaságilag legstabilabb és emellett a legnagyobb fajlagos haszonnal rendelkező alternatíva kiválasztható legyen. A költség-haszon elemzés elemei a kereslet-kínálati függvény, a nettó jelenérték, a jövedelmezőségi index és a megtérülési ráta [57, 74]. A költségek figyelembe vételekor mind a beruházási, mind a működési költségeket figyelembe kell venni. A bevételek számba vétele során a társadalmi, környezeti (települési, regionális, nemzeti, közösségi) haszonnal is számolni kell, a pénzügyi, gazdasági hasznok mellett. A profit valamely gazdasági tevékenység során felmerült, számszerűen kifejezett bevételek és ráfordítások különbsége [56].

A költség-haszon elemzés metodikáját tekintve cash-flow szemléletben készül, különös tekintettel a pénz időértékére, mert az egységnyi pénz ma többet ér, mint ugyan az az egységnyi pénz holnap. A cash-flow egy előre meghatározott időszak alatt a pénzforrások képződésének és a felhasználásának a folyamata, állományváltozása. Megmutatja, hogy a vállalkozás a rendelkezésére álló pénzeszközei mely tevékenységi területeken, milyen folyamatok révén keletkeztek és azok felhasználására hol kerül sor. A cash-

flow kimutatás egy forgalmi szemléletű kimutatás, amely megmutatja, hogy az egyes tevékenységek milyen hatást gyakorolnak a vállalkozás pénzeszközeire [56].

A költség-haszon elemzés során először a beruházás megvalósulásának költségeit kell megbecsülni, majd az új projektberuházás üzemeltetési költségeit. A tőkeszükséglet meghatározásánál a megvalósulás során felmerülő forgótőkeigényt is figyelembe kell venni [57].

A költség-haszon elemzés a következő fő lépések sorozata [57]:

1. A projektjavaslatok elvárt eredményeinek megerősítése (tisztázása).
2. Az elemzést meghatározó feltételek, hipotézisek lefektetése.
3. Az elemzési (értékelési) időszak kijelölése.
4. Minden jelentős költség és haszon beazonosítása, realitásának ellenőrzése.
5. Amennyiben lehetséges, pénzben kifejezhető érték rendelése az egyes hasznokhoz és költségekhez (magának a hozzárendelési mechanizmusnak a kiválasztása és alkalmazása).
6. A hasznok és költségek diszkontálása, jelenértékének kiszámítása
7. A kockázatok és bizonytalanság értékelése.
8. A pénzben nem, vagy nehezen mérhető hasznok és költségek hatásainak felmérése.
9. A megfelelő javaslat kidolgozása.

A költség-haszon elemzések három legfontosabb típusa [57, 76]:

- Változatok elemzése, amelynek célja annak alátámasztása, hogy a projekt a megvalósítható alternatívák közül a legjobb.
- A pénzügyi elemzés, amely a kiválasztott műszaki megoldásra vonatkozóan a beruházónál, kedvezményezettél felmerülő költségeket és bevételeket veszi számba és veti össze, pénzáram (cash-flow) szemléletben. Ennek keretében kell a pénzügyi fenntarthatóságot is vizsgálni.
- A közgazdasági költség-haszon elemzés, amelynek célja a kiválasztott műszaki megoldásra vonatkozóan a társadalmi hasznosság és költségek vizsgálata. Tekintettel arra, hogy ennek a vizsgálatnak a keretében a pénzügyi hasznokat és költségeket kell kiegészíteni vagy felváltani társadalmi költségekkel és hasznokkal, ezért ezt társadalmi-gazdasági elemzésnek is tekinthetjük.

A kutatómunkám során egyszerűsített, hagyományos értelemben véve nem klaszikus költség-haszon elemzéseket végeztem arra vonatkozóan, hogy a termikus kezelési technológiák során alkalmazott segédgáz lecserélésével milyen gazdasági előnyt lehet elérni. Ennek megfelelően a költség-haszon elemzés az energetikai hatékonyságvizsgálatokat kiegészítő módszerként alkalmazható, és így az energetikai költség-haszon elemzés kifejezés helytállóbb lenne. A termikus kezelési módszereknél célszerű olyan üzemeltetést befolyásoló intézkedéseket, fejlesztéseket megvalósítani, amelyek

tovább növelik a technológiák energetikai hatékonyságát, ezen keresztül pedig csökkentik a fajlagos üzemeltetési költségeket. Mivel a plazmatechnológia rendelkezik a legnagyobb beruházási költséggel az alkalmazott 3.000 °C hőmérséklet miatt, ezért a vizsgálataimat erre vonatkozóan végeztem el.

Az energetikai hatékonyság növelésének egyik módszere a segédgáz összetételének módosítása, aminek költség vonzata is létezik. A cél, hogy olyan segédgázkeveréket találjunk, ami a legkisebb anyagi ráfordítás mellett, a legnagyobb fajlagos energia kihozatalt biztosítja, ezért egy optimumkeresési eljárást kell alkalmazni, ami kvázi pénzügyi költség-energetikai haszon elemzést jelent. Ennek eredményeként előáll az anyagösszetételtől és nedvességtartalomtól függő, minden tekintetben optimális összetételű segédgáz keverék.

Az energetikai költség-haszon elemzés lényege, hogy az alternatív segédgáz fajlagos energia kihozatalra gyakorolt hatását, valamint a bevétel növekedést és annak bekerülési költségét vizsgáljuk. Egy segédgáz akkor nevezhető költséghatékonyak, ha az általa elért nyereség nagyobb, mint a ráfordított költség. A levegővel történő kezelés esetében ez egyértelműen érvényesül, mert a levegő korlátlan mennyiségben áll a rendelkezésünkre. Legnagyobb problémája, hogy a benne lévő energetikailag inert gázok (nitrogén) nagy mennyisége miatt az előállított szintézisgáz fajlagos mennyisége megnő, emiatt kicsi az energiasűrűsége [53]. Az energiasűrűség növelése a ballasztként viselkedő összetevők leválasztásával megvalósítható, de ennek jelentős költségvonzata ismeretes. Reális megoldásként a levegő lecserélésével, vagy a levegő és egyéb gáz megfelelő arányú keverékének alkalmazásával számolhatunk. Az energiasűrűség növekedésével a gázkezelő rendszer beruházási és üzemeltetési költségei is csökkenthetők. Az erőmű teljes élettartama alatt előállított energia kihozatalra nézve a segédgáz bekerülési költsége a mérvadó, ezért a számítások során csak ezt vettem figyelembe.

Egy alternatív segédgáz alkalmazása akkor nevezhető gazdaságos megoldásnak, ha a levegő közeghez viszonyított energiatöbbletből származó bevétel nagyobb, mint az alternatív segédgáz bekerülési költsége. Ennek megállapítása érdekében további modellvizsgálatokat végeztem. A modellezés során azt vizsgáltam, hogy a levegő segédgáz lecserélése, illetve szén-dioxiddal, valamint vízgőzzel történő keverése, hogyan változtatja a szintézisgáz kémiai összetételét, valamint milyen mértékben növeli a fajlagos energia kihozatalt. Az elemzéseket elkészítettem tiszta szén-dioxidra és tiszta vízgőzre vonatkozóan is. A szén-dioxid a reaktorban uralkodó hőmérséklet hatására reakcióba lép a rendszerben lévő karbonnal, így a szén-monoxid képződésében játszik fontos szerepet. A vízgőz gázosító közegként történő alkalmazásának előnye, hogy hidrogén felszabadulással járó reakciókban vesz részt. A nagy hőmérsékleten (akár 400 °C) bevezetett vízgőz lebomlik és oxigéntartalma a reakció oxigénigényét fedezi. Alkalmazási korlátját az alapanyag nedvességtartalma jelenti, mert a tüzelőanyag nedvességtartalmában jelenlévő oxigén a reakció oxigénigényének nagyobb részét tudja fedezni, ezáltal kisebb oxigéntartalmú gázosító közeg rendszerbe történő bevitelére van szükség [53].

A továbbiakban az „1” jelzéssel ellátott összetételű biomasszára kapott eredményeket mutatom be, aminek $CH_{1,25}O_{0,40}$ a moláris képlete.

A szén-dioxid nagy bekerülési költsége miatt arra az eredményre jutottam, hogy a szén-dioxid segédgázként történő alkalmazása fás szárú biomassza plazmatechnológiával történő kezelése során nem gazdaságos megoldás. A palackozott, tiszta szén-dioxid átlagosan 280-300 Ft/kg-os ára mellett alkalmazása még levegővel történő keveréssel sem gazdaságos. Ellenben, ha nem élelmiszeripari minőségű, hanem vegyipari szintézisekből származó szén-dioxidot alkalmazunk, a gazdasági mutatók javíthatók. Mivel a metanol gyártás során jelentős mennyiségű szén-dioxid szabadul fel, ezért célszerű egy kombinált rendszert kialakítani. Az így létrejött technológia-együttesben a metanol reakciók során felszabaduló szén-dioxid a plazmatechnológiába segédgázként bevihető.

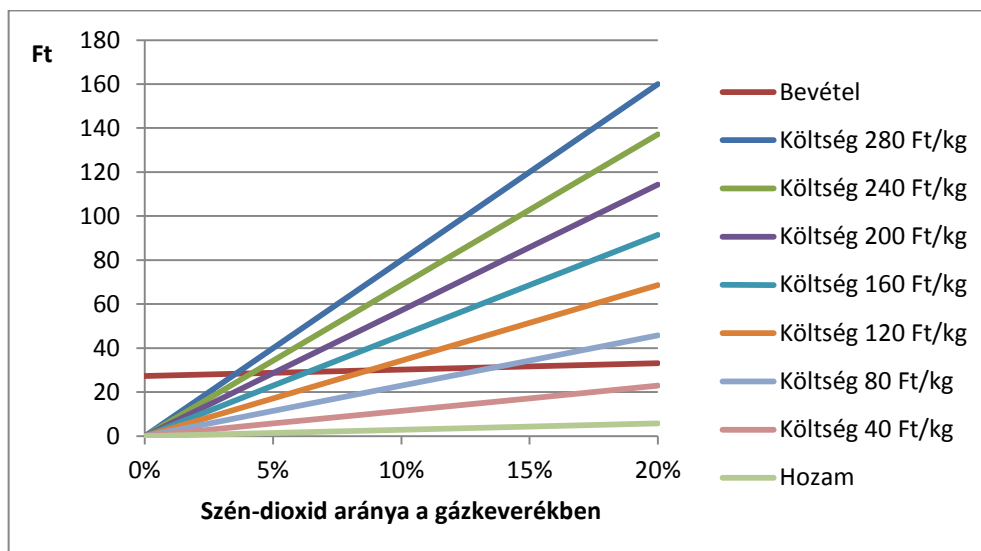
Másik lehetőség a keletkező szintézisgázban, illetve az erőművi hasznosítást követően felszabaduló, füstgázban található szén-dioxid leválasztása és segédgázként történő visszavezetése a technológiába. Üzemi költségként a leválasztáshoz használt segédanyagok ára és a berendezések energiaigényének költségei jelentkezik, amelyek így befolyásolják a plazmatechnológia gazdaságosságát és működési hatékonyságát [55].

Alapadatként a 28%-os nettó villamos hatásfokkal rendelkező gázmotoros energiatermelést tekintettem [30]. A megtermelt villamos energia kötelező átvételi ára 2015-ben a napi csúcs, a völgy és a mélyvölgy időszakok időarányos felosztása alapján átlagosan 31,88 Ft/kWh, a szén-dioxid ára 280 Ft/kg. A 15%-os nedvességtartalmú fa plazmatechnológiával történő kezelése során, a szén-dioxid segédgázzal elérhető energiasűrűség növekedés mértékét, valamint a kiadási és a bevételi oldalt a 8.1. táblázat tartalmazza. A részletes eredménylista a VI. számú mellékletben található. A számításokat az [58, 59] irodalmak által ismertett példák alapján végeztem el.

8.1. táblázat: Szén-dioxid segédgáz alkalmazásának energetikai hatása és pénzügyi vonzata plazmatechnológiánál

| Levegő [kg/kg _{fa}] | CO ₂ [kg/kg _{fa}] | CO ₂ tartalom | e_k [MJ/kg _{fa}] | Δe_{ak} [-] | Kiadás [Ft/kg _{fa}] | Bevétel [Ft/kg _{fa}] | Profit [Ft/kg _{fa}] |
|----------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 2,8572 | 0,0000 | 0% | 11,0083 | 1,0000 | 0,00 | 27,30 | 27,30 |
| 2,7143 | 0,1429 | 5% | 11,5929 | 1,0531 | 40,00 | 28,75 | -11,25 |
| 2,5714 | 0,2857 | 10% | 12,1764 | 1,1061 | 80,00 | 30,19 | -49,81 |
| 2,4286 | 0,4286 | 15% | 12,7614 | 1,1593 | 119,99 | 31,64 | -88,36 |
| 2,2857 | 0,5714 | 20% | 13,3453 | 1,2123 | 160,00 | 33,09 | -126,91 |

A szén-dioxid bekerülési költségének változására vonatkozóan érzékenységvizsgálatot végeztem. Megvizsgáltam, hogy a felhasznált szén-dioxid ára hogyan befolyásolja a költség-haszon görbét, a fedezeti pontot (8.1. ábra).



8.1. ábra: Széndioxid bekerülési költségének hatása a fedezeti pontra

Megfigyelhető, hogy a széndioxid bekerülési költsége nagyobb meredekségű függvénnyel írható le, mint a bevételi görbe. Amennyiben csökken a szén-dioxid ára, nagyobb keverési arány mellett érjük el a fedezeti pontot. Ennél nagyobb keverési arány mellett a technológia működtetése veszteséges lesz. A számítások azt eredményezték, hogy csak abban az esetben érhetünk el bevételtöbbletet (hozamot), ha a szén-dioxid előállítási, bekerülési költsége 10,13 Ft/kg értékhatár alatt marad.

Megvizsgáltam azt az esetet is, amikor a szén-dioxid bekerülési költsége mellett a keverési arány, az erőgép hatásfoka, valamint a villamos energia kötelező átvételi ára is változik. Mindezek figyelembe vételével sikerült felírnom egy összefüggést a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával (8.1. képlet), amely megmutatja, hogy ha változik az előbb említett paraméterek egyike, akkor hogyan alakul a bevételi oldal. A függvény átrendezésével megadható az a keverési arány, amelynél a technológia bevételi és kiadási oldala megegyezik (különbségük nullával egyenlő), azaz a fedezeti pont. Az alapadatok a VI. számú mellékletben található.

Mindezek alapján a haszon:

$$H = 0,5352 \cdot \sqrt{A_{CO_2}} + 0,01519 \cdot \eta_{egv}^2 - 0,1428 \cdot KTG_{CO_2} + 0,01519 \cdot B_e^2 \quad (8.1.)$$

függvénnyel írható le, ahol: H a haszon, A_{CO_2} a szén-dioxid keverési aránya, η_{egv} az erőgép nettó villamos hatásfoka, KTG_{CO_2} a szén-dioxid bekerülési költsége és B_e a villamos energia átvételi ára.

A modellezések során a vízgőz alkalmazása pozitív eredményt hozott. A vízgőz előállításának nincs közvetlen költsége, mert a szintézisgáz hűtéséből származó hő közvetlenül alkalmazható vízgőz előállítására. Mind önálló segédgázként, mind a levegővel keverten történő alkalmazása egyaránt növeli a fajlagos energia kihozatalát [53]. Ebből következik, hogy a vízgőz alkalmazása nagyobb haszonnal jár, mint költséggel. Alkal-

mazhatósági korlátját a kezelésre kerülő alapanyag nedvességtartalma jelenti. A nedvességtartalom növekedésével arányosan csökken az energia sűrűség növekedés mértéke. 40%-os nedvességtartalommal rendelkező alapanyagoknál már nem érhető el energia kihozatal növekedés. Az elemzés során az erőgép hatásfoka valamint a villamos energia átvételi ára az előzőekben elmondottakkal megegyező. Az így kapott eredményeket a 8.2. táblázat tartalmazza. A számítási részeredményeket a VI. melléklet tartalmazza.

