MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI
DOLGOZAT
3515 MISKOLC EGYETEMVÁROS

Nemesített energiafűz fajták tüzeléstechnikai jellemzőinek vizsgálata

Készítette:

Mentes Dóra

Konzulensek:

Dr. Szemmelveisz Tamásné

Prof. Dr. Palotás Árpád Bence

Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék

2017. november

TARTALOM

BEVEZETÉS **1**

1 NEMESÍTETT FŰZFAJTÁK KÜLSŐ TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA **3**

1.1 A fűzfajták növekedési jellemzőinek vizsgálata digitális fotográfiával **3**

1.2 Fűzfajták levelének vizsgálata **5**

1.3 Fűzfajták gyökérzetének vizsgálata, a fitoremediáció bemutatása **6**

2 MINTÁK KERESZTMETSZETI ARÁNYAINAK ELEMZÉSE **8**

3 ENERGIAFŰZ TÜZELÉSTECHNIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA **11**

3.1 Tüzeléstechnikai tulajdonságok vizsgálatának módszerei **11**

3.1.1 Nedvességtartalom meghatározása ***11***

3.1.2 Hamutartalom meghatározása ***12***

3.1.3 Elemanalízis ***13***

3.1.4 Égéshő, fűtőérték meghatározása ***15***

3.2 Tüzeléstechnikai mérési eredmények ismertetése, kiértékelése **18**

3.2.1 Nemesített fűzfa minták nedvességtartalma ***18***

3.2.1.1 Egy éves minták higroszkópos nedvességtartalma *18*

3.2.1.2 Két éves minták teljes nedvességtartalma *19*

3.2.1.3 Minták nedvességtartalmának összehasonlítása *21*

3.2.2 Nemesített fűzfa minták hamutartalma ***22***

3.2.2.1 Egy éves minták hamutartalma *22*

3.2.2.2 Két éves minták hamutartalma *23*

3.2.2.3 Minták hamutartalmának összehasonlítása *24*

3.2.3 Nemesített fűzfa minták elemi összetétele ***25***

3.2.3.1 Egy éves minták elemi összetétele *26*

3.2.3.2 Két éves minták elemanalízise *27*

3.2.3.3 Minták elemanalízisének összehasonlítása *28*

3.2.4 Nemesített fűzfa minták égéshője és fűtőértéke ***30***

3.2.4.1 Egy éves minták égéshője és fűtőértéke *30*

3.2.4.2 Két éves minták égéshője és fűtőértéke *31*

3.2.4.3 Minták fűtőértékének összehasonlítása *33*

3.3 Laboratóriumi mérési eredmények összefoglalása **35**

4 ÖSSZEFOGLALÁS **37**

Köszönetnyilvánítás **38**

IRODALOM **39**

BEVEZETÉS

Napjainkban a klímaváltozás elleni küzdelem miatt előtérbe kerültek a megújuló energiaforrások. Használatukkal kiválthatjuk a fosszilis energiahordozók egy részét, ezáltal csökkentve a klímaváltozást okozó üvegházhatású gázok kibocsátását.

A megújuló energiahordozók közé sorolhatók többek között a biomasszák, melyek egyik nagy csoportjába az energianövények tartoznak. Biomassza alapú energiatermelésnél biztosítanunk kell a megfelelő mennyiségű és minőségű tüzelőanyagokat. Az energiaültetvények fenntartásával, energianövények termesztésével, köztük az energiafűz termesztésével, fenntartható és környezetbarát energiaforrásokat tudunk előállítani az energiatermelő rendszerek számára.

A nemesítés egyik általános célja olyan energianövények létrehozása, melyek kedvező tüzeléstechnikai tulajdonságokkal rendelkeznek, valamint a növekedési ütemük is gyorsabb a nemesítetlen fajtáiknál. A Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Biológiai Kutatóközpontjában végzett kutatások célja egy olyan fűzfajta nemesítése, mely a környezetéből hatékonyabban köti meg az üvegházhatásért leginkább felelőssé tett CO_2-t. A nemesítés másik környezetvédelmi központú célja, hogy a nemesített növények alkalmassá váljanak a barnamezős területek hatékony kármentesítésére. Ez a kármentesítés a fitoremediáció, melynek lényege, hogy a talajban lévő szennyezőket (nehézfémeket) a növény a gyökérzete segítségével köti meg. Az energianövények termesztésének elsődleges célja azok energetikai hasznosítása, tehát fontos tudni, hogy a nemesítés, hogy hat az égetés szempontjából fontos tüzeléstechnikai paraméterekre.

A fűzfa az egyik legelterjedtebb energetikai növény, melynek a legismertebb fajtái a következők:

- Inger,
- Tordis,
- Energo.

A fűzfajták előnyei [1]:

- CO_2 semlegesek,
- 1 hektárnyi energiafűzből körülbelül 15-25 tonna pellet állítható elő,

- évente átlagosan 2 métert, naponta kedvező körülmények között akár 10 centimétert is nőnek,
- húszszor annyi energia állítható elő belőlük, mint amennyi energia a termelésükhöz és betakarításukhoz szükséges.

Hátrányaik [1]:

- nedvességtartalmuk nagy, melynek kivonása sok energiát igényel,
- sok időbe telik, amíg a termelésük hasznot hoz.

A legkedvezőbb tulajdonságokkal az Energo fűz rendelkezik, ezért a nemesítést az Energo fűzfajtákon végezték el. A mai ismeretek szerint az Energo fűz a leggyorsabban növő fajta. Hozama az első év után körülbelül 8-10 t/hektár/év, míg a 3. év után már 40-60 t/ha/év-et is elérheti [2].

Egy kifejlett fa magas talajvizű vagy árvizes területen naponta körülbelül 15-20 liter vizet képes elpárologtatni. Kedvező tulajdonsága közé tartozik még, hogy évente, hektáronként 20-30 tonna szennyvíziszapot is képes hasznosítani úgy, hogy a gyökérzete segítségével felszívja a szennyvíziszapban levő tápanyagokat. A betegségekkel szemben ellenálló [2].

Az energia fűz kedvezőtlen adottságú talajon is fejlődik, ugyanis a gyökérzete mélyre-nyúló. A rossz minőségű területeken humuszképzésében szintén óriási szerepe lehet [2].

Az Energo mintákon végzett nemesítési módszer a poliploidizáció volt, mely a teljes génállomány megsokszorozásán alapul. A poliploidizáció lényege, hogy az eredeti minták kedvező tulajdonságait felerősítsék, a rossz tulajdonságait pedig gyengítsék [3].

A munkám célja meghatározni, hogy a nemesített fűzfajták közül melyik hasznosítható legeredményesebben energetikai célokra. A legkedvezőbb tüzeléstechnikai tulajdonságokkal rendelkező fűzfajta energianövényként történő termesztése a jövőben jelentős szerepet játszhat a biomasszák energetikai hasznosítása, valamint az üvegházhatású gázok csökkentése terén.

1 NEMESÍTETT FŰZFAJTÁK KÜLSŐ TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

Környezetvédelmi szempontból a tüzeléstechnikai tulajdonságok mellett a külső tulajdonságok, mint például levél- és gyökérzetméret stb., ugyanolyan fontosnak bizonyulnak. A különböző levélméretek a CO_2 megkötésének hatékonyságáról, míg a gyökérzetek nagysága a tápanyag- és vízfelvétel hatékonyságáról nyújtanak információt. A nemesített fűzfajták külső jellegének vizsgálatát a Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Biológiai Kutatóközpontja végezte el. A kutatásuk eredményeit az alábbiakban ismertetem.