8.2. táblázat: *Vízgőz segédgáz alkalmazásának energetikai hatása és pénzügyi vonzata plazmatechnológiánál*

| Levegő [kg/kg _{fa}] | Gőz [kg/kg _{fa}] | Gőz- tartalom | e_k [MJ/kg _{fa}] | Δe_{ak} [-] | Kiadás [Ft/kg _{fa}] | Bevétel [Ft/kg _{fa}] | Profit [Ft/kg _{fa}] |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 2,8572 | 0 | 0% | 11,0083 | 1,0000 | 0,00 | 27,30 | 27,30 |
| 2,7143 | 0,1429 | 5% | 11,4693 | 1,0419 | 0,00 | 28,44 | 28,44 |
| 2,5714 | 0,2857 | 10% | 11,9383 | 1,0845 | 0,00 | 29,60 | 29,60 |
| 2,4286 | 0,4286 | 15% | 12,4108 | 1,1274 | 0,00 | 30,77 | 30,77 |
| 2,2857 | 0,5714 | 20% | 12,8886 | 1,1708 | 0,00 | 31,96 | 31,96 |

A nagyobb H/C és O/C aránnyal rendelkező fás szárú biomasszák esetében az energia sűrűség növekedés mértéke (Δe_{ak}) az aránypárok növekedésével arányosan csökkenő tendenciát mutat. Ezekben az esetekben a segédgáz cseréjével kisebb energia sűrűség növekedés, és profitnövekedés érhető el.

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

- T 1. Termokinetikai modellt alkalmaztam a termikus kezelési technológiák során keletkező gáztermék összetételének meghatározására vonatkozóan. Az elemzéseket különböző összetételű és nedvességtartalmú biomasszára végeztem el. A modelltől származó eredmények alapján *meghatároztam a fajlagos energiakihozatal mértékét*, ami megmutatja, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkoztatva, mekkora energiamennyiség állítható elő. Mértékegysége MJ/kg_{szt}, illetve kWh/kg_{szt}. *E mérőszám ismeretében és a rendelkezésre álló potenciál függvényében méretezhető a gáz hasznosítására szolgáló energiatermelő egység*, illetve meghatározható az erőmű teljesítménye. [P1], [P5], [P6], [P8], [P14]
- T 2. Elvégeztem az általam definiált hulladékok energetikai célú hasznosítására szolgáló alternatív termikus kezelési technológiák energia-hatékonyságának vizsgálatát. *A reakció hatásfokok mellett, bevezettem a fajlagos energiakihozatal mértékét jellemző mérőszámot, valamint a fajlagos gáztermelést*. Az így kapott eredmények lehetővé tették a hatékonyság-térképek felvételét. [P3], [P5], [P6], [P8], [P10], [P11], [P12], [P14], [P15], [P19], [P22]
- a. Fás szárú biomassza pirolízissel történő hasznosítása során a nedvességtartalom növekedése a fajlagos energiakihozatalt, a kémiai hatásfokot és a fajlagos gáztermelést pozitív irányban befolyásolja. A nagyobb nedvességtartalom nagyobb fajlagos energiakihozatalt eredményez. A pirolízis olaj és a pirolízis koks mennyisége a nedvességtartalommal fordított arányban áll.
 - b. Gázosítás során a légfelesleg tényező növelése és a nedvességtartalom növekedése csökkenti a fajlagos energiakihozatalt, a reakció hatásfokát, valamint a fajlagos szintézisgáz-termelést a száraz gázra vonatkozóan, továbbá növeli a nyers szintézisgáz mennyiségét. Az alkalmazott üzemi nyomás növelésével arányosan csökken a fajlagos energiakihozatal, ami a légfelesleg tényező függvényében exponenciális jelleget mutat.

- c. Plazmatechnológia alkalmazása során nagyobb a fajlagos energiakihozatal, mint gázosításnál. Az üzemi nyomás növelésének hatására a fajlagos energia kihozatal monoton csökkenő tendenciát mutat. A csökkenés mértéke 20 bar üzemi nyomás mellett 0,17%-ot képvisel.
- T 3. A tüzelőanyagok kémiai összetételének felhasználásával és a lejátszódó kémiai reakciók ismeretében, *elkészítettem a vizsgált technológiák életciklus-elemzését, és vázoltam az erre vonatkozó életciklus-mátrixokat.* Az elemzések során a nedvességtartalom, gázosításnál pedig a légszelektív tényező hatását is vizsgáltam. [P2], [P4], [P5], [P7], [P9], [P11], [P12], [P14], [P15], [P16], [P18], [P19], [P20], [P22], [P24]
- a. Fás szárú biomasszák pirolízisének a nedvességtartalom növekedése a környezeti hatáskategóriák értékét növeli. 10%-os nedvességtartalom növekedés átlagosan 12,77%-os környezetterhelés növekedéssel jár a vizsgált 46 biomassza kategóriára vonatkozóan.
- b. Hagyományos égetésnél és plazmatechnológiánál a környezeti hatáskategóriák fordítottan arányosak a nedvességtartalommal. A kibocsátás csökkenés mértéke a 46 biomassza kategória átlagában 10%-os nedvességtartalom növekedés esetén, hagyományos égetésnél 3,13%, plazmatechnológiánál 4,70%.
- c. Gázosítással történő hasznosítás során a környezeti hatáskategóriák értékei a nedvességtartalommal fordítottan, a légszelektív tényezővel egyenesen arányosak. A hatásokat függvényekkel írtam le.
- T 4. Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzést végeztem a plazmatechnológiánál alkalmazott különböző gázosító közegek fajlagos energiakihozatalra gyakorolt hatásának függvényében. [P11], [P12], [P15], [P22]
- a. *A palackozott, tiszta szén-dioxid nagy bekerülési költsége miatt, arra az eredményre jutottam, hogy annak segédgázként történő alkalmazása nem gazdaságos a fás szárú biomassza plazmatechnológiával történő kezelése során.* Felírtam egy összefüggést a gazdasági haszonra a szén-dioxid bekerülési költségének és keverési arányának, a villamos energia átvételi árának, valamint az erőgép hatásfokának függvényében.
- b. A vízgőz előállításának nincs közvetlen költsége, mert a szintézisgáz hűtéséből származó hő közvetlenül alkalmazható. A vízgőz, mind önálló segédgázként, mind levegővel keverten történő alkalmazása egyaránt növeli a fajlagos energiakihozatalt. *A vízgőz alkalmazása 40%-os nedvességtartalmú alapanyagig nagyobb haszonnal jár, mint költséggel.*

10. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA, GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁG ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Értekezésem témája a különféle hulladékok energetikai hasznosítására alkalmazott technológiák komplex összehasonlítása. Elsőként definiáltam a hulladék fogalmát, értelmeztem a hasznosítására irányuló lehetőségeket, valamint újrafogalmaztam, újraértelmeztem a hulladék fogalmát. Kiegészítésként bevezettem a másod-nyersanyag, valamint a másod-energiahordozó fogalmakat.

Ha a hulladékokat energiatermelésre szeretnék használni, azaz elsődleges tüzelőanyagot akarunk kiváltani velük, akkor valamilyen termikus kezelési technológiát kell alkalmaznunk. A legismertebb ilyen technológia a hagyományos égetés, ezen kívül a gázosítás, a pirolízis, a plazmatechnológia és az együttégetés áll a rendelkezésünkre. A technológiák kombinálásával új megoldások kerülnek előtérbe, amelyek az alaptechnológiák előnyös tulajdonságait ötvözve, küszöbölik ki a hátrányos sajátosságokat. A kombinációs technológiák terén bevezettem az egylépcsős, azaz a folyamatintegrált, valamint a két és többlépcsős, technológiaintegrált termikus kezelési technológiákat.

Kutatómunkám során a fás szárú biomasszát valamint a települési szilárd hulladékot vizsgáltam. A fás szárú biomasszákat a karbon tartalomra vonatkoztatott fajlagos hidrogén és oxigén tartalom alapján 46 kategóriára osztottam és termokinetikai modellvizsgálatokat végeztem a pirolizálására, gázosítására és plazmatechnológiával történő kezelésére vonatkozóan. Bevezettem a fajlagos energia kihozatal mértékét, ami megmutatja azt, hogy egységnyi tömegű szilárd tüzelőanyag kezelése során mekkora energiataktartalmú szintézisgáz állítható elő. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a nedveségtartalom növekedése a pirolízis során növeli a fajlagos energia kihozatal mértékét, ezen keresztül javítja a reakció határfokát. A gázosításnál és a plazmatechnológiánál ellentétes tendencia figyelhető meg. A modellvizsgálatok eredményeit energetikai hatékonyság térképeken ábrázoltam. E térképek lehetővé teszik, hogy bonyolult számítások és mérések helyett, közvetlenül leolvasva meghatározhatjuk a bemenő alapanyag összetételének megfelelő energia kihozatalokat és hatásfokokat.

A plazmatechnológiára vonatkozóan költség-haszon elemzést végeztem, amely a hagyományos módszerektől eltérően pénzügyi költség és energetikai haszon elemzés-ként fogható fel. Széndioxid, valamint vízgőz segédgázként történő alkalmazását és ezek hatását vizsgáltam. Elmondható, hogy a fás szárú biomassza esetében a vízgőz alkalmazása energetikai és pénzügyi hasznot egyaránt eredményez, így gazdaságos alternatívája lehet a levegővel történő kezelésnek.

Végezetül életciklus-elemzéseket készítettem az összetétel függvényében mind a négy alaptermék-re vonatkozóan, az ismertett biomasszára, valamint települési szilárd hulladékáramokra. Az elvégzett elemzések végeredményeire támaszkodva elkészítettem az életciklus-térképeket, amelyek lehetővé teszik, hogy életciklus-elemző szoftver hiányában is számszerűsíteni tudjuk az egyes technológiák és hulladékok környezeti hatáskategóriáinak értékeit.

A kutatómunkám során elért eredményeim gyakorlati alkalmazhatóságát a bemutatott energetikai hatékonyság- és az életciklus-térképek jelentik. A térképek lehetőséget biztosítanak a különböző összetételű biomasszák energetikai célú hasznosítására szolgáló technológiák összehasonlítására modellezés, mérés és költséges szoftverek alkalmazása nélkül. A térképek alkalmazását példákon keresztül szemléltettem.

Továbbfejlesztési lehetőség az alkalmazott modell pontosságának mérésekkel történő meghatározása, valamint további technológiák vizsgálata jelenti. Jövőbeli célom a pirolízis és a gázosítás folyamatának mérési úton történő vizsgálata, valamint egyes folyamat- és technológiaintegrált technológiák modellezése és összehasonlítása az alaptermék-ekkel.

Tanszékünkön jelenleg ipari partnerekkel közösen folytatott kutatások eredményeként GINOP pályázat keretében létrehozunk egy plazmatechnológiával és gázosító rendszerrel felszerelt laboratóriumot, amely egy ipari berendezés tervezésének és üzemelésének alapjait fekteti le. A kutatómunkám eredményeként kapott elemzések a tervezési folyamat kiinduló adatait szolgáltatják. Az elkészülő berendezéseken lehetőségem nyílik mérések végzésére, valamint további termokinetikai modellvizsgálatok és életciklus-elemzések készítésre, valamint az ismertett eredmények mérési úton történő visszaigazolására.

11. NEW SCIENTIFIC RESULTS - THESIS

- T 1. I have used thermokinetic modeling to determinate the compositions of the gas produced by the thermic utilization technologies. I have executed analysis for different compositions and water conditions of biomass. *I have defined the quantity of specific energy capacity*, which shows the calorific value of the gas produced from the unit of biomass. The units of measure are: MJ/kg_{sf}, and kWh/kg_{sf}. *Knowing these data and the available potential to determine the performance and the design process and of the thermic utilization plant would be simpler.* [P1], [P5], [P6], [P8], [P14]
- T 2. I have analyzed the energy-efficiency of the new thermic utilization technologies. *I have defined the energy conversion and reaction efficiency*, the index of the specific energy capacity and *the index of energy density increment of technologies and auxiliary gases*. The results helped to set up the efficiency-map. [P3], [P5], [P6], [P8], [P10], [P11], [P12], [P14], [P15], [P19], [P22]
- d. The ascendant water condition extend the specific energy capacity, the chemical efficiency and the specific wood gas production by pyrolysis process of wood biomass. The amount of pyroil and pyrocoke and the water condition are reciprocally proportional.
 - e. The ascendant excess air ratio and water condition reduce the energy capacity, the reaction efficiency and the amount of the auxiliary gas of the wood gas produced by gasification process. The ascendant operating pressure reduce the specific energy capacity, which has exponential connection with the excess air ratio.
 - f. The gas produced by plasma technology has greater energy capacity as the gas produced by gasification technology. The ascendant operating pressure reduce the specific energy capacity. By 20 bar operating pressure the specific energy capacity reduce only 0,17%.

- T 3. I have completed the life-cycle assessments of the technologies and the life-cycle maps. I have examined the influence of the water condition, and of the excess air ratio by gasification. [P2], [P4], [P5], [P7], [P9], [P11], [P12], [P14], [P15], [P16], [P18], [P19], [P20], [P22], [P24]
- e. The ascendant water condition extend the environmental impact categories by pyrolysis process of wood biomass. By 10% water condition extending, the environmental impact categories extend averagely 12,77% by the 46 categories of biomass.
 - f. The environmental impact categories and the water condition are reciprocally proportional by conventional and plasma technology. By 10% water condition extending, the emission reduce 3,13% by conventional technology and 4,70% by plasma technology.
 - g. The environmental impact categories and the water condition are reciprocally proportional and the environmental impact categories and the excess air ratio are proportional by gasification technology. I have defined the effects with functions.
- T 4. I have executed energy cost-benefit analysis's of the specific energy capacity of different gases applied by plasma technology. [P11], [P12], [P15], [P22]
- c. *Applying the clean carbon dioxide by plasma technology is not remunerator because of its great investment cost.* I have correlated the profit with the cost of the carbon dioxide, with its titer, with the procurement price of the electrical energy and with the efficiency of the prime mover.
 - d. Producing process of steam has no direct costs, because the heat from cooling the synthesis gas be used directly. The steam as auxiliary gas extend the specific energy capacity. *Applying the steam is more efficient than expensive, until the water condition of the biomass obtain 40%.*

12. SUMMARY RESULTS, TECHNICAL EXPEDIENCE AND FACILITY IMPROVEMENT

Topic of my dissertation is to collate the technologies applied by energy utilization of waste. I have defined firstly the concept of waste, I have construed the facilities of the utilization and I have redrafted the concept of the waste. As complements I have defined the second-row material and second-energy source concepts.

We have to apply some thermic technology, if we wanted to use the waste for energy production. The most known technology is the conventional burning, besides the gasification, pyrolysis, plasma technology are available. Combining the technologies new solutions gain ground, which amalgamate the advantages and eliminate the disadvantages of the elementary technologies. I have defined the one-step, namely the process integrated and the two- or more-step, namely the technology integrated thermic utilization technologies.

I have analyzed the wood biomass and the municipal solid waste. I have divided the wood biomass into 46 category by hydrogen and oxygen content referred to the carbon content and I have executed thermokinetic model analyses for application of pyrolysis, gasification and plasma technology. I have defined the specific energy capacity, which shows the calorific value of the gas produced from the unit of biomass. The results show by increasing water condition the specific energy capacity and the reaction efficiency improve during pyrolysis. Reverse tendency can be noticed by gasification and plasma technology. Energy-efficiency map has been drawn from the results of the model examination. The energy capacities and efficiencies of the different combination biomass can be direct read from these maps.

I have executed energy cost-benefit analysis's of the specific energy capacity of different gases applied by plasma technology, which can be read as financial cost and energy benefit analysis. I have examined the effects of applying of carbon dioxide and steam as auxiliary gas. Applying steam by wood biomass results energy and financial profit.

Finally I have completed the life-cycle assessments of the four elementary technology, of the biomass and of the municipal solid waste. I have drawn the life-cycle assessment maps, which shows us - without a life-cycle assessment software - the environmental impact categories of the waste and technologies.

The technical expedience of my dissertations results are the energy-efficiency and life-cycle assessment maps. The maps open the door to collate the waste-to energy technologies - used for different combination biomass - without applying models, measurements and expensive software products. I have illustrated the adaptation of the maps with examples.

The facility improvements are diagnosing the precision of the model with measurements and further examinations of the technologies. My future plans are examining the process of pyrolysis and gasification with measurements, and setting up models for process integrated and technology integrated technologies and collating them with the elementary technologies.

A laboratory equipped with plasma and gasification technology will be set up at our department as the result of GINOP competition, participating with industrial partners. This laboratory will lay the foundations of the designing and the installation process of an industrial equipment. The results of my dissertation will be the first step in the designing process. Applying the equipment, the showed results can be confirmed with measurements, and further thermokinetic model examinations and life-cycle assessments can be executed.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek Dr. Siménfalvi Zoltán egyetemi docens Úrnak, valamint társ-témavezetőmnek Dr. Mannheim Viktória ügyvezető Úrhölgynek, akik folyamatosan támogattak és segítettek a kutatómunkám során és értekezésem elkészítésének teljes ideje alatt.

Köszönet illeti Prof. Dr. Tisza Miklós professzor Urat, a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola vezetőjét, valamint Prof. Dr. Szabó Szilárd professzor Urat, az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék vezetőjét, az értekezés szakmai tartalmában nyújtott segítségükért és építő kritikai megjegyzéseikért.

Továbbá szeretném köszönetemet kifejezni az Intézet valamennyi oktató és dolgozó munkatársának, valamint hallgatóinak az értekezés megvalósításában a maga területén nyújtott segítségért.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni családomnak, kiemelten édesanyámnak és barátaimnak, hogy kitartó türelmükkel támogatták a doktori értekezésem elkészítését.

*A kutatómunkám a TÁMOP- 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projektek részeként – az **Új Magyarország Fejlesztési Terv** keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.*

*Az értekezésemben bemutatott eredmények a TÁMOP 4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú **Nemzeti Kiválóság Program** – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.*

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN KÉSZÍTETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Idegen nyelven

- [P1] BODNÁR, I.: *Energy Efficiency Analysis of the Basic and the Combined Thermic Treatment Processes*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara- International Journal of Engineering, Vol. XIII. No. 2. 2015. pp. 33-38.
- [P2] BODNÁR, I.: *Global Warming Potential of The Thermic Treatment Processes*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara- International Journal of Engineering, Vol. XII. No. 2. 2014. pp. 121-126.
- [P3] BODNÁR, I.: *Energy Efficiency Analysis of the Thermic Treatment Process*. MultiScience - XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference. University of Miskolc, Miskolc, Hungary, 2014. D13, pp. 1-8. (ISBN 978-963-358-051-6)
- [P4] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Life Cycle Assessment for thermic treatments of organic waste*, Enviro-management 2012: Municipal and regional waste management projects in Europe, October 9-11, 2012. pp. VII/1-17, Štrbské Pleso, Slovakia. (ISBN 978-80-85655-33-9)

Magyar nyelven

- [P5] BODNÁR, I.: *Települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának komplex vizsgálata*. Műszaki Tudomány az Észak- Kelet Magyarországi Régióban 2015. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2015. pp. 47-52. (ISBN 978-963-7064-32-6)
- [P6] PLÁSZTÁN, B., BODNÁR I.: *Biomassza gázosításának termokinetikai modellezése gázösszetétel és energetikai hatékonyság szempontjából*. Műszaki Tudomány az Észak- Kelet Magyarországi Régióban 2015. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2015. pp. 471-476. (ISBN 978-963-7064-32-6)

- [P7] BODNÁR, I., SIMÉNFALVI, Z.: *Fagázosítás élelciklus-elemzése különböző gázosító közegek alkalmazása esetén*, XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT 2015) Konferencia kiadvány, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Gépészeti Szakosztály, Csíksomlyó, Románia, 2015. pp. 54-57. (ISSN 2068-1267)
- [P8] BODNÁR, I.: *Fagázosítás energetikai hatékonyság- vizsgálata különböző gázosító közegek alkalmazásával*, Műszaki Tudományos Közlemények 3. A XX. Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszak Előadásai, Erdélyi Múzeum- Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, 2015. pp. 99-102. (ISSN 2393-1280)
- [P9] BODNÁR, I.: *A fagáz, mint alternatív üzemanyag környezetterhelési mutatóinak összehasonlítása az autógáz és a benzin üzemű járművek élelciklus-elemzéssel kapott értékeivel*, ECONOMICA a Szolnoki Főiskola Tudományos közleményei. VII. új évf. 3. sz. 2014. pp. 35-44.
- [P10] BODNÁR, I.: *Biomasszából előállított szintézisgáz alternatív üzemanyagként való alkalmazásának vizsgálata*. Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa, 4. kötet. 2014. 1. sz. pp. 77-92.
- [P11] BODNÁR, I.: *Kombinált termikus kezelési technológiák Közép- és Kelet európai alkalmazhatóságának vizsgálata*, Műszaki Tudományos Füzetek, A XIX. Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka (FMTÜ) Nemzetközi Tudományos Konferencia kiadványa, Erdélyi Múzeum- Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, 2014. pp. 89-92. (ISSN 2067-6 808)
- [P12] BODNÁR, I.: *Termikus kezelési technológiák vizsgálata háromszögmodell segítségével*, Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa. 3. kötet. 2013. 1-2. sz. pp. 203-214.
- [P13] BODNÁR, I.: *Termikus hulladékkezelési technológiák gazdasági és gazdaságossági kérdései*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIV. évfolyam 5. sz. 2013, pp. 33-36.
- [P14] BODNÁR, I.: *A hulladék, mint másodnyersanyag, és mint kimeríthetetlen megújuló energiaforrás*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIV. évfolyam 5. sz. 2013, pp. 3-10.
- [P15] BODNÁR, I.: *Szerves ipari hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata üvegházhatású gázok kibocsátása tekintetében kapcsolt energiatermelés esetén*, A „Tavaszi Szél” című Konferencia kiadványa, II. kötet, Budapest, 2013. pp. 398-407. (ISBN 978-963-89560-2-6)
- [P16] BODNÁR, I.: *Vegyipari hulladékok termikus ártalmatlanításának vizsgálata és az optimális technológia kiválasztását elősegítő módszer bemutatása*, A „Tudományos Próbatálya” című VI. PhD Konferencia elektronikus kiadványa, Budapest, 2013. pp. 256-265. (ISBN 978-963-88433-8-8)
- [P17] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Hulladékkezelési eljárások környezetterhelési és energiahatékonysági vizsgálata*, Energiagazdálkodás, Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület tudományos folyóirata, 54. évf. 3. sz. 2013. pp. 8-11.

- [P18] BODNÁR, I.: *Növényvédőszer hulladékok termikus kezelési eljárásainak összehasonlítása*, Doktoranduszok Fóruma című konferencia, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, 2012. pp. 12-17.
- [P19] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Termikus kezelési technológiák vizsgálata szerves ipari hulladékokra*. ECO-MATRIX, Az LCA Center- Magyar Életciklus Elemzők Szakmai Egyesületének on-line folyóirata, 2012. 1-2 sz. pp. 39-51.
- [P20] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Hulladékból energia sokféleképpen. Hulladékkezelési eljárások vizsgálata szerves hulladékokra életciklus-elemzéssel (2. rész)*, Zöld Ipar Magazin, 13. évf. 1. sz. 2013. pp. 8-9.
- [P21] BODNÁR, I., MANNHEIM, V.: *Szerves ipari hulladékok kezelésére szolgáló technológiák vizsgálata környezetterhelési, energiahatékonysági, és gazdasági aspektusokból*, Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa, 2. kötet. 2012. 1. sz. pp. 9-20.
- [P22] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Súlyozási rendszer kidolgozása termikus ártalmatlansági eljárások összehasonlíthatóságára vonatkozóan*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIII. évf. 10. sz. 2012, pp. 37-40.
- [P23] BODNÁR, I.: *Növényvédőszer gyártástechnológiája, valamint hulladékaik kezelési módjai az Európai Unióban*, Diáktudomány, A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból, 4. kötet. 1. sz. 2012. pp.69-74.
- [P24] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Veszélyes hulladék-kezelés és LCA. Termikus hulladék-kezelési eljárások vizsgálata életciklus-elemzéssel*, Zöld Ipar Magazin. 12. évf. 8. sz. 2012. pp. 27-29.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] BARÓTFI, I.: *Környezetecnika*, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2000. p. 981.
- [2] KUN-SZABÓ, T.: *A környezetvédelem minőségmenedzsmentje*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1999. p. 393.
- [3] KÓSI, K., VALKÓ, L.: *Környezetmenedzsment*, Tipotex Kiadó, Budapest, 2008. p. 307.
- [4] Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2014-2020. 2013. p. 296.
- [5] A hulladékról szóló 2012. évi CLXXXV. törvény. Magyar Közlöny. 2012. 160. sz. p. 44.
- [6] BODNÁR, I., MANNHEIM, V.: *Szerves ipari hulladékok kezelésére szolgáló technológiák vizsgálata környezetterhelési, energiahatékonysági és gazdaságossági aspektusokból*, Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem közleménye, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2012. 2. kötet, 1. szám, pp. 9–20.
- [7] ANTONIO, C., CAPUTO, PACIFICO, M., PELAGAGGE: *RDF production plants: I Design and costs*. Applied Thermal Engineering 22. pp. 423–437. 2002.
- [8] FELLNER, J., RECHBERGER, H.: *Abundance of 14C in biomass fractions of wastes and solid recovered fuels*. Waste Management 29. pp. 1495–1503. 2009.
- [9] RED, T., B., DAS, A.: *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*, Solar Energy Research Institute, Colorado, 1988. p. 148.
- [10] BASU, P.: *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory*, Second edition, Elsevire, San Diego, 2013. p. 529.
- [11] DR. CSÖKE, B.: *Hulladékgazdálkodás*, Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet, 2. javított kiadás, Veszprém, 2011. p. 699.
- [12] SZUHI, A.: *Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők*. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium 2009. p. 36.
- [13] SZUHI, A.: *Az új termikus technológiák környezeti hatásai (pirolízis, elgázosítás és plazma technológia)*. Humusz Szövetség és Vidékfejlesztési Minisztérium 2013. p. 14.
- [14] DR. ÖRVÖS, M.: *Ártalmatlanítás termikus eljárásokkal*. Oktatási segédlet BME, 2011. p. 31.

- [15] DR. HORNYÁK, M., BÁNHIDY, J., DR. KOVÁCS, E., DR. KOVÁCS, L., DR. VARGA, P.: „Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a hulladékégetők engedélyezése során.” Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest 2008. p. 386.
- [16] MANNHEIM, V: *Szerves vegyipari hulladékok termikus kezelése plazmatechnológiával. Energiagazdálkodás.* Budapest, 2010. 51.évf. 3. sz. p. 21–23.
- [17] DR. GERGELY, S.: *Biomasszatüzelés.* Károly Róbert Főiskola, 2012.
- [18] BÜKI, G.: *Kapcsolt energiatermelés.* Műegyetemi Kiadó, Budapest 2007. p. 420.
- [19] BÜKKI, G.: *Erőművek.* Műegyetemi Kiadó, Budapest 2004. p. 608.
- [20] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium- Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve; A 2020-ig terjedő megújuló energiahordozó felhasználás alakulásáról, 2010. december. p. 220.
- [21] DR. LACZÓ, F.: *Bioüzemanyagok előállításnak lehetőségei Magyarországon.* Környezettudományi Központ, Budapest 2008. p. 45.
- [22] DR. TÓTH, P., DR. BULLA, M., DR. NAGY, G.: *Energetika.* 2011. p. 204.
- [23] CSOKNYAI, T., KIRCSI, A., KALMÁR, F., TALAMON, A.: – *Környezettechnika.* Terc Kft., 2013. p. 244.
- [24] BÍRÓ, B.: *Biomassza hasznosítás.* EDUTUS Főiskola, 2012. p. 86.
- [25] KAZAI, ZS.: *Zöld energiát okosan- avagy- A biomassza energetikai célú hasznosításának környezeti fenntarthatósági feltételei.* Energiaklub, 2008. p. 25.
- [26] DR. NAGY, B.: *Újrahasznosítási ismeretek.* Szent István Egyetem. Oktatási segédlet, 2011. p. 159.
- [27] ANGYAL, ZS., BALLABÁS, G., CSÜLLÖG, G., KARDOS, L., MUNKÁCSY, B., PONGRÁCZ, R., SZABÓ, M.: *A környezetvédelem alapjai.* Typotex Kiadó, Budapest, 2012. p. 246.
- [28] MURPHY, J. D., MCKEOGH, E.: *Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste.* Renewable Energy 29. pp. 1043–1057. 2004.
- [29] MOUNTOURIS, A., VOUTSAS, E., TASSIOS, D.: *Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization.* Energy Conversion and Management 49. pp. 2264–2271. 2008.
- [30] HUANG, H., TANG, L.: *Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology.* Energy Conversion and Management 48. pp. 1331–1337. 2007.
- [31] PATTERSON, M. G.: *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues.* Energy Policy. Vol. 24, No. 5. pp. 377–390. 1996.
- [32] BÜKKI, G., SZEDERKÉNYI S.: *EU-direktíva a kapcsolt energiatermelésről.* Magyar Energetika. 9. évf. 5. szám. 2002, pp. 45–48.
- [33] HILL, T. & DOWEN, S.: *Pyrolysis and gasification.* Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UK WIN), 2010. pp. 1–9.

- [34] HOGG, R.: *Energy from waste by pyrolysis and gasification the experience and performance of an operational plant*. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India, pp. 385–392. 2007.
- [35] YOUNG, G., C.: *Municipal solid waste to energy conversion processes: Economic, technical, and renewable comparisons*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 2010. p. 398.
- [36] HELSEN, L., BOSMANS, A.: *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process*. Proceedings of the International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, Houthalen-Helchteren, Belgium, pp. 133–180. 2010.
- [37] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report: Climate Change (AR4) 2007. p. 104.
- [38] HSIEN, H., KHOO: *Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies*. Waste Management 29, pp. 1892–1900. 2009.
- [39] GRÓF, GY., KÖNCZÖL, S.: *Gázmotoros kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés. Háttér tanulmány az üzemeltetési ajánlás kidolgozásához*. 2008.
- [40] ÖSZ, J.: *Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés*. BME, Segédlet, 2011.
- [41] WANG, Y., KINOSHITA, C. M.: *Kinetic model of biomass gasification*. Solar Energy, Vol. 51. No. 1. 1993, pp. 19–25.
- [42] HANAOKA, T., INOUE UNO, S., OGI, T., MINOWA, T.: *Effect of wood biomass components on air-steam gasification*. Biomass and Bioenergy, Vol. 28. No. 1. 2005, pp. 69–75.
- [43] HATZILYBERIS, K. S.: *Design of an indirect heat rotary kiln gasifier*. Fuel Processing Technology. 92, 2011. pp. 2429–2454.
- [44] ZHU, Y., CHAI, X., LI H., ZHAO, Y., WEI, Y.: *Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill*. Thermochemica Acta. 464, 2007. pp. 59–64.
- [45] FAITLI, J., CSÓKE, B., LÁSZLÓ, T., GYÖRFI, A., KESKÉS, Á., BURAIL, L., ÁGOSTON, CS., BÉRES, A., NAGY, GY.: *Települési szilárd hulladék összetételének vizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmány, Miskolci Egyetem, 2006. p. 35.
- [46] PENNINGER, A.: *Tüzeléstechnika*. BME, Oktatási segédlet, 2009. p. 240.
- [47] TILLMAN, D. A.: *Wood as an Energy Resource*. Wood Science and Technology. Vol. 16. No. 4, 1982. p. 286.
- [48] BAU, B. V., SHETH, P. N.: *Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor*. Energy Conversion and Management. Vol. 47. No. 15–16. 2006. pp. 2602–2611.
- [49] MANNHEIM, V.: *Life Cycle Assessment (LCA) a hulladékgazdálkodásban*. Hulladék-gazdálkodási Tanácsadó Kézikönyv. 9. rész/ IV. sz. melléklet. DASHÖFER Szakkiadó. Budapest, 48. aktualizálás, 2011. november. pp. 187–198.
- [50] ZAINAL, Z., A., ALI, R., LEAN, C., H., SEETHARAMU, K., N.: *Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modelling for different biomass material*. Energy Conversion and Management. Vol. 42. 2001. pp. 1499–1515.