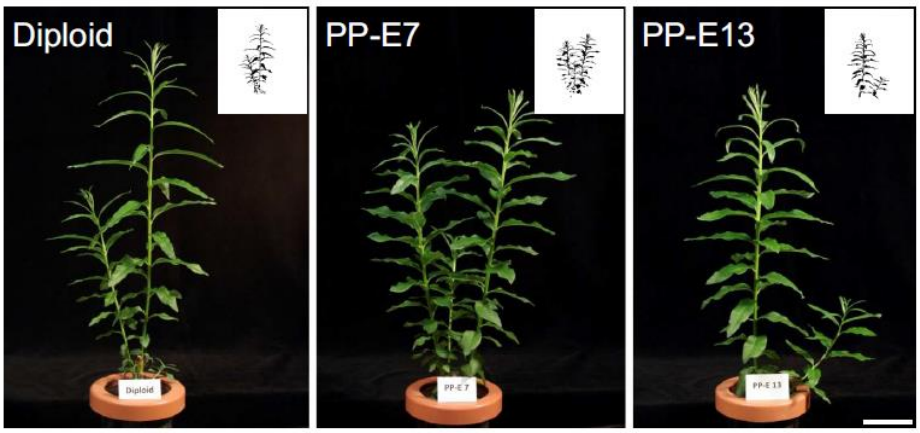
1.1 A fűzfajták növekedési jellemzőinek vizsgálata digitális fotográfiával

Az alvó dugványokat egy speciális, földet tartalmazó nevelő edénybe ültették és szabályozott üvegháztartási körülmények között nevelték. A hajtások zöldfelületének gyarapodását az azonos időközönként elkészített fotókkal követték nyomon. A képeken számítógépes analízis segítségével becsülték meg a zöld színű pixelpontok számát, melyek folyamatos változásából következtetni lehetett a növekedési jellemzőkre [4,5].

A poliploidizációt az Energo fűzfajtán végezték el, melynek következtében több, különböző génállománnyal rendelkező, nemesített fűzfajta jött létre. A poliploidizált növények a továbbiak során PP jelöléssel fognak szerepelni a dolgozatban. A PP jelölést követő számok a növények génállományáról adnak információt.

A hét hetes kísérlet alatt, minden egyes vizsgálat során a PP2 és PP10 (nemesített) növények nagyobb hajtási-felülettel rendelkeztek, mint az eredeti Energo fűzfajták. Ezzel ellentétben a PP13 növények mindvégig kevesebb zöld felülettel rendelkeztek, mint a Energo fűzfajták. Ezek statisztikailag nem szignifikáns eredmények, ugyanis a hajtások zöld pixelszámait számos tényező befolyásolhatja, mint például hajtás hossz, törzsátmérő, levelek száma, levelek méretei és alakja. A növekedési jellemzőket üvegházhatási és normál körülmények között is megvizsgálták [4].

A héthetes üvegházhatási körülmények között végzett külsőjelleg vizsgálat alapján megállapították, hogy a nemesített növények elsődleges hajtáshossza 20-25%-kal volt rövidebb az Energo növények hajtáshosszánál. A rövidebb hajtáshossz és a másodlagos hajtásfejlődés között szoros kapcsolat állt fent, mely több nemesített növénynél vastagabb szár átmérőt eredményezett, mint például PP2, PP7 és a PP13 növények esetében **(1. ábra)** [4].



1. ábra: Az eredeti és nemesített fűzfajták hajtás-fotói [4]

A növekedési jellemzőket újra növő hajtások esetében is megvizsgálták tavasszal, szabadföldi körülmények között. Az **1. táblázatban** látható, hogy a vizsgált nemesített változatok elsődleges hajtáshosszának növekedési üteme minden esetben lassabb volt, mint az Energo növényeknél. Ahhoz, hogy vizsgálni tudják a másodlagos növekedési jellemzőket, a hajtások átmérőjét is meg kellett mérniük. Kivétel nélkül, a nemesített növények átlagosan vastagabb szárakkal rendelkeztek. A PP3, PP12, PP13 növények statisztikailag szignifikáns növekedést mutattak a másodlagos fejlődésben [4].

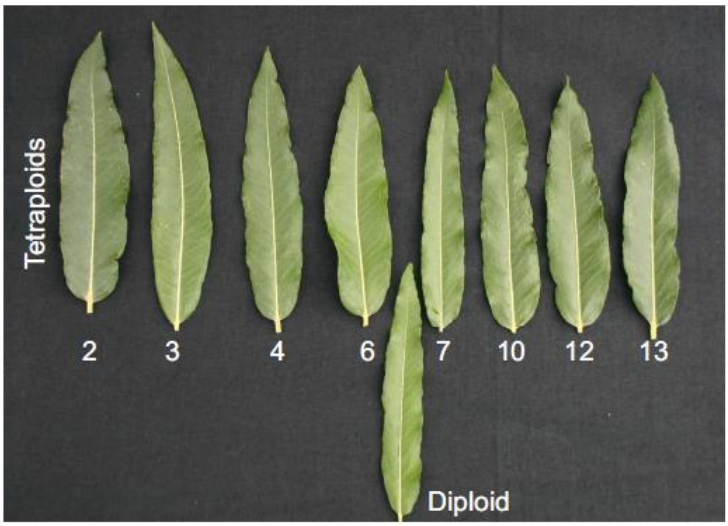
1. táblázat: Fűzfajták hajtáshosszának és szár átmérőinek adatai [4]

Genotípus	Hajtáshossz 0.nap [cm]	Hajtáshossz 8. nap [cm]	Szár átmérő 0. nap [mm]	Szár átmérő 8. nap [mm]
Energo	52,02 ± 3,79	83,08 ± 7,04	5,76 ± 0,77	6,59 ± 0,60
PP2	42,68 ± 2,39	68,36 ± 4,57	6,31 ± 0,41	7,27 ± 0,71
PP3	39,48 ± 3,64	64,96 ± 5,61	6,33 ± 0,66	7,59 ± 0,68
PP4	38,60 ± 2,63	63,90 ± 7,59	6,33 ± 0,60	7,22 ± 0,45
PP5	38,66 ± 2,20	60,93 ± 4,28	5,99 ± 0,54	7,01 ± 0,55
PP6	36,46 ± 2,73	58,74 ± 4,92	5,87 ± 0,51	6,85 ± 0,63
PP7	37,56 ± 2,55	58,16 ± 3,24	6,09 ± 0,50	6,76 ± 0,54
PP12	42,09 ± 3,59	69,76 ± 4,36	5,90 ± 0,53	7,46 ± 0,64
PP13	40,36 ± 2,74	66,28 ± 4,41	5,97 ± 0,50	7,12 ± 0,54