- [51] SZÉPVÖLGYI, J.: *Anyagok átalakítása magas hőmérsékletű plazmákban*. Műszerügyi és Méréstechnikai Közlemények. 2000. (36. évf.) 65. sz. p. 4.
- [52] RAJVANSHI, K., A.: *Biomass gasification*. Alternative Energy in Agriculture. Vol. 2. No. 4. 1986. pp. 83–102.
- [53] SCHUSTER, G., LÖFFER, G., WEIGEL, K., HOFBAUER, H.: *Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study*. Bioresource Technology. Vol. 77. 2001. pp. 71–79.
- [54] VARGA, M., CSITÁRI, Cs.: *Faelgázosításon alapuló kogenerációs rendszer fejlesztése*. GÉP magazin. LXIV. évf. 5. sz. 2013. pp 62–67.
- [55] DR. KAPROS T.: *Erőműi CCS technológiák költségei, a piacképességet fokozó intézkedések*. hulladékOnline, elektronikus folyóirat. 3. évf. 2012. 2. sz. pp. 1–16.
- [56] KÓRÓDI, M. (szerkesztő): *Turizmus kutatások módszertana*. Pécsi Tudományegyetem. 2011. p. 200.
- [57] A közigazgatási Informatikai Bizottság 29. számú ajánlása: *Az elektronikus közigazgatási projektek költség-haszon elemzéséről*. 2009. p. 69.
- [58] DR. HORVÁTH, ZS.: *Képletgyűjtemény*. Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest, 2011.
- [59] DR. BOZSIK, S.: *Pénzügyi számítások*. Oktatási segédlet. Miskolci Egyetem, 2009. p. 175.
- [60] MANNHEIM, V., SIMÉNFALVI, Z.: *LCA and new mathematical method for thermic treatment processes by industrial organic waste*. IN-TECH 2012. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH. ISBN 978-953-6326-77-8. Rijeka, Croatia, 2012. pp. 451–454.
- [61] GYULAI, I.: *A biomassza dilemma*. Negyedik átdolgozott kiadás, Magyar Természetvédők Szövetsége, Föld Barátai Magyarország, 2010. p. 116.
- [62] SZEMMELVEISZ, TAMÁSNÉ: *Fás- és lágyszárú biomasszák tüzelhetőségi feltételeinek vizsgálata*. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstan és Hőenergia Tanszék, 2006. p. 100.
- [63] THOMPSON, W.: *Bevezetés a plazma fizikába*. Budapest, 1970.
- [64] HIGMAN, C., BURGT VAN, DER, M.: *Gasification*. Elsevier. Burlington, USA, Second edition, 2008. p. 423.
- [65] YOUNG, G., C.: *Municipal solid waste to energy conversion process, economic, technical, and renewable comparisons*. John Will & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2010. p. 379.
- [66] WAMPLER, T., P.: *Applied pyrolysis handbook*. Taylor & Francis, Second edition, 2007. p. 285.
- [67] LEE, S., SPEIGHT, J., G., LOYALKA, S., K.: *Handbook of alternative fuel technologies*. Taylor & Francis, 2015. p. 686.
- [68] KLINGHOFFER, N., B., CASTALDI, M., J.: *Waste to energy conversion technology*. Woodhead Publishing, Philadelphia, USA, 2013. p. 234.
- [69] MOUNTOURIS, A., VOUTSAS, E., TASSIOS, D.: *Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis*. Energy Conversion and Management. Vol. 47. 2006. pp. 1723–1737.

- [70] MORLY, C.: *Method for calculating equilibrium compositions at specified temperature*. Gaseq, a chemical equilibrium program for windows. www.gaseq.co.uk 2005. p. 6.
- [71] MANN, M., M., SPATH, P., L.: *Life Cycle Assessment of a biomass gasification combined-cycle system*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, 1997. p. 160
- [72] CORTI, A., LOMBARDI, L.: *Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO₂ emission: Performance analysis and life cycle assessment (LCA)*. Energy, Vol. 29. 2004. pp. 2109–2124.
- [73] ARGYELÁN, J.: *Korszerű vegyipari műveletek*. Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2003. p. 207.
- [74] Elagroudy, S., Elkady, T., Ghobrial, F.: *Comparative Cost Benefit Analysis of Different Solid Waste Management Scenarios in Basrah, Iraq*. Journal of Environmental Protection, Vol. 2. 2011. pp. 555-563.
- [75] Nemzeti Fejlesztési Ügynökség: *Módszertani útmutató költség-haszon elemzéshez ROP támogatáshoz*. 2009. p. 60.
- [76] Fruergaard, T., Astrup, T.: *Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective*. Waste Management. Vol. 31. 2011. pp. 572-582.
- [77] Owsiankiak, M., Laurent, A., Bjorn, A., Hauschild, M., Z.: *IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: a case study-based comparison*. International Journal Life Cycle Assess. Vol. 19. 2014. pp. 1007-1021.
- [78] Zaman, A., U.: *Life cycle assessment of pyrolysis-gasification as an emerging municipal solid waste treatment technology*. International Journal Science Technology. Vol. 10. 2013. pp. 1029-1038.

MELLÉKLETEK**I. MELLÉKLET**

Vizsgált biomasszák elemi összetétele

I.1. táblázat: Vizsgált biomassza csoportok elemi összetétele

| Csoport | Karbon | Hidrogén | Oxigén | Nitrogén | Hamu |
|---------|--------|----------|--------|----------|-------|
| 1 | 55,20% | 5,80% | 37,50% | 0,50% | 1,00% |
| 2 | 54,53% | 6,16% | 37,81% | 0,50% | 1,00% |
| 3 | 53,49% | 6,19% | 38,82% | 0,50% | 1,00% |
| 4 | 52,92% | 6,38% | 39,20% | 0,50% | 1,00% |
| 5 | 54,47% | 5,27% | 38,76% | 0,50% | 1,00% |
| 6 | 54,47% | 5,27% | 38,76% | 0,50% | 1,00% |
| 7 | 54,50% | 5,50% | 38,50% | 0,50% | 1,00% |
| 8 | 54,15% | 5,69% | 38,66% | 0,50% | 1,00% |
| 9 | 53,40% | 5,80% | 39,30% | 0,50% | 1,00% |
| 10 | 52,33% | 5,93% | 40,24% | 0,50% | 1,00% |
| 11 | 51,55% | 6,05% | 40,90% | 0,50% | 1,00% |
| 12 | 50,40% | 6,11% | 41,99% | 0,50% | 1,00% |
| 13 | 52,20% | 5,05% | 41,25% | 0,50% | 1,00% |
| 14 | 52,00% | 5,25% | 41,25% | 0,50% | 1,00% |
| 15 | 51,00% | 5,30% | 42,20% | 0,50% | 1,00% |
| 16 | 50,50% | 5,50% | 42,50% | 0,50% | 1,00% |
| 17 | 49,68% | 5,62% | 43,20% | 0,50% | 1,00% |
| 18 | 49,00% | 5,75% | 43,75% | 0,50% | 1,00% |
| 19 | 48,00% | 5,85% | 44,65% | 0,50% | 1,00% |
| 20 | 47,00% | 5,90% | 45,60% | 0,50% | 1,00% |
| 21 | 46,20% | 6,02% | 46,28% | 0,50% | 1,00% |
| 22 | 51,60% | 5,00% | 41,90% | 0,50% | 1,00% |
| 23 | 50,35% | 5,05% | 43,10% | 0,50% | 1,00% |
| 24 | 49,60% | 5,20% | 43,70% | 0,50% | 1,00% |

| | | | | | |
|----|--------|-------|--------|-------|-------|
| 25 | 48,56% | 5,29% | 44,65% | 0,50% | 1,00% |
| 26 | 47,88% | 5,42% | 45,20% | 0,50% | 1,00% |
| 27 | 46,80% | 5,50% | 46,20% | 0,50% | 1,00% |
| 28 | 45,65% | 5,55% | 47,30% | 0,50% | 1,00% |
| 29 | 44,90% | 5,60% | 48,00% | 0,50% | 1,00% |
| 30 | 44,10% | 5,70% | 48,70% | 0,50% | 1,00% |
| 31 | 49,00% | 4,90% | 44,60% | 0,50% | 1,00% |
| 32 | 47,70% | 5,00% | 45,80% | 0,50% | 1,00% |
| 33 | 46,85% | 5,10% | 46,55% | 0,50% | 1,00% |
| 34 | 44,90% | 5,10% | 46,50% | 0,50% | 1,00% |
| 35 | 44,70% | 5,25% | 48,55% | 0,50% | 1,00% |
| 36 | 43,70% | 5,30% | 49,50% | 0,50% | 1,00% |
| 37 | 42,95% | 5,40% | 50,15% | 0,50% | 1,00% |
| 38 | 41,60% | 5,40% | 51,50% | 0,50% | 1,00% |
| 39 | 41,00% | 5,50% | 52,00% | 0,50% | 1,00% |
| 40 | 44,80% | 4,80% | 48,90% | 0,50% | 1,00% |
| 41 | 43,90% | 4,95% | 49,65% | 0,50% | 1,00% |
| 42 | 43,50% | 5,10% | 49,90% | 0,50% | 1,00% |
| 43 | 42,60% | 5,10% | 50,80% | 0,50% | 1,00% |
| 44 | 40,90% | 5,10% | 52,50% | 0,50% | 1,00% |
| 45 | 40,80% | 5,20% | 52,50% | 0,50% | 1,00% |
| 46 | 40,30% | 5,40% | 52,80% | 0,50% | 1,00% |

II. MELLÉKLET

Biomassza átszámítása felolba.

1 kg száraz tüzelőanyag elemi összetétele:

Széntartalom: $Ms_{z_1} := 0.552$

Hidrogéntartalom: $Ms_{z_2} := 0.058$

Oxigéntartalom: $Ms_{z_3} := 0.375$

Nitrogéntartalom: $Ms_{z_4} := 0.005$

Hamutartalom: $Ms_{z_5} := 0.01 \quad i := 1..5 \quad Ms := \sum_i Ms_{z_i} = 1.00000$

Nedvességtartalom: $\%_{H_2O} := 0.15$

1kg nedves tüzelőanyag elemi összetétele:

$$m_i := \frac{Ms_{z_i} \cdot \text{kg}}{Ms} \quad m_0 := \%_{H_2O} \cdot \text{kg}$$

$$i := 0..5 \quad M_n := \sum_i m_i = 1.00000 \text{kg}$$

$kmol := 1000 \text{mol}$

A tüzelőanyag fenoltartalmának (C₆H₅OH) meghatározása:

$$n_{\text{fenol}} := \frac{m_1}{6 \cdot 12.0110 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

A fenoltartalomhoz tartozó elemek tömege:

$$m_H := 6 \cdot n_{\text{fenol}} \cdot 1.0079 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0.03937 \text{kg}$$

$$m_C := 6 \cdot n_{\text{fenol}} \cdot 12.0110 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0.46920 \text{kg}$$

$$m_O := n_{\text{fenol}} \cdot 15.9994 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0.10417 \text{kg}$$

A fenoltartalommal korrigált tüzelőanyag összetétel:

$$M_0 := m_0 \quad M_1 := m_1 - m_C \quad M_2 := m_2 - m_H \quad M_3 := m_3 - m_O \quad M_4 := m_4 \quad M_5 := m_5$$

$$M_6 := m_H + m_C + m_O$$

1kg nedves tüzelőanyag összetétele sorrendben:

- víztartalom

- széntartalom

- hidrogéntartalom

- oxigéntartalom

- nitrogéntartalom

- hamutartalom

- fenoltartalom

$$M = \begin{pmatrix} 0.15000 \\ 0.00000 \\ 0.00993 \\ 0.21458 \\ 0.00425 \\ 0.00850 \\ 0.61274 \end{pmatrix} \text{kg}$$

$$i := 0..6 \quad M_f := \sum_i M_i = 1.00000 \text{kg}$$

II.1. ábra: Biomasszák átszámítása felolba

III. MELLÉKLET

Gaseq- modellek és eredmények

Gaseq

File Edit Units StdProblems Mixtures Constraints Help

Problem Type
 Frozen Chemistry

Input File Page Title

| Reactants | | | | Products | | | |
|-----------|---------|----------|---|----------|-----------|----------|---|
| Species | Mass | MassFrac | K | Species | Mass | MassFrac | K |
| H2O(L) | 0.15000 | 0.15129 | | N2 | 0.00423 | 4.27e-03 | |
| C(S) | 0.00000 | 0.00000 | | H2 | 0.01878 | 0.01894 | |
| H | 0.00993 | 0.01001 | | CO | 0.02850 | 0.02875 | |
| O | 0.21458 | 0.21642 | | HCN | 1.455e-09 | 1.47e-09 | |
| N | 0.00425 | 4.29e-03 | | H2O | 0.23082 | 0.23280 | |
| C6H5OH | 0.61274 | 0.61799 | | CO2 | 0.31728 | 0.32000 | |
| air | 0.00000 | 0.00000 | | H | 1.664e-14 | 1.68e-14 | |
| | | | | OH | 9.268e-17 | 9.35e-17 | |
| | | | | O | 2.330e-28 | 2.35e-28 | |
| | | | | CN | 4.986e-26 | 5.03e-26 | |
| | | | | NH3 | 2.106e-05 | 2.12e-05 | |
| | | | | CH4 | 0.08546 | 0.08619 | |
| | | | | C2H4 | 1.016e-08 | 1.03e-08 | |
| | | | | C2H2 | 1.213e-13 | 1.22e-13 | |
| | | | | CH3 | 2.403e-12 | 2.42e-12 | |
| | | | | NO | 4.794e-21 | 4.84e-21 | |
| | | | | CH2O | 1.687e-08 | 1.70e-08 | |
| | | | | HCO | 4.421e-15 | 4.46e-15 | |
| | | | | NH2 | 2.015e-17 | 2.03e-17 | |
| | | | | NH | 1.621e-25 | 1.63e-25 | |
| | | | | N | 4.821e-31 | 4.86e-31 | |
| | | | | CH | 1.295e-35 | 1.31e-35 | |
| | | | | CH2 | 9.143e-25 | 9.22e-25 | |
| | | | | C(S) | 0.30640 | 0.30903 | |
| | | | | AR | 0.00000 | 0.00000 | |

Stoichiometry, Phi 0,000 Set.. UniformT

Temperature, K

Pressure, atm

Volume Products/Reactants 1,5974

Moles Products/Reactants 1,59744

H0, kJ/mol -91,702

S0, J/mol/K 145,496

Cp, J/mol/K 32,545

Gamma, Cp/Cv 1,343

Mean Molecular Weight, g 16,16

Density, kg/m3 0,25481

Sound speed, m/s 730,6

Enthalpy, H, kJ/kg -5673,54

Entropy, S, J/kg/K 9001,77

Intern Energy, U, kJ/kg -6071,17

Free Energy, G, kJ/kg -12631,91

Cp, J/kg/K 2013,53

Volume, m3 63,432

Molecules/cc 9,49E+18

Moles/cc 1,58E-05

Viscosity, kg/m/s 2,81E-05

KinematicVisc, m2/s 1,10E-04

ThermCond, J/m/K/s 1,60E-01

ThDiffusivity, m2/s 3,11E-04

12
Auto-increment a reactant conc or property by double clicking it.

III.1. ábra: Piroлизis modellezése Gaseq szoftverben

Gaseq

File Edit Units StdProblems Mixtures Constraints Help

Problem Type
 Equilibrium at defined T and P Frozen Chemistry

Input File Page Title
 Previous Next

Reactants

| Species | Mass | MassFrac | K |
|---------|---------|----------|---|
| H2O(L) | 0,15000 | 0,03004 | |
| C(S) | 0,00000 | 0,00000 | |
| H | 0,00993 | 1,99e-03 | |
| O | 0,21458 | 0,04298 | |
| N | 0,00425 | 8,51e-04 | |
| C6H5OH | 0,61274 | 0,12272 | |
| air | 4,00163 | 0,80143 | |

View Species
 Add Delete
 Clear Reacts Clear Prods
 Clear All R>>P R<<P

Stoichiometry, Phi 1,428 Set.. Uniform T

H O N C AR

Calculate (F10)

5
 Auto-increment a reactant conc or property by double clicking it.

| Reactants | | Temperature, K | Products | |
|-----------|--|---------------------------|-----------|--|
| 1123 | | 1123, | | |
| 1,0 | | Pressure, atm | 1,0 | |
| | | Volume Products/Reactants | 1,0264 | |
| | | Moles Products/Reactants | 1,02636 | |
| 56,338 | | H0, kJ/mol | -64,239 | |
| 240,971 | | S0, J/mol/K | 245,351 | |
| 37,995 | | Cp, J/mol/K | 37,391 | |
| 1,280 | | Gamma, Cp/Cv | 1,286 | |
| 28,28 | | Mean Molecular Weight, g | 27,55 | |
| 0,3069 | | Density, kg/m3 | 0,29901 | |
| 649,9 | | Sound speed, m/s | 659,9 | |
| 1992,11 | | Enthalpy, H, kJ/kg | -2331,33 | |
| 8520,66 | | Entropy, S, J/kg/K | 8904,21 | |
| 1661,96 | | Intern Energy, U, kJ/kg | -2670,18 | |
| -7576,59 | | Free Energy, G, kJ/kg | -12330,76 | |
| 1343,48 | | Cp, J/kg/K | 1356,99 | |
| 92,1527 | | Volume, m3 | 92,153 | |
| 6,54E+18 | | Moles/cc | 6,54E+18 | |
| 1,09E-05 | | Moles/cc | 1,09E-05 | |
| 4,65E-05 | | Viscosity, kg/m/s | 4,22E-05 | |
| 1,52E-04 | | KinematicVisc, m2/s | 1,41E-04 | |
| 3,30E-01 | | ThermCond, J/m/K/s | 1,79E-01 | |
| 8,01E-04 | | ThDiffusivity, m2/s | 4,41E-04 | |

Products

| Species | Mass | MassFrac | K |
|---------|-----------|----------|---|
| N2 | 3,02674 | 0,60618 | |
| H2 | 0,02211 | 4,43e-03 | |
| CO | 0,38672 | 0,07745 | |
| HCN | 7,050e-08 | 1,41e-08 | |
| H2O | 0,39298 | 0,07870 | |
| CO2 | 1,11159 | 0,22262 | |
| H | 1,904e-09 | 3,81e-10 | |
| OH | 3,402e-10 | 6,81e-11 | |
| O | 5,713e-17 | 1,14e-17 | |
| CN | 1,105e-17 | 2,21e-18 | |
| NH3 | 1,013e-05 | 2,03e-06 | |
| CH4 | 8,089e-07 | 1,62e-07 | |
| C2H4 | 1,226e-13 | 2,46e-14 | |
| C2H2 | 4,943e-14 | 9,90e-15 | |
| CH3 | 2,862e-12 | 5,73e-13 | |
| NO | 5,417e-12 | 1,08e-12 | |
| CH2O | 2,886e-08 | 5,78e-09 | |
| HCO | 4,467e-11 | 8,95e-12 | |
| NH2 | 2,310e-12 | 4,63e-13 | |
| NH | 1,507e-16 | 3,02e-17 | |
| N | 3,088e-19 | 6,19e-20 | |
| CH | 2,573e-25 | 5,15e-26 | |
| CH2 | 3,173e-19 | 6,36e-20 | |
| AR | 0,05298 | 0,01061 | |
| C(S) | 0,00000 | 0,00000 | |

III.1. ábra: Gázosítás modellezése Gaseq szoftverben

File Edit Units StdProblems Mixtures Constraints Help

Problem Type
 Equilibrium at defined T and P Frozen Chemistry

Input File Page Title
 Previous Next

Reactants

| Species | Mass | MassFrac | K |
|---------|---------|----------|---|
| air | 2.68910 | 0.71120 | |
| C6H5OH | 0.57670 | 0.15252 | |
| H | 0.00934 | 2.47e-03 | |
| H2O(L) | 0.30000 | 0.07934 | |
| O | 0.20196 | 0.05341 | |
| N | 0.00400 | 1.06e-03 | |

View Species
 Add Delete
 Clear Reacts Clear Prods
 Clear All R₂>P R₂<P

Stoichiometry, Phi 2,000 Set... Uniform T

NOARCH

Calculate (F10)

Auto-increment a reactant conc or property by double clicking it.

| Reactants | Temperature, K | Products |
|-----------|-----------------------------------|-----------|
| 3273. | 1273. | |
| 1,0 | Pressure, atm | 1,0 |
| | Volume Products/Reactants | 0,4233 |
| | Moles Products/Reactants | 1,08833 |
| 147,209 | HO, kJ/mol | -58,611 |
| 267,784 | SO, J/mol/K | 247,044 |
| 41,727 | Cp, J/mol/K | 37,622 |
| 1,249 | Gamma, Cp/Cv | 1,284 |
| 27,44 | Mean Molecular Weight, g | 25,21 |
| 0,1022 | Density, kg/m ³ | 0,24136 |
| 1112,6 | Sound speed, m/s | 733,9 |
| 5364,76 | Enthalpy, H, kJ/kg | -2324,68 |
| 9758,88 | Entropy, S, J/kg/K | 9798,39 |
| 4373,05 | Intern Energy, U, kJ/kg | -2744,47 |
| -26576,06 | Free Energy, G, kJ/kg | -14798,03 |
| 1520,66 | Cp, J/kg/K | 1492,17 |
| 268,5803 | Volume, m ³ | 104,462 |
| 2,24E+18 | Molecules/cc | 5,77E+18 |
| 3,72E-06 | Moles/cc | 9,57E-06 |
| 9,21E-05 | Viscosity, kg/m/s | 4,30E-05 |
| 9,02E-04 | Kinematic Visc, m ² /s | 1,78E-04 |
| 7,15E-01 | ThermCond, J/m/K/s | 2,54E-01 |
| 4,60E-03 | ThDiffusivity, m ² /s | 7,04E-04 |

Products

| Species | Mass | MassFrac | K |
|---------|-----------|----------|---|
| N2 | 2.03510 | 0.53823 | |
| H2 | 0.03593 | 0.00950 | |
| CO | 0.59034 | 0.15613 | |
| HCN | 2.125e-07 | 5.62e-08 | |
| H2O | 0.39355 | 0.10408 | |
| CO2 | 0.69054 | 0.18263 | |
| H | 3.697e-08 | 9.78e-09 | |
| OH | 9.078e-09 | 2.40e-09 | |
| O | 1.650e-14 | 4.36e-15 | |
| CN | 1.057e-15 | 2.79e-16 | |
| NH3 | 1.029e-05 | 2.72e-06 | |
| CH4 | 4.397e-07 | 1.16e-07 | |
| C2H4 | 1.811e-13 | 4.79e-14 | |
| C2H2 | 3.888e-13 | 1.03e-13 | |
| CH3 | 1.962e-11 | 5.19e-12 | |
| NO | 1.806e-10 | 4.78e-11 | |
| CH2O | 7.354e-08 | 1.94e-08 | |
| HCO | 6.456e-10 | 1.71e-10 | |
| NH2 | 3.486e-11 | 9.22e-12 | |
| NH | 1.413e-14 | 3.74e-15 | |
| N | 9.514e-17 | 2.52e-17 | |
| CH | 2.846e-22 | 7.53e-23 | |
| CH2 | 3.394e-17 | 8.98e-18 | |
| AR | 0.03560 | 0.00942 | |
| C(S) | 0.00000 | 0.00000 | |

III.1. ábra: Plazmatechnológia modellezése Gaseq szoftverben

III.1. táblázat: Az „1” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassza pirolizálására kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén

| | Szárász | 15% nedvesség | 20% nedvesség | |
|-------------------------|-----------|---------------|---------------|---------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,0238 | 0,0285 | 0,0273 | kg |
| H ₂ | 0,0166 | 0,0188 | 0,0180 | kg |
| CO ₂ | 0,2563 | 0,3173 | 0,3045 | kg |
| H ₂ O | 0,1971 | 0,2308 | 0,2210 | kg |
| N ₂ | 0,0050 | 0,0042 | 0,0040 | kg |
| CH ₄ | 0,0772 | 0,0855 | 0,0816 | kg |
| C (S) | 0,4141 | 0,3064 | 0,2857 | kg |
| Levegő | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | kg |
| Szum | 0,1538 | 0,3707 | 0,3626 | kg |
| Olaj | 0,4321 | 0,3229 | 0,3517 | kg |
| Energia CO | 0,2400 | 0,2879 | 0,2759 | MJ |
| Energia H ₂ | 1,9860 | 2,2536 | 2,1540 | MJ |
| Energia CH ₄ | 3,5545 | 3,9363 | 3,7585 | MJ |
| Energiakihozatal | 5,7804 | 6,4777 | 6,1884 | MJ/kg _{fa} |
| Fa fűtőértéke | 14,9040 | 12,6684 | 11,9232 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 38,78% | 51,13% | 51,90% | % |

III.2. táblázat: Az „1” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassza pirolizálására kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén

| | 25% nedvesség | 30% nedvesség | 35% nedvesség | |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,0317 | 0,0333 | 0,0348 | kg |
| H ₂ | 0,0203 | 0,0210 | 0,0218 | kg |
| CO ₂ | 0,3581 | 0,3786 | 0,3991 | kg |
| H ₂ O | 0,2531 | 0,2642 | 0,2753 | kg |
| N ₂ | 0,0037 | 0,0035 | 0,0032 | kg |
| CH ₄ | 0,0911 | 0,0939 | 0,0967 | kg |
| C(S) | 0,2345 | 0,1986 | 0,1626 | kg |
| Levegő | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | kg |
| Szum | 0,5155 | 0,5879 | 0,6603 | kg |
| Olaj | 0,2500 | 0,2136 | 0,1771 | kg |
| Energia CO | 0,3199 | 0,3358 | 0,3518 | MJ |
| Energia H ₂ | 2,4324 | 2,5212 | 2,6112 | MJ |
| Energia CH ₄ | 4,1938 | 4,3232 | 4,4526 | MJ |
| Energiakihozatal | 6,9460 | 7,1802 | 7,4156 | MJ/kg _{fa} |
| Fa fűtőértéke | 11,1780 | 10,4328 | 9,6876 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 62,14% | 68,82% | 76,55% | % |

HATÉKONYSÁGTÉRKÉP MINTAPÉLDÁK

Pirolízis

Az első példa a már korábban is említett bükkfa. A bükkfa moláris képlete $CH_{1,45}O_{0,60}$, tehát az egy mólnyi karbon tartalomra 1,45 mól hidrogén jut (H/C arány), a fajlagos oxigén tartalom (O/C arány) 0,6. Ennek megfelelően a fajlagos energia kihozatal bükkfa pirolizálása esetén a 6.6. táblázat 6. oszlopának (O/C=0,60) és 8. sorának (H/C=1,45) metszéspontjában található értékkel lesz egyenértékű. Tehát

$$e_{k \text{ bükkfa}} = 4,7363 \text{ MJ/kg}_{\text{bükkfa}} \quad (III.1.)$$

Ez az érték csak teljesen száraz fára vonatkozik. Ha a fa nedvességtartalma például 20%, akkor a 6.7. táblázatban szereplő érték (0,5739) kétszeresét hozzá kell adnunk az alapértékhez (III.2. összefüggés). A táblázat leolvasásánál az előzőekhez hasonlóan járunk el. A 20%-os nedvességtartalom hatására a fajlagos energiakihozatal

$$\begin{aligned} e_{k \text{ bükkfa } 20\%} &= e_{k \text{ bükkfa } 20\%} + \Delta e_{k \text{ bükkfa } 20\%} = 4,7363 + 2 \cdot 0,5739 \\ &= 5,8841 \text{ MJ/kg}_{\text{bükkfa}} \end{aligned} \quad (III.2.)$$

értékre növelhető.

Második példa a tölgyfa, amely fajlagos moláris képlete $CH_{1,2}O_{0,56}$, tehát a H/C arány 1,2 az O/C arány 0,56. Ahhoz, hogy a fajlagos energia kihozatal mértékét meg tudjuk becsülni, alkalmazzuk a lineáris interpoláció függvényét a 6.6. táblázat 3. sorának, valamint 5. és 6. oszlopának metszéspontjában található értékek behelyettesítésével.

Az interpolációs egyenlet és a keresett érték a tölgyfára nézve:

$$\begin{aligned}
 e_{k \text{ tölgyfa}} &= y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \\
 &= 4,6350 + \frac{(0,56 - 0,55) \cdot (4,4128 - 4,6350)}{0,6 - 0,55} \\
 &= 4,5906 \text{ MJ/kg}_{\text{tölgyfa}}.
 \end{aligned} \tag{III.3.}$$

Ez esetben vegyük a nedvességtartalmat 23%-nak. A nedvességtartalom hatása az előzőekhez hasonló módon határozható meg:

$$\begin{aligned}
 e_{k \text{ tölgyfa } 23\%} &= e_{k \text{ tölgyfa } 23\%} + \Delta e_{k \text{ tölgyfa } 23\%} \\
 &= 4,5906 + 2,3 \cdot \left[y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \right] \\
 &= 5906 + 2,3 \cdot \left[\frac{(0,56 - 0,55) \cdot (0,6069 - 0,5849)}{0,6 - 0,55} \right] \\
 &= 4,5906 + 2,3 \cdot 0,0044 = 4,6007 \text{ MJ/kg}_{\text{tölgyfa}}.
 \end{aligned} \tag{III.4.}$$

Ha a H/C arány is köztes értéket képvisel, a lineáris interpolációs egyenletet fel kell írni külön-külön és azt követően összegezni, tehát három egyenletből álló egyenletrendszert kell megoldani. A harmadik példa ezt az eshetőséget mutatja be az energiafűzön keresztül.

Az energiafűz moláris képlete $CH_{1,31}O_{0,62}$, tehát a H/C arány 1,31 az O/C arány 0,62. Elsőként írjuk az interpolációt az 1,30 H/C arányra:

$$\begin{aligned}
 e'_k &= 4,5893 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (4,1822 - 4,5893)}{0,65 - 0,6} = 4,5893 - 0,1628 \\
 &= 4,4265 \text{ MJ/kg}_{\text{fa}}.
 \end{aligned} \tag{III.5.}$$

A második egyenlet a H/C=1,35 estére vonatkozóan:

$$\begin{aligned}
 e''_k &= 4,5337 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (4,3322 - 4,5337)}{0,65 - 0,6} = 4,5337 - 0,0806 \\
 &= 4,4531 \text{ MJ/kg}_{\text{fa}}.
 \end{aligned} \tag{III.6.}$$

A harmadik egyenlet az 1,31 H/C arányhoz tartozó, az előző két egyenlet összegzésével megadja a keresett végeredményt:

$$\begin{aligned}
 e_{k \text{ energia fűz}} &= e'_k + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (e''_k - e'_k)}{1,35 - 1,3} \\
 &= 4,4265 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (4,5431 - 4,4265)}{1,35 - 1,3} \\
 &= 4,4265 - 0,0233 = 4,4032 \text{ MJ/kg}_{\text{energia fűz}}.
 \end{aligned} \tag{III.7.}$$

A nedvességtartalom tekintetében ugyan így járunk el. A tölgyfa nedvességtartalma a példában 15%. Írjuk fel az egyenleteinket:

$$\begin{aligned} \Delta e'_{k\ 15\%} &= 0,5892 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (0,6274 - 0,5892)}{0,65 - 0,6} \\ &= 0,5892 + 0,0123 = 0,6015 \text{ MJ/kg}_{fa}, \end{aligned} \quad (III.8.)$$

$$\begin{aligned} \Delta e''_{k\ 15\%} &= 0,5942 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (0,6131 - 0,5942)}{0,65 - 0,6} \\ &= 0,5942 + 0,0076 = 0,6018 \text{ MJ/kg}_{fa}, \end{aligned} \quad (III.9.)$$

$$\begin{aligned} \Delta e_{k\ \text{energia fűz } 15\%} &= 0,6015 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (0,6018 - 0,6015)}{1,35 - 1,3} \\ &= 0,6015 + 0,0001 = 0,6016 \text{ MJ/kg}_{fa}. \end{aligned} \quad (III.10.)$$

Végül adódik a 15%-os nedvességtartalmú energia fűz pirolizálása során a fajlagos energia kihozatal:

$$\begin{aligned} e_{k\ \text{energia fűz } 15\%} &= e_{k\ \text{energia fűz}} + \Delta e_{k\ \text{energia fűz } 15\%} \\ &= 4,4032 + 1,5 \cdot 0,6016 = 5,3056 \text{ MJ/kg}_{\text{energia fűz}}. \end{aligned} \quad (III.11.)$$

A nedvességtartalom növekedésének hatására nagyobb fajlagos energia kihozatal érhető el. A többi kategória esetében hasonlóan járunk el.