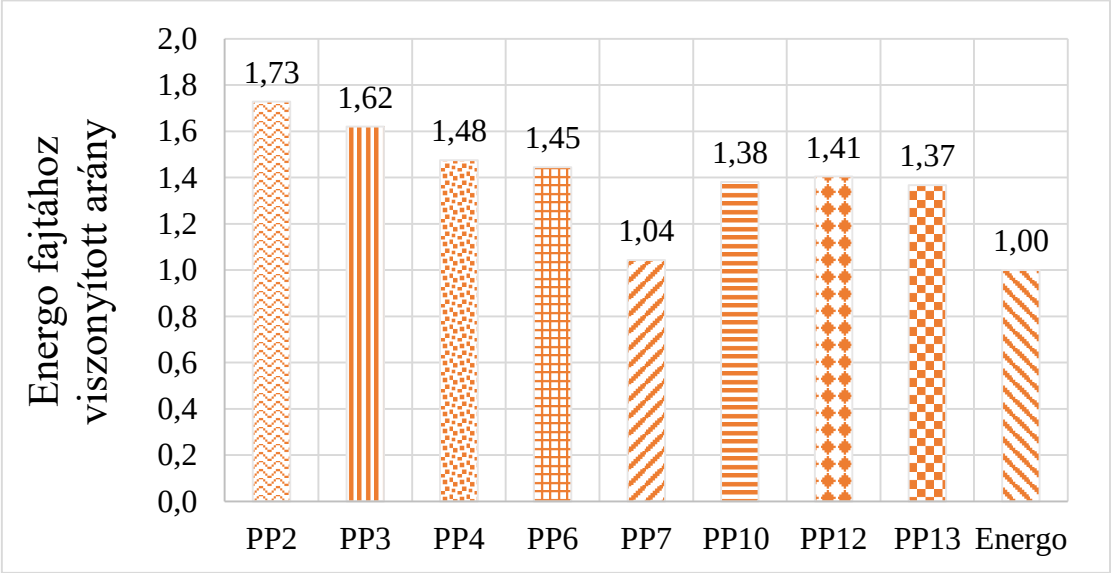
1.2 Fűzfajták levelének vizsgálata

A nemesített fűzfajták külső jellegének vizsgálata során bebizonyosodott, hogy nagyobb lombozattal, ezáltal nagyobb levél- és zöldfelülettel is rendelkeznek. Leveleik szignifikánsan szélesebbek, középerezeteik vastagabbak az Energo növényekénél. Ez a jellemző a PP7 növények esetében volt a legjelentősebb, leveleiknek átlagos területe 0,72 x 10^6 μm^2 volt. Ez az érték kétszer akkora, mint az Energo növények értékei (0,33 x 10^6 μm^2) [4].

A nagyobb levélfelület, több CO_2-t tud megkötni a környezetéből.



2. ábra: A fűzfafajták levelei [4]



3. ábra: Energo levélterületéhez viszonyított nemesített növényekhez tartozó levélterület arányok (2. ábra alapján) [Saját szerkesztés]

A **3. ábrán** az Energo levélterületéhez viszonyított nemesített mintákhoz tartozó levélterület arányokat tüntettem fel. A területarányokat a **2. ábrán** látható levelek pixelelemzése alapján, ImageJ nevű program segítségével határoztam meg.

Az Energo minta levélterület rendelkezett a legkisebb mérettel, ezért hozzá kellett viszonyítani a nemesített levelek területeihez. A PP2 levele 73 %-kal volt nagyobb az Energo levélterületénél, tehát CO_2 megkötésének szempontjából ez a minta rendelkezik a legjobb paraméterrel.

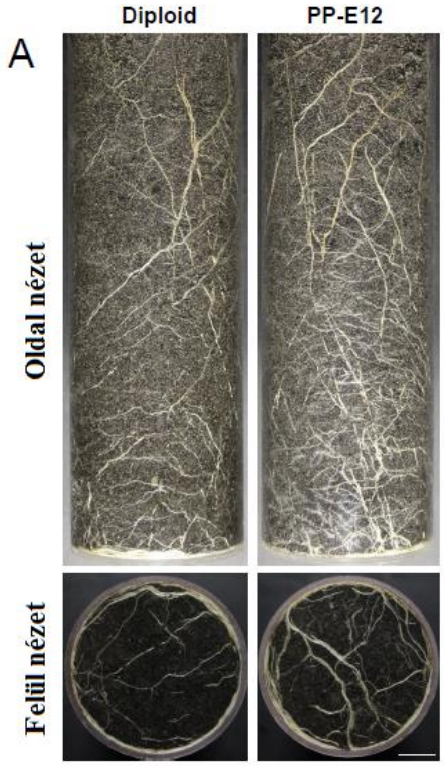
1.3 Fűzfajták gyökérzetének vizsgálata, a fitoremediáció bemutatása

A nemesített növények esetében célunk, hogy gyökérzetük a földből hatásosabban vonja ki a vizet, a tápanyagokat és a szennyezőanyagokat.

A nemesített fűzfajták dúsabb gyökérzettel rendelkeztek (**4. ábra**). A nemesített növények a mélyre nyúló gyökérzetük segítségével könnyebben találják meg és hatékonyabban nyerik ki a földből a tápanyagokat, a felszín alatti vizekben oldott ásványi sókat, valamint a vizet, mint az eredeti Energo fűzfajták. Ez a növények gyorsabb növekedését eredményezheti. [4]

A szennyezett talajok méregtelenítésére ugyancsak használhatják a megnövekedett gyökérzettel rendelkező nemesített növényeket. A fűzfajták levélének és gyökérzetének nagyságát erősen befolyásolhatja a fitoremediáció eredményessége, azaz, hogy a növények milyen hatékonyan távolítják el a nehézfémeket és szerves szennyezőanyagokat a környezetükből [4].

A nehéz fémekkel szennyezett talaj rehabilitációjának egyik megvalósítható eljárása a különböző nehézfémek felvételére képes fafajok helyszíni telepítése. Ezt a fajta tisztítási technikát fitoextrakciónak nevezik, mely egyszerű és környezetbarát módszernek tekinthető az ipari barnamezős területek helyreállítására. A fitoextrakció a fitoremediációnak egyik eljárási módszere [6].



4. ábra: Fűzfafajták gyökérzet-fotói [4]

Az aktuális helyzettől függően számos tisztítási technológia áll rendelkezésre a helyreállításhoz. Megkülönböztethetünk in situ, ami a helyszíni eltávolítást és ex situ, azaz a helyszínen kívüli ártalmatlanítási eljárásokat [6].

Az in situ helyreállítás magába foglalja a bio-szellőztetést, a fitoremediációt, a talajmosást és a talaj szellőztetését. Ezek a folyamatok a talaj jó áteresztőképességét és a szennyezőanyag egyenletes eloszlását igénylik [6].

Az ex situ módszerek közé tartozik a komposztálás, elválasztás, égetés / égés, termikus deszorpció és pirolízis. Ezek a folyamatok kevésbé érzékenyek a talaj áteresztőképességére és a szennyezőanyag inhomogenitásra vagy az egyenetlen fémeloszlásra. Hátránya, hogy alkalmazása drága [6].

Amikor a szerves vagy szervetlen szennyező anyagokat eltávolítják, átalakítják vagy megszilárdítják a fitoremediáció útján, elengedhetetlen, hogy a fémgyűjtő növények semmilyen módon ne váljanak az élelmiszerlánc részévé. Minden tisztítási technológia dupla funkcióval rendelkezik: a károsodásellenőrzés és a szennyezett területek fenntartható újrahasznosítása [6].

2 MINTÁK KERESZTMETSZETI ARÁNYAINAK ELEMZÉSE

A szegedi Kutatóközponttól kapott mintákat két nagy csoportra lehetett bontani: két éves, illetve egy éves szárak csoportjára.