III.3. táblázat: Az „1” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassa gázosítására kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén, 0,5 légszelesleg tényező mellett

| | Száraz | 15% nedvesség | 20% nedvesség | |
|------------------------|-----------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,8470 | 0,6396 | 0,5753 | kg |
| H ₂ | 0,0371 | 0,0373 | 0,0370 | kg |
| CO ₂ | 0,6918 | 0,7143 | 0,7141 | kg |
| H ₂ O | 0,1871 | 0,2574 | 0,2840 | kg |
| N ₂ | 2,5439 | 2,1623 | 2,0351 | kg |
| Levegő | 3,3614 | 2,8572 | 2,6891 | kg |
| Szum | 4,3534 | 3,8492 | 3,6811 | kg |
| Száraz gáz | 4,1662 | 3,5918 | 3,3971 | kg _{gáz} /kg _{fa} |
| Energia CO | 8,5543 | 6,4598 | 5,8109 | MJ |
| Energia H ₂ | 4,4460 | 4,4736 | 4,4400 | MJ |
| Energiakihozatal | 13,0003 | 10,9334 | 10,2509 | MJ/kg _{fa} |
| Fa fűtőértéke | 14,9040 | 12,6225 | 11,9232 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 87,23% | 86,62% | 85,97% | % |

III.4. táblázat: Az „1” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassa gázosítására kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén, 0,5 légf felesleg tényező mellett

| | 25% nedvesség | 30% nedvesség | 35% nedvesség | |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,5137 | 0,4547 | 0,3986 | kg |
| H ₂ | 0,0365 | 0,0359 | 0,0350 | kg |
| CO ₂ | 0,7098 | 0,7013 | 0,6884 | kg |
| H ₂ O | 0,3122 | 0,3422 | 0,3739 | kg |
| N ₂ | 1,9079 | 1,7808 | 1,6535 | kg |
| Levegő | 2,5210 | 2,3530 | 2,1849 | kg |
| Szum | 3,5130 | 3,3450 | 3,1769 | kg |
| Száraz gáz | 3,2008 | 3,0028 | 2,8030 | kg _{gáz} /kg _{fa} |
| Energia CO | 5,1883 | 4,5929 | 4,0262 | MJ |
| Energia H ₂ | 4,3848 | 4,3056 | 4,2024 | MJ |
| Energiakihozatal | 9,5731 | 8,8985 | 8,2286 | MJ/kg _{fa} |
| Fa fűtőértéke | 11,1780 | 10,4328 | 9,6876 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 85,64% | 85,29% | 84,94% | % |

Gázosítás

A konstansok kiválasztásának szemléltetésére ismételten térjünk vissza a három, korábban említett fafajtára és nedvességtartalomra. Elsőként nézzük meg a bükkfa gázosítása során elérhető fajlagos energia kihozatalt és válasszuk ki a hozzá tartozó konstans értékét (a bükkfa H/C aránya 1,45; O/C arány 0,6). Ennek megfelelően a 6.15. táblázat 6. oszlopának és 8. sorának metszéspontjában lévő értéket ijuk be a 6.20. képletbe. Első esetben vizsgáljuk meg az abszolút száraz fát, 0,5 légf felesleg mellett. Mivel a linearizált modellre ilyen nedvességtartalom és légf felesleg mellett túlbecslés a jellemző, ezért a korrekciós konstans értékét válasszuk 0,9-re a 6.21. képlet alapján. Ekkor a fajlagos energia kihozatal értéke az alábbiak szerint alakul (III.12. képlet)

$$\begin{aligned}
 e_{k \text{ bükkfa } 0\% \text{ } 0,5}(n, \lambda) &= (K_{e \text{ bükkfa}} - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k \\
 &= (18,8098 - 0,09302 \cdot 0 - 17,83 \cdot 0,5) \cdot 0,9 \\
 &= 8,9053 \text{ MJ/kg}_{\text{bükkfa}}.
 \end{aligned}
 \tag{III.12.}$$

Második esetben a nedvességtartalom 20%. A légf felesleg értékét válasszuk 0,6-ra. Korrekcióra nincs szükségünk. Ennek megfelelően a 20% nedvességtartalmú bükkfa 0,6-es légf felesleggel történő gázosítása során a fajlagos energia kihozatal értéke (III.13. képlet):

$$\begin{aligned}
 e_{k \text{ bükkfa } 20\% \text{ } 0,6}(n, \lambda) &= (K_{e \text{ bükkfa}} - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k \\
 &= (18,8098 - 0,09302 \cdot 20 - 17,83 \cdot 0,6) \cdot 1 \\
 &= 6,2514 \text{ MJ/kg}_{\text{bükkfa}}.
 \end{aligned}
 \tag{III.13.}$$

Következő példánk a tölgyfa, ahol a konstans meghatározásához lineáris interpolációt kell alkalmazni. A tölgyfa H/C aránya 1,2; O/C aránya 0,56.

Ennek megfelelően a lineáris interpolációs egyenlet a következő módon írható fel (III.14. képlet):

$$\begin{aligned} K_{e\text{ tölgyfa}} &= y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \\ &= 19,5009 + \frac{(0,56 - 0,55) \cdot (19,3948 - 19,5009)}{0,6 - 0,55} \\ &= 19,4797 \text{ MJ/kg}_{\text{tölgyfa}}. \end{aligned} \quad (\text{III.14.})$$

Tekintsük a 0% nedvességtartalmú tölgyfát, most a példa kedvéért 0,55 légfesleg mellett. A korrekciós tényező értékét válasszuk 0,925-nek a 6.21. képlet alapján, mert a modellre továbbra is a túlbecslés a jellemző. Ennek megfelelően a fajlagos energia kihozatal (III.15. képlet):

$$\begin{aligned} e_{k\text{ tölgyfa } 0\% 0,55}(n, \lambda) &= (K_e - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k = \\ (19,4797 - 0,09302 \cdot 0 - 17,83 \cdot 0,55) \cdot 0,925 &= 8,9385 \text{ MJ/kg}_{\text{tölgyfa}}. \end{aligned} \quad (\text{III.15.})$$

A 23%-os nedvességtartalom mellett a légfesleg tényező értéke 0,63. Korrekciós tényező alkalmazása nem szükséges. A fajlagos energia kihozatal e paraméterek mellett (III.16. képlet):

$$\begin{aligned} e_{k\text{ tölgyfa } 23\% 0,63}(n, \lambda) &= (K_e - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k = \\ (19,4797 - 0,09302 \cdot 23 - 17,83 \cdot 0,63) \cdot 1 &= 6,0973 \text{ MJ/kg}_{\text{tölgyfa}}. \end{aligned} \quad (\text{III.17.})$$

Végezetül a harmadik példánk az energiafűz, ahol a lineáris interpolációt háromszor kell felírni a konstans meghatározására. Az energiafűz moláris képlete $CH_{1,31}O_{0,62}$, tehát a H/C arány 1,31 az O/C arány 0,62. Elsőként írjuk az interpolációt az 1,30 H/C arányra (III.18. képlet):

$$\begin{aligned} K'_e &= 19,3515 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (18,8999 - 19,3515)}{0,65 - 0,6} \\ &= 19,5321 \text{ MJ/kg}_{\text{fa}}, \end{aligned} \quad (\text{III.18.})$$

a második egyenlet a H/C=1,35 estére vonatkozóan (III.19. képlet):

$$\begin{aligned} K''_e &= 18,9780 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (18,8376 - 18,9780)}{0,65 - 0,6} \\ &= 19,0342 \text{ MJ/kg}_{\text{fa}}. \end{aligned} \quad (\text{III.19.})$$

A harmadik egyenlet az 1,31 H/C arányhoz tartozó, az előző két egyenlet összegzésével megadja a keresett végeredményt (III.20. képlet):

$$\begin{aligned} K_{e\text{ energia fűz}} &= K'_e + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (K''_e - K'_e)}{1,35 - 1,3} \\ &= 19,5321 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (19,0342 - 19,5321)}{1,35 - 1,3} \\ &= 19,6317 \text{ MJ/kg}_{\text{energia fűz}}. \end{aligned} \quad (\text{III.20.})$$

Írjuk fel a fajlagos energia kihozatalát a 0% nedvességtartalmú energia fűzre vonatkozóan, 0,53 légfesleg tényező esetén. Korrekciós tényezőként 0,915 értéket alkalmazunk a 6.21. képlet alapján (III.21. képlet):

$$e_k \text{ energia fűz } 0\% \text{ } 0,53(n, \lambda) = (K_e - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k = \\ (19,6317 - 0,09302 \cdot 0 - 17,83 \cdot 0,53) \cdot 0,915 = 9,3164 \text{ MJ/kg}_{\text{energia fűz}} \cdot \quad (\text{III.21.})$$

A 15%-os nedvességtartalmú energiafűz gázosítása 0,58 légfesleg tényező, és 0,95 korrekciós konstans mellett (I.22. képlet):

$$e_k \text{ energia fűz } 15\% \text{ } 0,58(n, \lambda) = (K_e - 0,09302 \cdot n - 17,83 \cdot \lambda) \cdot K_k = \\ (19,6317 - 0,09302 \cdot 15 - 17,83 \cdot 0,58) \cdot 0,95 = 7,5003 \text{ MJ/kg}_{\text{energia fűz}} \quad (\text{III.22.})$$

értékre adódott. A reakció hatásfok és a fajlagos szintézisgáz-termelés számítása során hasonlóan járunk el.

III.5. táblázat: Az „I” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassa plazmatechnológiával történő kezelésére kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén

| | Száraz | 15% nedvesség | 20% nedvesség | |
|--------------------------------------|-----------|---------------|---------------|----------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,8943 | 0,6901 | 0,6261 | kg |
| H ₂ | 0,0337 | 0,0337 | 0,0334 | kg |
| CO ₂ | 0,6174 | 0,6349 | 0,6344 | kg |
| H ₂ O | 0,2176 | 0,2899 | 0,3165 | kg |
| N ₂ | 2,5429 | 2,1619 | 2,0351 | kg |
| Levegő | 3,3614 | 2,8572 | 2,6891 | kg |
| Szum | 4,3534 | 3,8492 | 3,6811 | kg |
| Gáz sűrűsége | 1,0860 | 1,0673 | 1,0601 | kg/Nm ³ |
| Energia CO | 9,0328 | 6,9703 | 6,3232 | MJ |
| Energia H ₂ | 4,0392 | 4,0380 | 4,0032 | MJ |
| Energiakihozatal | 13,0720 | 11,0083 | 10,3264 | MJ/kg _{fa} |
| Energiakihozatal száraz szintézisgáz | 3,1607 | 3,0928 | 3,0692 | MJ/kg _{gáz} |
| Fűtőérték száraz szintézisgáz | 4,1202 | 4,1975 | 4,2253 | MJ/Nm ³ |
| Fa fűtőértéke | 14,9040 | 12,6684 | 11,9232 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 87,71% | 86,90% | 86,61% | % |

III.6. táblázat: Az „I” jelű összetétellel rendelkező 1 kg biomassa plazmatechnológiával történő kezelésére kapott eredmények változó nedvességtartalom esetén

| | 25% nedvesség | 30% nedvesség | 35% nedvesség | |
|---|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| Megnevezés | Mennyiség | Mennyiség | Mennyiség | Mértékegység |
| CO | 0,5641 | 0,5044 | 0,4469 | kg |
| H ₂ | 0,0329 | 0,0323 | 0,0316 | kg |
| CO ₂ | 0,6306 | 0,6234 | 0,6125 | kg |
| H ₂ O | 0,3446 | 0,3740 | 0,4050 | kg |
| N ₂ | 1,9082 | 1,7812 | 1,6543 | kg |
| Levegő | 2,5210 | 2,3530 | 2,1895 | kg |
| Szum | 3,5130 | 3,3450 | 3,1815 | kg |
| Gáz sűrűsége | 1,0524 | 1,0440 | 1,0348 | kg/Nm ³ |
| Energia CO | 5,6974 | 5,0939 | 4,5136 | MJ |
| Energia H ₂ | 3,9504 | 3,8784 | 3,7860 | MJ |
| Energiakihozatal | 9,6478 | 8,9723 | 8,2996 | MJ/kg _{fa} |
| Energiakihozatal száraz szintézisgáz | 3,0450 | 3,0200 | 2,9892 | MJ/kg _{gáz} |
| Fűtőérték száraz szintézisgáz | 4,2537 | 4,2824 | 4,3038 | MJ/Nm ³ |
| Fa fűtőértéke | 11,178 | 10,4328 | 9,6876 | MJ/kg _{fa} |
| Reakció hatásfok | 86,31% | 86,00% | 85,67% | % |

IV. MELLÉKLET

Életciklus-elemzés során használt adatbázisok

IV.6. táblázat: Az életciklus-elemzések alapjául szolgáló LCI adatbázis 1 kg biomasszára vonatkoztatva

| ANYAG- ÉS ENERGIAÁRAM NEVE | MENNYISÉGE [kg] |
|---------------------------------------|-----------------|
| Resources | 48,9168 |
| <u>Energy resources</u> | 0,06798 |
| <i>Non renewable energy resources</i> | 0,06799 |
| Crude oil (resource) | 0,04774 |
| Crude oil (in MJ) | 0,047739 |
| Oil sand (10% bitumen) (in MJ) | 4,98985E-6 |
| Oil sand (100% bitumen) (in MJ) | 4,35639E-7 |
| Hard coal (resource) | 0,00223 |
| Hard coal (in MJ) | 0,00223 |
| Lignite (resource) | 0,01001 |
| Lignite (in MJ) | 0,01001 |
| Natural gas (resource) | 0,00800 |
| Natural gas (in MJ) | 0,00795 |

| | |
|--|--------------|
| Pit Methane (in MJ) | 4,58643E-5 |
| Peat (ressource) | 3,45907E-6 |
| Peat (in MJ) | 3,45907E-6 |
| Uranium (resource) | 4,91181E-7 |
| Uranium natural (in MJ) | 4,91181E-7 |
| | |
| <u>Material resources</u> | 48,8489 |
| <i>Non renewable elements</i> | 0,00013 |
| Antimony | 3,23916E-13 |
| Chromium | 6,57811E-7 |
| Cobalt | 5,58648E-13 |
| Copper | 2,68797E-7 |
| Gold | 7,04341E-13 |
| Iridium | 1,03453E-15 |
| Iron | 8,641638E-5 |
| Lead | 8,096126E-7 |
| Magnesium | 2,221501E-18 |
| Manganese | 5,681208E-6 |
| Mercury | 2,177942E-17 |
| Molybdenum | 5,267170E-9 |
| Nickel | -7,01322E-9 |
| Osmium | 1,262130E-15 |
| Palladium | 1,831124E-14 |
| Phosphorus | 3,918596E-5 |
| Platinum | 3,103599E-14 |
| Rhodium | 3,103743E-15 |
| Ruthenium | 6,124436E-15 |
| Silicon | 2,907553E-11 |
| Silver | 2,339754E-10 |
| Sulphur | 1,092652E-12 |
| Tantalum | 2,862325E-8 |
| Tin | 1,650200E-20 |
| Titanium | 2,081154E-10 |
| Zinc | 2,572233E-7 |
| <i>Non renewable resources</i> | 0,17321 |
| Barium sulphate | 1,902871E-16 |
| Basalt | 2,918809E-9 |
| Bauxite | 1,700626E-6 |
| Bentonite | 6,865949E-5 |
| Calcium chloride | 1,949462E-14 |
| Clay | 0,000152 |
| Colemanite ore | 2,980335E-7 |
| Dolomite | 5,666693E-6 |
| Feldspar (aluminium silicates) | 9,582946E-23 |
| Fluorspar (calcium fluoride; fluorite) | 8,084259E-7 |
| Granite Granite | 1,361214E-24 |
| Gypsum (natural gypsum) | 1,639383E-5 |
| Heavy spar (BaSO ₄) | 7,410612E-10 |
| Ilmenite (titanium ore) | 2,112990E-8 |

| | |
|---|--------------|
| Inert rock | 0,165801 |
| Kaolin | 5,223648E-7 |
| Limestone (calcium carbonate) | 0,001433 |
| <i>Magnesit (Magnesium carbonate)</i> | 7,256618E-11 |
| <i>Magnesium chloride leach (40%)</i> | 3,976283E-6 |
| Manganese ore | -8,00086E-13 |
| Natural Aggregate | 0,003213 |
| Olivine | 5,873652E-16 |
| Potashsalt, crude (hard salt, 10% K ₂ O) | 0,001445 |
| Potassium chloride | 4,685161E-12 |
| Quartz sand (silica sand; silicon dioxide) | 0,000108 |
| Raw pumice | 3,794042E-7 |
| Sodium chloride (rock salt) | 5,750852E-5 |
| Sodium nitrate | 5,172613E-21 |
| Sodium sulphate | 2,332548E-13 |
| Soil | 0,000895 |
| Stone from mountains | 2,069463E-6 |
| Talc | 4,398802E-12 |
| Tin ore | 5,849860E-11 |
| <i>Renewable resources</i> | 48,67554 |
| Water | 43,54099 |
| Water (ground water) | 0,202476 |
| Water (lake water) | 2,120437 |
| Water (rain water) | 1,995991 |
| Water (river water) | 39,17600 |
| Water (sea water) | 0,046086 |
| Air | 4,604334 |
| Carbon dioxide | 0,530214 |
| Nitrogen | 8,439622E-12 |
| Oxygen | 1,993907E-6 |

ÉLETCIKLUS-TÉRKÉPEK MINTAPÉLDÁK

Pirolízis

A bükkfa moláris képlete $CH_{1,45}O_{0,60}$, tehát az egy mólnyi karbon tartalomra 1,45 mól hidrogén jut (H/C arány), a fajlagos oxigén tartalom (O/C arány) 0,6. Ennek megfelelően a globális felmelegedési potenciál bükkfa pirolizálása esetén a 7.11. táblázat 6. oszlopának (O/C=0,60) és 8. sorának (H/C=1,45) metszéspontjában található értékkel lesz egyenértékű. Tehát

$$GWP_{b\u00fcckfa\ 0\%} = 350,93 \text{ gramm CO}_2 - \text{egyen\u00e9rt\u00e9k/kg}_{b\u00fcckfa} \cdot \quad (IV.1.)$$

Ez az \u00e9rt\u00e9k csak teljesen sz\u00e1raz f\u00e1ra vonatkozik. Tekints\u00fck a 20% nedvess\u00e9gtartalm\u00fa b\u00fckkf\u00e1t. Ahhoz, hogy meghat\u00e1rozzuk a nedves b\u00fckkfa piroliz\u00e1s\u00e1ra vonatkoz\u00f3 GWP \u00e9rt\u00e9ket, vegy\u00fck a 7.11. t\u00e1bl\u00e1zat 6. oszlop\u00e1nak (O/C=0,60) \u00e9s 8. sor\u00e1nak (H/C=1,45) metsz\u00e9spontj\u00e1ban található \u00e9rt\u00e9k k\u00e9tszeres\u00e9t, ezt k\u00f6vet\u00f6en el\u00f3jelhelyesen \u00f3sszegezz\u00fck eggyel \u00e9s az \u00edgy kapott *K* korrekci\u00f3s t\u00e9nyez\u00f6vel szorozzuk meg a m\u00e1r kisz\u00e1molt alap\u00e9rt\u00e9ket:

$$\begin{aligned} GWP_{b\u00fckkfa\ 20\%} &= GWP_{b\u00fckkfa\ 0\%} \cdot K = 350,93 \cdot (1 + (2 \cdot 0,1403)) \\ &= 449,40 \text{ gramm } CO_2 - \text{ egyen\u00e9rt\u00e9k}/kg_{b\u00fckkfa}. \end{aligned} \quad (IV.2.)$$

M\u00e1sodik p\u00e9lda a t\u00f6lgyfa, aminek fajlagos mol\u00e1ris k\u00e9plete $CH_{1,2}O_{0,56}$, teh\u00e1t a H/C ar\u00e1ny 1,2; az O/C ar\u00e1ny 0,56. Ahhoz, hogy a fajlagos energia kihozatal m\u00e9rt\u00e9k meg tudjuk becs\u00falni, alkalmazzuk a line\u00e1ris interpol\u00e1ci\u00f3 f\u00fcggv\u00e9ny\u00e9t a 7.11. t\u00e1bl\u00e1zat 3. sor\u00e1nak, valamint 5. \u00e9s 6. oszlop\u00e1nak metsz\u00e9spontj\u00e1ban található \u00e9rt\u00e9kek behelyettes\u00edtes\u00e9vel. Az interpol\u00e1ci\u00f3s egyenlet \u00e9s a keresett \u00e9rt\u00e9k a t\u00f6lgyf\u00e1ra n\u00e9zve:

$$\begin{aligned} GWP_{t\u00f6lgyfa\ 0\%} &= y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \\ &= 295,53 + \frac{(0,56 - 0,55) \cdot (293,33 - 295,53)}{0,6 - 0,55} \\ &= 295,09 \text{ gramm } CO_2 - \text{ egyen\u00e9rt\u00e9k}/kg_{t\u00f6lgyfa}. \end{aligned} \quad (IV.3.)$$

E p\u00e9ld\u00e1n\u00e1l vegy\u00fcnk a nedvess\u00e9gtartalmat 23%-nak. A nedvess\u00e9gtartalom hat\u00e1sa az el\u00f3z\u00f3ekhez hasonló m\u00f3don hat\u00e1rozhat\u00f3 meg, ehhez sz\u00e1m\u00f3ljuk ki a korrekci\u00f3s t\u00e9nyez\u0151 \u00e9rt\u00e9k\u00e9t, majd a v\u00e9geredm\u00e9nyt:

$$\begin{aligned} K_{t\u00f6lgyfa\ 23\%} &= 1 + \left(2,3 \cdot \left(y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \right) \right) \\ &= 1 \\ &+ \left(2,3 \cdot \left(0,1318 + \frac{(0,56 - 0,55) \cdot (0,1437 - 0,1318)}{0,6 - 0,55} \right) \right) \\ &= 1 + (2,3 \cdot 0,1342) = 1,3087, \end{aligned} \quad (IV.4.)$$

$$\begin{aligned} GWP_{t\u00f6lgyfa\ 23\%} &= GWP_{t\u00f6lgyfa\ 0\%} \cdot K = 295,09 \cdot 1,3087 \\ &= 386,18 \text{ gramm } CO_2 - \text{ egyen\u00e9rt\u00e9k}/kg_{t\u00f6lgyfa}. \end{aligned} \quad (IV.5.)$$

V\u00e9g\u00fal n\u00e9zz\u00fcnk meg a harmadik p\u00e9ld\u00e1nk\u00e1t, az energiaf\u00fczt. Az energiaf\u00fcz mol\u00e1ris k\u00e9plete $CH_{1,31}O_{0,62}$, teh\u00e1t a H/C ar\u00e1ny 1,31 az O/C ar\u00e1ny 0,62. Els\u0151k\u00e9nt \u00edrjuk az interpol\u00e1ci\u00f3t az 1,30 H/C ar\u00e1nyra:

$$\begin{aligned} GWP' &= 314,01 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (314,43 - 314,01)}{0,65 - 0,6} = 314,01 + 1,68 \\ &= 314,18 \text{ gramm } CO_2 - \text{ egyen\u00e9rt\u00e9k}/kg_{fa}, \end{aligned} \quad (IV.6.)$$

a m\u00e1sodik egyenlet a H/C=1,35 est\u00e9re vonatkoz\u00f3an:

$$\begin{aligned} GWP'' &= 330,71 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (334,37 - 330,71)}{0,65 - 0,6} = 330,71 + 1,464 \\ &= 332,17 \text{ gramm } CO_2 - \text{ egyen\u00e9rt\u00e9k}/kg_{fa}. \end{aligned} \quad (IV.7.)$$

A harmadik egyenlet az 1,31 H/C arányhoz tartozó, az előző két egyenlet összegzésével megadja a keresett végeredményt:

$$\begin{aligned}
 GWP_{energia\ fűz\ 0\%} &= GWP' + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (GWP'' - GWP')}{1,35 - 1,3} \\
 &= 314,18 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (332,17 - 314,18)}{1,35 - 1,3} \\
 &= 305,87 + 3,598 \\
 &= 317,78\ \text{gramm CO}_2 - \text{egyenérték/kg energia fűz.}
 \end{aligned}
 \tag{IV.8.}$$

A nedvességtartalom tekintetében ugyan így járunk el. Válasszuk a tölgyfánk nedvességtartalmát 15%-nak. Írjuk fel sorra az egyenleteinket:

$$\begin{aligned}
 K' &= 1 + \left(1,5 \cdot \left(0,1426 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (0,1536 - 0,1426)}{0,65 - 0,6} \right) \right) \\
 &= 1 + (1,5 \cdot 0,147) = 1,2205,
 \end{aligned}
 \tag{IV.9.}$$

$$\begin{aligned}
 K' &= 1 + \left(1,5 \cdot \left(0,1409 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (0,1532 - 0,1409)}{0,65 - 0,6} \right) \right) \\
 &= 1 + (1,5 \cdot 0,1458) = 1,2187,
 \end{aligned}
 \tag{IV.10.}$$

$$\begin{aligned}
 K_{energia\ fűz\ 15\%} &= 1,2205 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (1,2187 - 1,2205)}{1,35 - 1,3} \\
 &= 1,2205 - 0,00036 = 1,2201.
 \end{aligned}
 \tag{IV.11.}$$

Végül adódik a 15%-os nedvességtartalmú energia fűz pirolizálása során az üvegház hatású gázok kibocsátásának mértéke

$$\begin{aligned}
 GWP_{energia\ fűz\ 15\%} &= GWP_{energia\ fűz\ 0\%} \cdot K_{energia\ fűz\ 15\%} \\
 &= 317,78 + 1,2201 \\
 &= 387,72\ \text{gramm CO}_2 - \text{egyenérték/kg energia fűz.}
 \end{aligned}
 \tag{IV.12.}$$

Megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom növekedésének hatására nagyobb az üvegház hatású gázok kibocsátása. A többi kategória esetében hasonlóan járunk el.

Gázosítás

A gázosítási életciklus-térképek alkalmazását ismételten a három fafajta példáján keresztül mutatom be. Elsőként nézzük meg a bükkfa gázosítására vonatkozó globális felmelegedési potenciált és válasszuk ki a hozzá tartozó konstans értékét. A bükkfa H/C aránya 1,45; O/C arány 0,6, ennek megfelelően a 7.19. táblázat 6. oszlopának és 8. sorának metszéspontjában lévő értéket írjuk be a 7.13. képletbe. Mivel az életciklus elemzésnél alkalmazott linearizált modell nagyobb pontossággal rendelkezik, mint amit az energetikai hatékonysági vizsgálatoknál alkalmaztam, ezért a korrekciós tényező jelen esetben elhanyagolható.

Első esetben vizsgáljuk meg az abszolút száraz fát, 0,5 légfesleg mellett. Ekkor a globális felmelegedési potenciál értéke az alábbiak szerint alakul (IV.13. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{bükffa\ 0\% \ 0,5}(n, \lambda) &= K_{GWP} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 87,79 - 3,8517 \cdot 0 + 381,3470 \cdot 0,5 \\ &= 278,46 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{bükffa}. \end{aligned} \quad (IV.13.)$$

Második esetben a nedvességtartalom 20%. A légfesleg értékét válasszuk 0,6-ra. Ennek megfelelően a 20% nedvességtartalmú bükkfa 0,6-es légfesleggel történő gázosítása során a globális felmelegedési potenciál értéke (IV.14. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{bükffa\ 20\% \ 0,6}(n, \lambda) &= K_{GWP\ bükkfa} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 87,79 - 3,8517 \cdot 20 + 381,3470 \cdot 0,6 \\ &= 239,56 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{bükffa}. \end{aligned} \quad (IV.14.)$$

Következő példánk a tölgyfa, ahol a konstans meghatározásához lineáris interpolációt kell alkalmazni. A tölgyfa H/C aránya 1,2; O/C aránya 0,56. Ennek megfelelően a lineáris interpolációs egyenlet a következő módon írható fel (IV.15. képlet):

$$\begin{aligned} K_{GWP\ tölgyfa} &= y_i + \frac{(x^* - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \\ &= 145,75 + \frac{(0,56 - 0,55) \cdot (129,77 - 145,75)}{0,6 - 0,55} \\ &= 142,554 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{bükffa}. \end{aligned} \quad (IV.15.)$$

Tekintsük a 0% nedvességtartalmú tölgyfát, most a példa kedvéért 0,55 légfesleg mellett. Ennek megfelelően a globális felmelegedési potenciál (IV.16. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{tölgyfa\ 0\% \ 0,55}(n, \lambda) &= K_{GWP\ tölgyfa} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 142,554 - 3,8517 \cdot 0 + 381,3470 \cdot 0,55 \\ &= 352,30 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{tölgyfa}. \end{aligned} \quad (IV.16.)$$

A 23%-os nedvességtartalom mellett a légfesleg tényező értéke 0,63. A globális felmelegedési potenciál e paraméterek mellett (IV.17. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{tölgyfa\ 23\% \ 0,63}(n, \lambda) &= K_{GWP\ tölgyfa} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 142,554 - 3,8517 \cdot 23 + 381,3470 \cdot 0,63 \\ &= 294,21 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{tölgyfa}. \end{aligned} \quad (IV.17.)$$

Végezetül a harmadik példánk az energiafűz, ahol a lineáris interpolációt háromszor kell felírni a konstans meghatározására. Az energiafűz moláris képlete $CH_{1,31}O_{0,62}$, tehát a H/C arány 1,31 az O/C arány 0,62. Elsőként írjuk az interpolációt az 1,30 H/C arányra (IV.18. képlet):

$$\begin{aligned} GWP' &= 113,56 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (86,95 - 113,56)}{0,65 - 0,6} \\ &= 102,916 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték/kg}_{fa}, \end{aligned} \quad (IV.18.)$$

a második egyenlet a $H/C=1,35$ estére vonatkozóan (IV.19. képlet):

$$\begin{aligned} GWP'' &= 94,98 + \frac{(0,62 - 0,6) \cdot (82,35 - 94,98)}{0,65 - 0,6} \\ &= 89,928 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték}/kg_{fa}. \end{aligned} \quad (IV.19.)$$

A harmadik egyenlet az 1,31 H/C arányhoz tartozó, az előző két egyenlet összegzésével megadja a keresett végeredményt (IV.20. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{\text{energia fűz}} &= GWP' + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (GWP'' - GWP')}{1,35 - 1,3} \\ &= 102,916 + \frac{(1,31 - 1,3) \cdot (89,928 - 102,916)}{1,35 - 1,3} \\ &= 100,3184 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték}/kg_{\text{energia fűz}}. \end{aligned} \quad (IV.20.)$$

Írjuk fel a globális felmelegedési potenciál értékét a 0% nedvességtartalmú energia fűzre vonatkozóan, 0,53 légfesleg tényező esetén (IV.21. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{\text{energia fűz } 0\% \text{ } 0,53}(n, \lambda) &= K_{GWP \text{ energia fűz}} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 100,3184 - 3,8517 \cdot 0 + 381,3470 \cdot 0,53 \\ &= 302,43 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték}/kg_{\text{energia fűz}}. \end{aligned} \quad (IV.21.)$$