A minták azonos időben, azonos termesztési körülmények között, szántóföldön termesztett növényekről származnak. A két éves minták frissen vágott állapotban érkeztek a tanszékünkre 2017 tavaszán. Az egy éves szárakat 2016 telén vágták le, majd üvegházban tárolták. A tanszékünkre légszáraz állapotban érkeztek.

5. ábra: Két éves szárak (bal), és az egy éves (jobb) szárak [Saját kép]

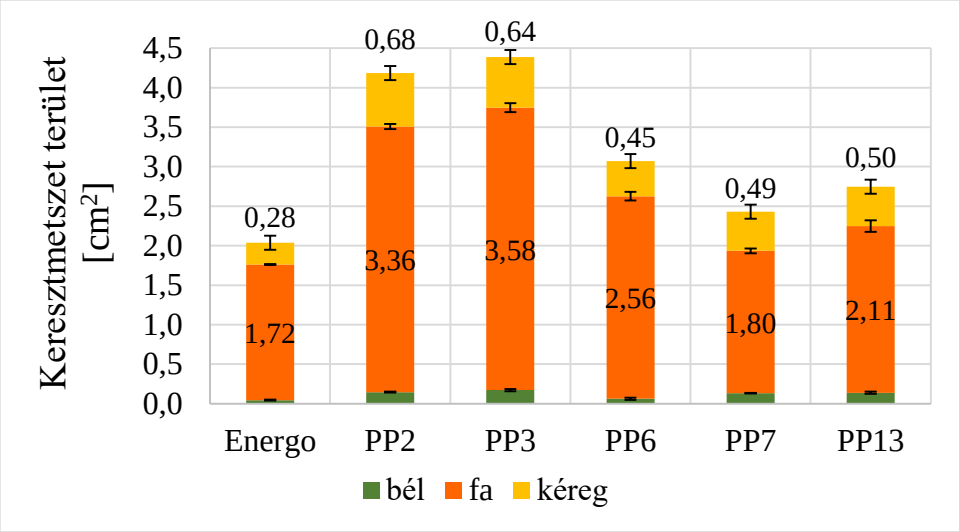
Az **5. ábra** bal oldalán a két éves minták, míg az ábra jobb oldalán az egy éves minták képei láthatók. Az öregebb minták kérgei keményebbek, vastagabbak, és szürke színűek, míg a fiatalabb minták kérgei vékonyabbak, lágyabbak és barna színűek.

A kutatás során a két éves csoportot további két alcsoportra bontottam: vastagabb és vékonyabb szárak csoportjára. A vastagabb és vékonyabb szárak méretei fűzfajtánkként eltérő, a mérettartományokat az **2. táblázatban** tüntettem fel.

2. táblázat: Vastagabb és vékonyabb szárak keresztmetszetének mérettartományai [Saját szerkesztés]

	Eredeti, nedves állapot	**Légszáraz állapot**
Vastagabb szár [mm]	15,90 – 27,15	14,16 – 23,92
Vékonyabb szár [mm]	11,13 – 19,23	9,38 – 17,52

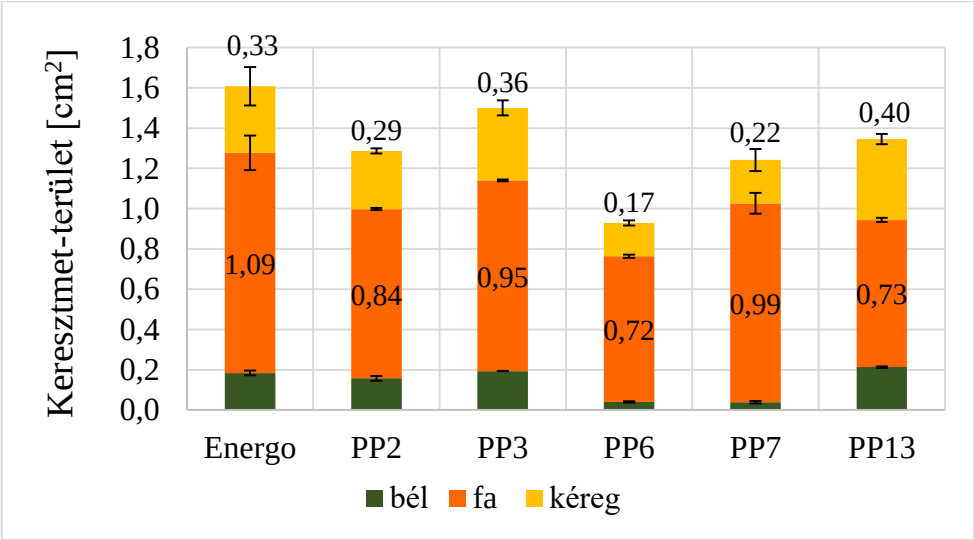
A két éves minták a száradás során körülbelül 11 – 15 %-os keresztmetszet-csökkenésen mennek keresztül.



6. ábra: Légszáraz állapotban lévő Két éves fűzfaminták bél, fa és kéreg arányai [Saját szerkesztés]

A **6. ábrát** az ImageJ képelemző program segítségével tudtam elkészíteni, melyen az általam vizsgált két éves fűzfaminták bél, fa és kéreg arányait tüntettem fel. A **6. ábra** alapján megállapítható, hogy az Energo minta rendelkezik a legkisebb keresztmetszettel. A nemesített növényeknek mind a bél, mind a fa és mind a kéreg részük nagyobb, mint az Energo mintáé.

A két éves minták megfelelően igazolják azt az állítást, hogy a nemesített minták vastagabb keresztmetszettel rendelkeznek. Erről a 2.1-es fejezetben olvashattak.



7. ábra: Légszáraz állapotban lévő egy éves fűzfaminták bél, fa és kéreg arányai [Saját szerkesztés]

A **7. ábra** egy éves fűzfaminták bél, fa és kéreg arányait mutatja meg.

Az egy éves fűzfajták esetében az Energo minta rendelkezik a legnagyobb keresztmetszettel és fa résszel is. A PP2, PP6 és PP7 minták kéreg része kisebb, PP3 és PP13 minták kéreg része pedig nagyobb az Energo minta kéreg részénél.

A PP6 minta keresztmetszete, kéreg, fa és bél része a legkisebb.

3 ENERGIAFŰZ TÜZELÉSTECHNIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

A fás biomassza tüzelőanyagok energiafelhasználásának potenciálját összetételük befolyásolja. A felszín alatti vízben feloldott és a gyökérzet által felszívott ásványi sók a növények növekedése során a gyökérből a levélbe vándorolhatnak. A frissen kivágott fa nagy mennyiségű vizet tartalmaz, amely a szárítás során elpárolog, de a felszívott ásványi sók a fában maradnak. Az energetikai felhasználás előtt a nehézfémtartalom és a növények kémiai összetételének vizsgálata tájékoztatást nyújt az alapanyag égetése során tapasztalt viselkedéséről, és tájékoztatást adhat az égéstermékek toxicitásáról is [7].

A 4. fejezet első felében a tüzeléstechnikai tulajdonságok vizsgálatának módszereit fogom bemutatni, míg a második felében a laboratóriumi vizsgálatok eredményeit ismertetem és kiértékelem azokat.

3.1 Tüzeléstechnikai tulajdonságok vizsgálatának módszerei

A tüzeléstechnikai paraméterek meghatározása előtt tisztában kell lennünk a paraméterek pontos fogalmával, illetve az ehhez tartozó vizsgálati módszerekkel. Ebben az alfejezetben ezeket fogom ismertetni.

3.1.1 Nedvességtartalom meghatározása

A nedvességtartalom a durva nedvesség mennyiségének és a higroszkópos nedvesség mennyiségének összegéből tevődik össze.

A biomasszák légszáraz állapot eléréséig történő szárítása szobahőmérsékleten hosszú időt is igénybe vehet, ami a hidrofil tulajdonságuknak köszönhető. A hidrofil tulajdonság azt jelenti, hogy a környezetükben lévő nedvességet felveszik. A tömegállandóság elérése akár napokig is eltarthat, ami a környezet páratartalmától függően folyamatosan változhat [8].

Durvanedvesség meghatározására a mintákat 40 °C-os szárítókemencébe helyezzük és tömegállandóságig szárítjuk, annak érdekében, hogy a légszáraz állapotot elérjük, felgyorsítva ezzel a szobahőmérsékleten történő lassú száradást [8].

A biomasszák higroszkópos nedvességtartalmának meghatározása szárító kemencében 105 ± 5 ºC-on tömegállandóságig történő szárítással, az MSZ EN 14774:2010 szabvány alapján történik [8].

A légszáraz állapotban lévő minták higroszkópos nedvességtartalmából és az előszárítással meghatározott durva nedvességtartalomból tevődik össze az teljes nedvességtartalom a következő egyenlet alapján:

$$M_{ar} = M_{ad} \times \frac{100-M_p}{100-M_d} + M_p \quad \left[\%\frac{m}{m}\right], \text{ ahol} \qquad (1)$$

M_{ar} – eredeti állapotban lévő minták nedvességtartalma (teljes nedvességtartalom/ eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_{ad} – légszáraz / elemzési állapotban lévő minták nedvességtartalma (higroszkópos nedvesség) [% m/m],

M_p – előszárítással meghatározott nedvességtartalom (durvanedvesség) [% m/m],

M_d – száraz állapotban lévő minták nedvességtartalma [% m/m].

Az eddigi biomassza tüzelési tapasztalatok azt mutatják, hogy a kazánban történő eltüzelés során, a kazán méretétől függetlenül (kis-, közepes teljesítményű, illetve erőműi kazánok), gondot okoz a tüzelőanyag nedvességtartalma. A kis és közepes teljesítményű kazánoknál a probléma megoldása a nedves tüzelőanyag gyors száradását, tökéletes elégetését biztosító tűztér kialakítása lehet [8].

3.1.2 Hamutartalom meghatározása

A hamutartalom a minta azon mennyisége, amely az égetés után szilárd halmazállapotban marad vissza. Meghatározása 815 ± 15 ºC - on tömegállandóságig történő hevítéssel történik az MSZ EN 14775:2010 szabvány alapján [8].

A biomasszák elégetésekor keletkező égési maradék (hamu, salak,) egyrészt a tűztérben, másrészt a füstgáz egyik alkotójaként, szállóporként van jelen a rendszerben (kazánban). A hamut és a szállóport alkotó részecskék a tökéletlen égésből és a nem éghető tüzelőanyag komponensekből jönnek létre [8].

Az üzemi tapasztalatok alapján a biomassza tüzelés legkritikusabb része a szilárd égési maradék, a hamu okozta salakosodás, amit a tüzelőanyag szervetlen alkotórészei okoznak, melyekből a biomasszák sokfélét tartalmaznak (például: K, Na, Si) [8].

Légszáraz (higroszkópos nedvességet tartalmazó) -, száraz (0 % nedvességet tartalmazó)- és eredeti (teljes nedvességet tartalmazó) állapotra vonatkoztatva a hamutartalmat a következő egyenletekkel számolhatjuk ki:

$$A_d = A_{ad} \times \frac{100-M_d}{100-M_{ad}} \left[\% \frac{m}{m}\right] \quad (2)$$

$$A_{ar} = A_d \times \frac{100-M_{ar}}{100-M_d} \left[\% \frac{m}{m}\right], \text{ ahol} \quad (3)$$

A_d – száraz állapotban lévő minták hamutartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

A_{ad} – légszáraz/elemzési állapotban lévő minták hamutartalma (higroszkóposnedvesség) [% m/m],

A_{ar} – eredeti állapotban lévő minták hamutartalma (teljes nedvességtartalom/eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_{ad} – légszáraz / elemzési állapotban lévő minták nedvességtartalma (higroszkópos nedvesség) [% m/m],

M_{ar} – eredeti állapotban lévő minták nedvességtartalma (teljes nedvességtartalom/ eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_d – száraz állapotban lévő minták nedvességtartalma [% m/m].

A (2) egyenletben légszáraz állapotról száraz állapotra vonatkoztatunk, míg a (3) egyenletben száraz állapotról eredeti állapotra vonatkoztatunk.

3.1.3 Elemanalízis

Elemanalízis keretében a C-, H-, N-, S- összetevők meghatározása Carlo Erba EA1108 típusú elemanalizátorral az MSZ EN 15104:2011 szabvány alapján (**8. ábra**).

A biomassza elemanalízisére a fűtőérték meghatározása, illetve az égetés során létrejövő káros légszennyezők (CO_2, SO_2, NO_x) mennyiségének meghatározása miatt van szükség. Az elemanalízis során a biomasszában lévő karbon-, hidrogén-, kén- , nitrogén- és oxigénelemek mennyiségéről kaphatunk információt [9].

Az elemanalízis a tüzelőanyag tökéletes elégetésén alapul. A keletkező füstgáz összetételéből következtethetünk az elemek mennyiségére. A füstgázt hélium vivőgáz segítségével oxidáló és redukáló részeken átáramoltatva kromatográfiás oszlopra vezetjük, ahol a hővezetőképesség-detektor érzékeli a CO_2, H_2O, N_2, SO_2 gázkomponenseket. Ezekből az adatokból számíthatóvá válik a biomasszában található elemek mennyisége [9].

8. ábra: Carlo Erba EA1108 típusú elemanalizátor [10]

A C- összetevő meghatározása a következő egyenletek alapján történik:

$$C_d = C_{ad} \times \frac{100-M_d}{100-M_{ad}} \left[\% \frac{m}{m}\right] \quad (4)$$

$$C_{ar} = C_d \times \frac{100-M_{ar}}{100-M_d} \left[\% \frac{m}{m}\right], \text{ ahol} \quad (5)$$

C_d – száraz állapotban lévő minták karbontartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

C_{ad} – légszáraz/elemzési állapotban lévő minták karbontartalma (higroszkóposnedvesség) [% m/m],

C_{ar} – eredeti állapotban lévő minták karbontartalma (teljes nedvességtartalom/eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_{ad} – légszáraz / elemzési állapotban lévő minták nedvességtartalma (higroszkópos nedvesség) [% m/m],

M_{ar} – eredeti állapotban lévő minták nedvességtartalma (teljes nedvességtartalom/ eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_d – száraz állapotban lévő minták nedvességtartalma [% m/m].