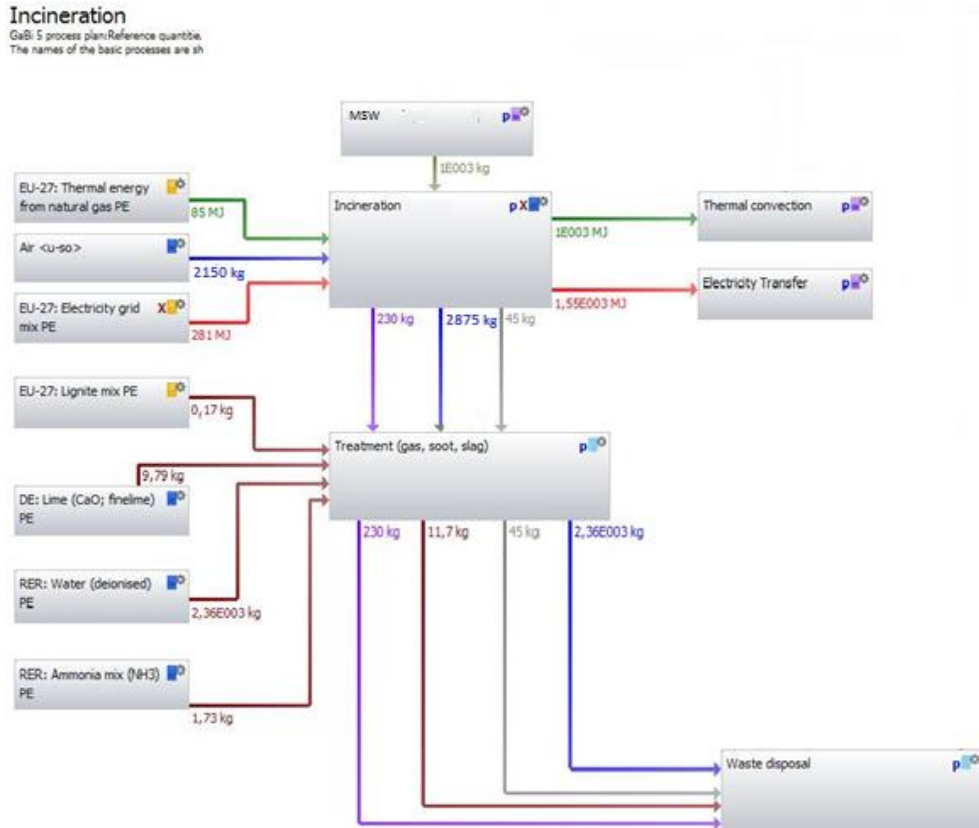
A 15%-os nedvességtartalmú energiafűz gázosítása 0,58 légfesleg tényező mellett (IV.22. képlet):

$$\begin{aligned} GWP_{\text{energia fűz } 15\% \text{ } 0,58}(n, \lambda) &= K_{GWP \text{ energia fűz}} - 3,8517 \cdot n + 381,3470 \cdot \lambda \\ &= 100,3184 - 3,8517 \cdot 15 + 381,3470 \cdot 0,58 \\ &= 263,72 \text{ gramm } CO_2 - \text{egyenérték}/kg_{\text{energia fűz}} \end{aligned} \quad (IV.22.)$$

értékre adódott. A többi környezeti hatáskategória számítása során hasonlóan járunk el.

V. MELLÉKLET

Települési szilárd hulladék életciklus-elemzésének alapadatai



V.1. ábra: TSZH égetés folyamatábrája 1 tonna funkcionális egységre vonatkozóan

V.1. táblázat: TSZH égetés LCI adatai

| ANYAG- ÉS ENERGIAÁRAM NEVE | MENNYISÉGE [kg] |
|---------------------------------------|-----------------|
| Resources | 52,7662 |
| <u>Energy resources</u> | 1,96081E-2 |
| <i>Non renewable energy resources</i> | 1,96081E-2 |
| Crude oil (resource) | 3,056485E-3 |
| Crude oil (in MJ) | 3,09512E-3 |
| Oil sand (10% bitumen) (in MJ) | -3,553768E-5 |
| Oil sand (100% bitumen) (in MJ) | -3,102616E-6 |
| Hard coal (resource) | 4,487483E-3 |
| Hard coal (in MJ) | 4,487483E-3 |
| Lignite (resource) | 6,532964E-3 |
| Lignite (in MJ) | 6,532964E-3 |
| Natural gas (resource) | 5,530171E-3 |
| Natural gas (in MJ) | 5,498520E-3 |
| Pit Methane (in MJ) | 3,165089E-5 |
| Peat (ressource) | 8,309149E-7 |
| Peat (in MJ) | 8,309149E-7 |
| Uranium (resource) | 1,6938027E-7 |

| | |
|--|---------------|
| Uranium natural (in MJ) | 1,693802E-7 |
| Material resources | 52,74667 |
| <i>Non renewable elements</i> | -1,911847E-2 |
| Antimony | 2,511855E-11 |
| Chromium | 3,069532E-7 |
| Cobalt | 3,619375E-11 |
| Copper | 3,739465E-7 |
| Gold | 9,465321E-11 |
| Iridium | 6,702547E-15 |
| Iron | -1,9117711E-2 |
| Lead | 1,4161392E-7 |
| Magnesium | 4,301836E-17 |
| Manganese | 3,212431E-7 |
| Mercury | 4,217486E-17 |
| Molybdenum | 6,625994E-10 |
| Nickel | -2,838606E-8 |
| Osmium | 8,177108E-15 |
| Palladium | 1,186351E-13 |
| Phosphorus | -2,094265E-6 |
| Platinum | 2,010764E-13 |
| Rhodium | 2,010946E-14 |
| Ruthenium | 3,967908E-14 |
| Silicon | 5,630344E-8 |
| Silver | -2,601250E-11 |
| Sulphur | 2,098393E-11 |
| Tantalum | 2,219630E-7 |
| Tin | -4,717286E-22 |
| Titanium | 1,843848E-10 |
| Zinc | -2,845235E-9 |
| <i>Non renewable resources</i> | 1,401981E-1 |
| Barium sulphate | -5,439576E-18 |
| Basalt | 4,614089E-8 |
| Bauxite | 1,669700E-5 |
| Bentonite | 1,233931E-5 |
| Calcium chloride | -3,228601E-15 |
| Clay | 9,346301E-6 |
| Colemanite ore | 1,599341E-6 |
| Dolomite | 3,099284E-7 |
| Feldspar (aluminium silicates) | 1,855694E-21 |
| Fluorspar (calcium fluoride; fluorite) | 1,940168E-7 |
| Granite Granite | 2,635929E-23 |
| Gypsum (natural gypsum) | 9,287000E-7 |
| Heavy spar (BaSO ₄) | 6,432476E-9 |
| Ilmenite (titanium ore) | 4,937037E-7 |
| Inert rock | 1,128593E-1 |
| Kaolin ore | 2,855651E-6 |
| Limestone (calcium carbonate) | 1,605298E-2 |
| Magnesit (Magnesium carbonate) | 1,372792E-9 |
| Magnesium chloride leach (40%) | 9,045968E-3 |
| Manganese ore | 2,287137E-14 |

| | |
|---|--------------|
| Natural Aggregate | 1,115826E-4 |
| Olivine | 1,117605E-14 |
| Potashsalt, crude (hard salt, 10% K ₂ O) | -1,296962E-5 |
| Potassium chloride | 9,046469E-11 |
| Quartz sand (silica sand; silicon dioxide) | 1,612098E-5 |
| Raw pumice | 1,515708E-8 |
| Sodium chloride (rock salt) | 6,6350191E-4 |
| Sodium nitrate | 1,001653E-19 |
| Sodium sulphate | 4,428230E-12 |
| Soil | 1,392899E-3 |
| Stone from mountains | 2,386974E-5 |
| Talc | 5,544224E-11 |
| Tin ore | 4,013913E-10 |
| <i>Renewable resources</i> | 52,62556 |
| Water | 47,464740 |
| Air | 5,158166 |
| Carbon dioxide | 2,639766E-3 |
| Nitrogen | 1,634276E-10 |
| Oxygen | 6,055231E-6 |

VI. MELLÉKLET

Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzés adatai.

VI.1. táblázat: Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzés alapadatai plazma-technológiánál szén-dioxid segédgáz alkalmazásával, 28%-os nettó villamos hatásfok, 280 F/kg CO₂ költségű és 31,88 Ft átvételi árú villamos energia mellett

| | Mennyiség | | | | | Mértékegység |
|----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|---------------------|
| | 2,8572 | 2,7143 | 2,5714 | 2,4286 | 2,2857 | |
| Levegő | 2,8572 | 2,7143 | 2,5714 | 2,4286 | 2,2857 | kg/kg _{fa} |
| Szén-dioxid | 0,0000 | 0,1429 | 0,2857 | 0,4286 | 0,5714 | kg/kg _{fa} |
| CO₂-tartalom | 0,00% | 5,00% | 10,00% | 15,00% | 20,00% | % |
| Mennyiség CO | 0,6901 | 0,7478 | 0,8054 | 0,8631 | 0,9208 | kg/kg _{fa} |
| Mennyiség H₂ | 0,0337 | 0,0337 | 0,0337 | 0,0337 | 0,0337 | kg/kg _{fa} |
| Energia CO | 6,9703 | 7,5525 | 8,1348 | 8,7174 | 9,3001 | MJ/kg _{fa} |
| Energia H₂ | 4,0380 | 4,0404 | 4,0416 | 4,0440 | 4,0452 | MJ/kg _{fa} |
| Fajlagos energiakihozatal | 11,0083 | 11,5929 | 12,1764 | 12,7614 | 13,3453 | MJ/kg _{fa} |
| Energiasűrűség változás | 1,0000 | 1,0531 | 1,1061 | 1,1593 | 1,2123 | - |
| Bevétel | 27,2957 | 28,7452 | 30,1922 | 31,6426 | 33,0904 | Ft/kg _{fa} |
| Kiadás | 0,0000 | 40,0008 | 80,0016 | 119,9996 | 160,0004 | Ft/kg _{fa} |
| Haszon | 27,2957 | -11,2556 | -49,8094 | -88,3570 | -126,9100 | Ft/kg _{fa} |

VI.2. táblázat: Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzés alapadatai plazma-technológiánál szén-dioxid segédgáz alkalmazásával változó villamos hatásfok, villamos energia átvételi ár és szén-dioxid bekerülési költség mellett

| Keverési arány [%] | Villamos hatásfok [%] | Szén-dioxid ára [Ft/kg_{CO2}] | Villamos energia átvételi ára [Ft/kWhe] | Bevétel [Ft/kg_{fa}] |
|---------------------------|------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| 5 | 25 | 0 | 25 | 20,12 |
| 5 | 25 | 0 | 27 | 21,73 |
| 5 | 25 | 0 | 29 | 23,34 |
| 5 | 25 | 0 | 31 | 24,85 |
| 5 | 25 | 0 | 33 | 26,57 |
| 5 | 25 | 50 | 25 | 12,98 |
| 5 | 25 | 50 | 27 | 14,59 |
| 5 | 25 | 50 | 29 | 16,20 |
| 5 | 25 | 50 | 31 | 17,81 |
| 5 | 25 | 50 | 33 | 19,42 |
| 5 | 25 | 100 | 25 | 5,84 |
| 5 | 25 | 100 | 27 | 7,45 |
| 5 | 25 | 100 | 29 | 9,06 |
| 5 | 25 | 100 | 31 | 10,67 |
| 5 | 25 | 100 | 33 | 12,28 |
| 5 | 27 | 0 | 25 | 21,73 |
| 5 | 27 | 0 | 27 | 23,48 |
| 5 | 27 | 0 | 29 | 25,21 |
| 5 | 27 | 0 | 31 | 26,96 |
| 5 | 27 | 0 | 33 | 28,69 |
| 5 | 27 | 50 | 25 | 14,59 |
| 5 | 27 | 50 | 27 | 16,33 |
| 5 | 27 | 50 | 29 | 18,07 |
| 5 | 27 | 50 | 31 | 19,81 |
| 5 | 27 | 50 | 33 | 21,54 |
| 5 | 27 | 100 | 25 | 7,45 |
| 5 | 27 | 100 | 27 | 9,19 |
| 5 | 27 | 100 | 29 | 10,92 |
| 5 | 27 | 100 | 31 | 12,67 |
| 5 | 27 | 100 | 33 | 14,40 |
| 5 | 29 | 0 | 25 | 23,34 |
| 5 | 29 | 0 | 27 | 25,21 |
| 5 | 29 | 0 | 29 | 27,08 |
| 5 | 29 | 0 | 31 | 28,95 |
| 5 | 29 | 0 | 33 | 30,82 |
| 5 | 29 | 50 | 25 | 16,20 |
| 5 | 29 | 50 | 27 | 18,07 |
| 5 | 29 | 50 | 29 | 19,94 |

| | | | | |
|---|----|-----|----|-------|
| 5 | 29 | 50 | 31 | 21,81 |
| 5 | 29 | 50 | 33 | 23,67 |
| 5 | 29 | 100 | 25 | 9,06 |
| 5 | 29 | 100 | 27 | 10,92 |
| 5 | 29 | 100 | 29 | 12,80 |
| 5 | 29 | 100 | 31 | 14,66 |
| 5 | 29 | 100 | 33 | 16,53 |
| 0 | 25 | 0 | 25 | 19,11 |
| 0 | 25 | 0 | 27 | 20,64 |
| 0 | 25 | 0 | 29 | 22,17 |
| 0 | 25 | 0 | 31 | 23,70 |
| 0 | 25 | 0 | 33 | 25,23 |
| 0 | 27 | 0 | 25 | 20,64 |
| 0 | 27 | 0 | 27 | 22,29 |
| 0 | 27 | 0 | 29 | 23,94 |
| 0 | 27 | 0 | 31 | 25,59 |
| 0 | 27 | 0 | 33 | 27,25 |
| 0 | 29 | 0 | 25 | 22,17 |
| 0 | 29 | 0 | 27 | 23,94 |
| 0 | 29 | 0 | 29 | 25,72 |
| 0 | 29 | 0 | 31 | 27,49 |
| 0 | 29 | 0 | 33 | 29,26 |
| 0 | 31 | 0 | 25 | 23,70 |
| 0 | 31 | 0 | 27 | 25,59 |
| 0 | 31 | 0 | 29 | 28,94 |
| 0 | 31 | 0 | 31 | 29,39 |
| 0 | 31 | 0 | 33 | 31,28 |
| 0 | 33 | 0 | 25 | 25,23 |
| 0 | 33 | 0 | 27 | 27,25 |
| 0 | 33 | 0 | 29 | 29,27 |
| 0 | 33 | 0 | 31 | 31,28 |
| 0 | 33 | 0 | 33 | 33,30 |

VI.3. táblázat: Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzés alapadatai plazma-technológiánál vízgőz segédgáz alkalmazásával, 28%-os nettó villamos hatásfok és 31,88 Ft átvételi árú villamos energia mellett

| Megnevezés | Mennyiség | | | | | Mértékegység |
|----------------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| Levegő | 2,8572 | 2,7143 | 2,5714 | 2,4286 | 2,2857 | kg/kg _{fa} |
| Vízgőz | 0,0000 | 0,1429 | 0,2857 | 0,4286 | 0,5714 | kg/kg _{fa} |
| Vízgőztartalom | 0,00% | 5,00% | 10,00% | 15,00% | 20,00% | % |
| Mennyiség CO | 0,6901 | 0,6639 | 0,6423 | 0,6240 | 0,6085 | kg/kg _{fa} |
| Mennyiség H₂ | 0,0337 | 0,0397 | 0,0454 | 0,0509 | 0,0562 | kg/kg _{fa} |
| Energia CO | 6,9703 | 6,7053 | 6,4867 | 6,3028 | 6,1457 | MJ/kg _{fa} |
| Energia H₂ | 4,0380 | 4,7640 | 5,4516 | 6,1080 | 6,7428 | MJ/kg _{fa} |
| Fajlagos energiakihozatal | 11,0083 | 11,4693 | 11,9383 | 12,4108 | 12,8885 | MJ/kg _{fa} |
| Energiasűrűség változás | 1,0000 | 1,0419 | 1,0845 | 1,1274 | 1,1708 | - |
| Bevétel | 27,2957 | 28,4387 | 29,6017 | 30,7733 | 31,9579 | Ft/kg _{fa} |