A N-, és S- tartalom meghatározása szintén a (4) és (5) egyenletek alapján történik, a megfelelő behelyettesítéseket alkalmazva. A hidrogéntartalom meghatározása eltérő, a következő egyenletek alapján számítható:

$$H_d = (H_{ad} - \frac{M_{ad}}{8{,}937}) \times \frac{100-M_d}{100-M_{ad}} \quad \left[\%\frac{m}{m}\right] \tag{6}$$

$$H_{ar} = (H_d + \frac{M_{ar}}{8{,}937}) \times \frac{100-M_{ar}}{100-M_d} \quad \left[\%\frac{m}{m}\right], \text{ ahol} \tag{7}$$

H_d – száraz állapotban lévő minták hidrogéntartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

H_{ad} – légszáraz/elemzési állapotban lévő minták hidrogéntartalma (higroszkóposnedvesség) [% m/m],

H_{ar} – eredeti állapotban lévő minták hidrogéntartalma (teljes nedvességtartalom/eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_{ad} – légszáraz / elemzési állapotban lévő minták nedvességtartalma (higroszkópos nedvesség) [% m/m],

M_{ar} – eredeti állapotban lévő minták nedvességtartalma (teljes nedvességtartalom/ eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_d – száraz állapotban lévő minták nedvességtartalma [% m/m],

8,937 – átszámítási faktor a hidrogén és a víz között.

3.1.4 Égéshő, fűtőérték meghatározása

Égéshő meghatározása Parr 6200 izoperibolikus bombakaloriméterrel az MSZ EN 14918:2010 szabvány alapján (**9. ábra**).

Az égéshő az a hőmennyiség, ami a tüzelőanyag tömegegységének tökéletes elégetésekor felszabadul, a folyamat után pedig a tüzelőanyag hidrogéntartalmának égéséből és a nedvességtartalmából származó víz folyékony halmazállapotban van jelen [11].

A fűtőérték az a hőmennyiség, amely a tüzelőanyag tömegegységének tökéletes elégetésekor szabadul fel, ha a tüzelőanyag hőmérséklete az elégetés előtt, valamint a keletkezett égéstermékek hőmérséklete az elégetés után egyaránt 20°C, a tüzelőanyag karbon tartalma szén-dioxid alakjában van jelen az égéstermékben, a tüzelőanyag eredeti nedvessége és az elégetéskor keletkező víz pedig az elégetés után gőz halmazállapotú [8].

9. ábra: Parr 6200 izoperibolikus bombakaloriméter [12]

A bombakaloriméter az égéshőt a minta, valamint egy ismert tömegű és égéshőjű kalibráló anyag, jelen esetben benzoesav elégetéséből felszabaduló hőmennyiség összehasonlítása alapján számolja ki [11].

Az égetés nagynyomású oxigén atmoszférában, fém nyomástartó edényben történik. Az égés során felszabaduló hőmennyiséget adszorbeáló közeg (desztillált víz) segítségével elnyeletjük. A folyamat során a készülék a desztillált víz hőmérsékletváltozását rögzíti, az így kapott adat illetve a kalibráció során előzetesen meghatározott kaloriméter hőkapacitás szorzataként számíthatjuk ki az égetéskor felszabaduló hőmérsékletet. Ezt az értéket elosztva a bemért minta tömegével kapjuk az egységnyi tömegű mintából felszabadítható hőt. A kapott értéket korrigálni kell a minta égésétől különböző mellékfolyamatok figyelembevételével [11].

A fűtőértéket az égésmeleg, a nedvesség és a hidrogéntartalom méréssel történő meghatározása után azok eredményeiből számíthatjuk ki, a következő egyenletek segítségével:

$$O_d = 100 - (C_d + H_d + N_d + S_d + A_d) \quad \left[\%\frac{m}{m}\right], \tag{8}$$

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr,ad} \times \frac{100-M_d}{100-M_{ad}} \left[\frac{kJ}{kg}\right], \tag{9}$$

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212{,}2 \times H_d - 0{,}8 \times (O_d + N_d) \left[\frac{kJ}{kg}\right], \tag{10}$$

$$q_{p,net,ar} = \left(q_{p,net,d} \times \frac{100-M_{ar}}{100-M_d}\right) - 24{,}43 \times M_{ar}, \left[\frac{kJ}{kg}\right], \tag{11}$$

$$q_{p,net,ad} = \left(q_{p,net,d} \times \frac{100-M_{ad}}{100-M_d}\right) - 24{,}43 \times M_{ad} \left[\frac{kJ}{kg}\right] \text{, ahol} \tag{12}$$

O_d – száraz állapotban lévő minták oxigéntartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

C_d – száraz állapotban lévő minták karbontartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

H_d – száraz állapotban lévő minták hidrogéntartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

N_d – száraz állapotban lévő minták nitrogéntartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

S_d – száraz állapotban lévő minták kéntartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

A_d – száraz állapotban lévő minták hamutartalma (0 % nedvességet tartalmazó) [% m/m],

M_{ad} – légszáraz / elemzési állapotban lévő minták nedvességtartalma (higroszkópos nedvesség) [% m/m],

M_{ar} – eredeti állapotban lévő minták nedvességtartalma (teljes nedvességtartalom/ eredeti nedvességi állapot) [% m/m],

M_d – száraz állapotban lévő minták nedvességtartalma [% m/m],

$q_{V,gr,ad}$ – égéshő légszáraz / elemzési állapotra vonatkoztatva (higroszkópos nedvesség) [kJ/kg]

$q_{V,gr,d}$ – égéshő száraz állapotra vonatkoztatva (0 % nedvességet tartalmazó) [kJ/kg]

$q_{p,net,ar}$ – fűtőérték eredeti állapotra vonatkoztatva (teljes nedvességtartalom) [kJ/kg]

$q_{p,net,ad}$ – fűtőérték légszáraz / elemzési állapotra vonatkoztatva (higroszkópos nedvesség) [kJ/kg]

$q_{p,net,d}$ – fűtőérték száraz állapotra vonatkoztatva (0 % nedvességet tartalmazó) [kJ/kg]

3.2 Tüzeléstechnikai mérési eredmények ismertetése, kiértékelése

Cél az energianövények energetikai hasznosítása, ezért az elégetéshez feltétlenül szükséges a tüzelőanyagok tüzeléstechnikai tulajdonságainak ismerete is.

Ebben a fejezetben a vizsgált minták laboratóriumi mérés eredményeit ismertetem és értékelem. A laboratóriumi vizsgálatok során meghatározott alapvető tüzeléstechnikai jellemzők a következők: nedvességtartalom, hamutartalom, elemi összetétel, égéshő és fűtőérték.

Az egy éves minták légszáraz állapotra vonatkoztatott, míg a két éves minták nedves állapotra vonatkoztatott értékeit tüntetem fel a 4.2 fejezet alfejezeteiben. Az összehasonlítást minden esetben száraz állapotra vonatkoztatva végeztem el.

3.2.1 Nemesített fűzfa minták nedvességtartalma

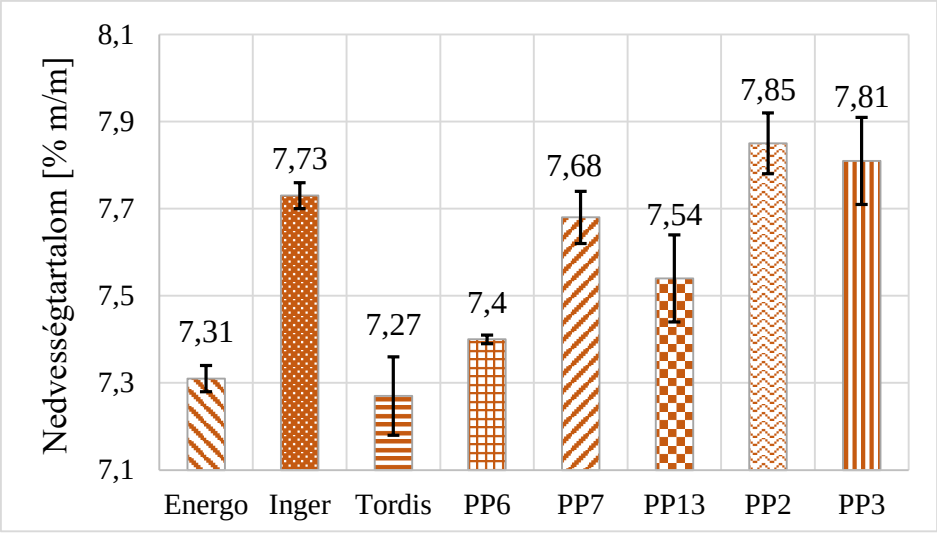
Az egyik legfontosabb tüzeléstechnikai jellemző a nedvességtartalom. Ennek oka, hogy a nagyobb nedvességtartalom tüzeléstechnikai szempontból kedvezőtlen, hiszen csökkenti a biomassza fűtőértékét és növeli a füstgáz mennyiségét.

A nagy nedvességtartalommal rendelkező mintákat még az égetés előtt szárítani kell, hogy a tüzelőberendezésben biztosan elérjük a megfelelő hőmérsékletet. A szárítás tarthat hosszú, illetve rövid ideig, attól függően, hogy a mintákat milyen úton szárítjuk. A minták száradhatnak szabadon, vagy szárítókemencében. Ennek függvényében a szárítókemence használata megnöveli az energiafelhasználást, ezáltal a költségeket is.

3.2.1.1 Egy éves minták higroszkópos nedvességtartalma

A **10. ábrán** az egy éves energiafűz minták nedvességtartalma látható, % m/m-ban, eredeti, légszáraz állapotra vonatkoztatva.

A **10. ábrán** látható, hogy a fiatalabb energiafűz Energo fajtájának nedvességtartalma jóval kisebb (7,31 % m/m), mint az Energo fajtából származtatható, nemesített energiafűz növények nedvességtartalma, melyek a **10. ábrán** PP jelöléssel rendelkeznek. Az Energo fajtához képest nagyobb értékkel rendelkezik a PP2-es minta, számszerűen 7,85% m/m-kal.



10. ábra: Egy éves energiafűz minták nedvességtartalma % m/m-ban, eredeti, légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

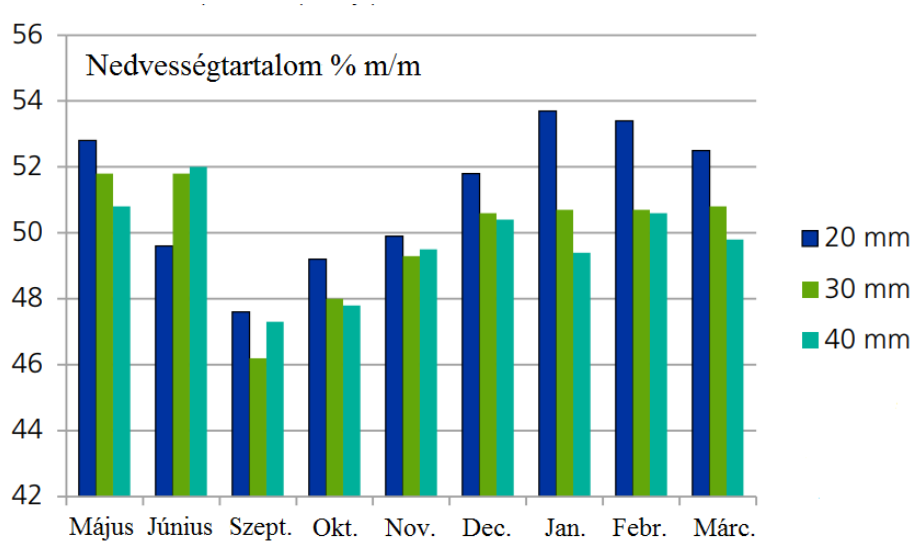
Nedvességtartalom szempontjából tüzeléstechnikailag kedvezőbb paraméterekkel az Energo minta, míg tüzeléstechnikailag kedvezőtlen értékekkel a PP2 minta rendelkezik.

3.2.1.2 Két éves minták teljes nedvességtartalma

Az egyik tanulmányban a fűzfa biomassza nedvességtartalma kereskedelmi betakarításnál 37 és 51% m/m között volt, átlagosan 44% m/m. Az összehasonlításhoz használt kézzel betakarított fűzfa minták nedvességtartalma 45 és 56% m/m között volt, átlagosan 46% m/m [13].

Másik tanulmányban kilenc féle fűzfajta 15 klónjának vizsgálatából megállapították, hogy a teljes nedvességtartalom az egy éves minták esetében 52,32% m/m, míg a három éves minták esetében 50,01% m/m. Tehát az egy éves minták nedvességtartalma 2,31%-kal volt nagyobb, mint a három éves mintáké. Ez a különbség azzal magyarázható, hogy a növények a legtöbb tápanyagot és vizet a fejlődő részeibe továbbítja [14].

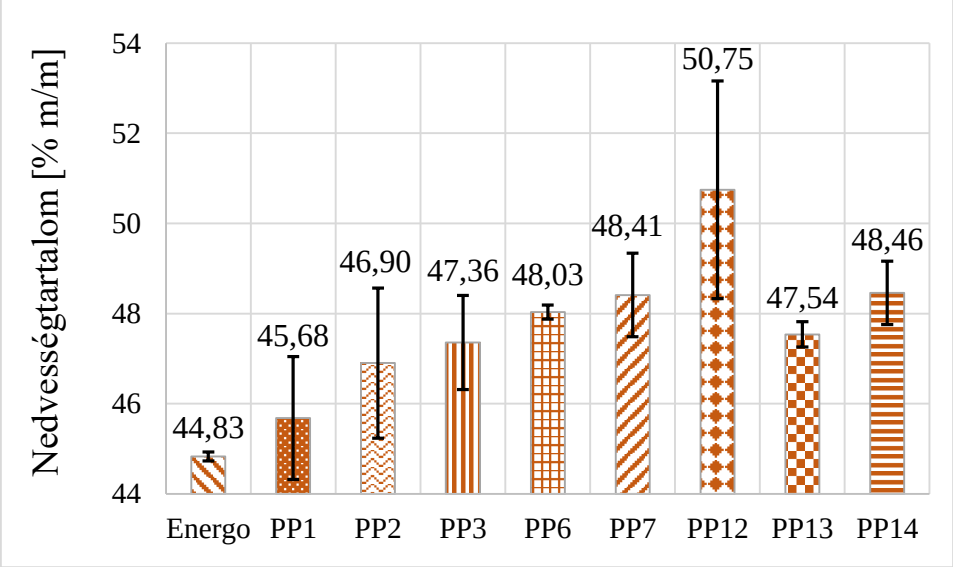
A fűzfa minták teljes nedvességtartalmát nem csak az befolyásolhatja, hogy milyen fajtából származik a növény, illetve milyen a betakarítási módja, hanem azt is figyelembe kell venni, hogy az év melyik szakaszában aratjuk és milyen átmérővel rendelkezik. Ezt a **11. ábra** szemlélteti.



11. ábra: Tordis fűzfajta nedvességtartalma az év különböző hónapjaiban és a szárátmérők függvényében [15]

Látható, hogy a 20 mm-es átmérővel rendelkező minták nedvességtartalma júniust leszámítva, minden hónapban nagyobb, mint a 30 mm-és és 40 mm-es átmérővel rendelkező minták nedvességtartalma.

A **12. ábrán** a két éves energiafűz minták nedvességtartalma látható, % m/m-ban, eredeti, frissen vágott állapotra vonatkoztatva.



12. ábra: Két éves energiafűz minták nedvességtartalma % m/m-ban, eredeti, frissen vágott állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

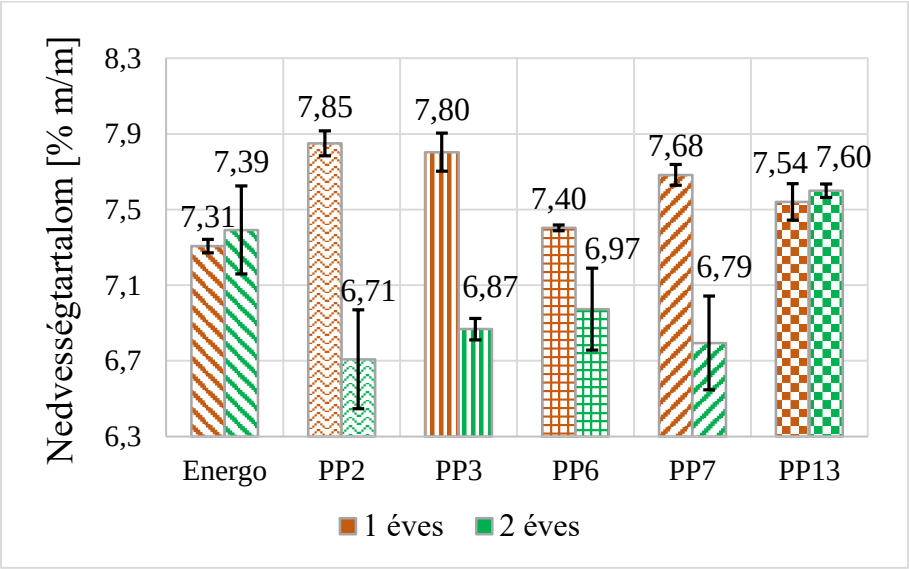
Az **12. ábrán** megfigyelhető, hogy az idősebb Energo fafajta teljes nedvességtartalma jóval kisebb a többi fafajtáénál (44,83% m/m). A PP12 fafajta kiemelkedő nedvességtartalommal rendelkezik, számszerűleg 50,75% m/m-kal.

Nedvességtartalom szempontjából tüzeléstechnikailag kedvezőbb paraméterekkel az Energo minta, míg tüzeléstechnikailag kedvezőtlen értékekkel a PP12 minta rendelkezik.

Annak érdekében, hogy megfelelő égési hőmérsékletet érjünk el, az energiafűz mintáknak 30% m/m, vagy annál kisebb nedvességtartalommal kell rendelkezniük.

3.2.1.3 Minták nedvességtartalmának összehasonlítása

A **13. ábrán** az egy éves és két éves fűzfajták higroszkópos nedvességtartalmát hasonlítottam össze, mivel az egy éves minták légszáraz állapotban, míg a két éves minták nedves állapotban érkeztek a tanszékre.



13. ábra: Energiafűz minták higroszkópos nedvességtartalma % m/m-ban légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Látható, hogy az Energo és a PP13 fűzfajták kivételével minden esetben az egy éves mintáknak volt nagyobb a nedvességtartalma. Az Energo és a PP13 esetében a fiatalabb és idősebb minták közötti eltérés minimálisnak mondható.

A fiatalabb minták esetében az Energo fűzfajta rendelkezett a legkisebb nedvességtartalommal, míg az idősebb minták esetében a PP13 kivételével, az Energo minta rendelkezett a legnagyobb nedvességtartalommal.

A mintákban lévő nedvességtartalom növekedésével csökken az illó-és fix karbontartalom, tehát a minták fűtőértéke is.

Az égetés szempontjából a két éves, nemesített minták rendelkeznek a legkedvezőbb paraméterekkel, különösen a PP2 minta, melynek nedvességtartalma 6,71% m/m.

3.2.2 Nemesített fűzfa minták hamutartalma

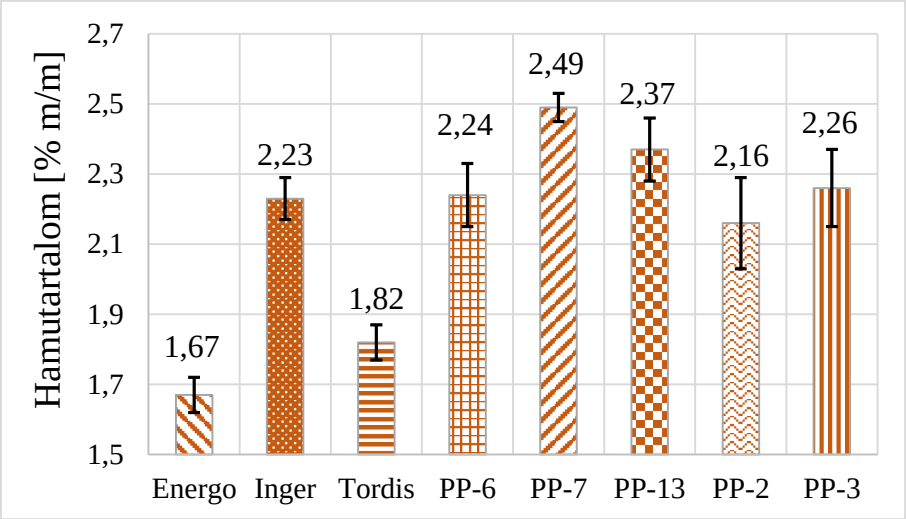
Fontos tudni, hogy a biomassza égetése során mennyi szilárd égési maradék keletkezik, ugyanis a tüzelés legkritikusabb része a hamu okozta salakosodás, melyet a tüzelőanyagban található szervetlen alkotórészek (K, Na, Si) okozhatnak. Mindemellett a magas hamutartalom tüzeléstechnikai szempontból kedvezőtlen, hiszen minél nagyobb a minta hamutartalma, annál kevesebb energia hasznosítható belőle [8].

3.2.2.1 Egy éves minták hamutartalma

A **14. ábrán** az egy éves energiafűz minták hamutartalmát ábrázoltam % m/m-ban, eredeti légszáraz állapotra vonatkoztatva.

Az **14. ábrán** látható, hogy az egy éves energiafűz Energo fajtájának hamutartalma jóval kisebb (1,67% m/m), mint az Energo fajtából származtatható, nemesített energiafűz növények hamutartalma. Az Energo fajtához képest kimagasló értékkel rendelkezik a PP7-es minta, számszerűen 2,49% m/m-kal.

Hamutartalom szempontjából tüzeléstechnikailag kedvezőbb paraméterekkel az Energo minta, míg tüzeléstechnikailag kedvezőtlen értékekkel a PP7 minta rendelkezik.

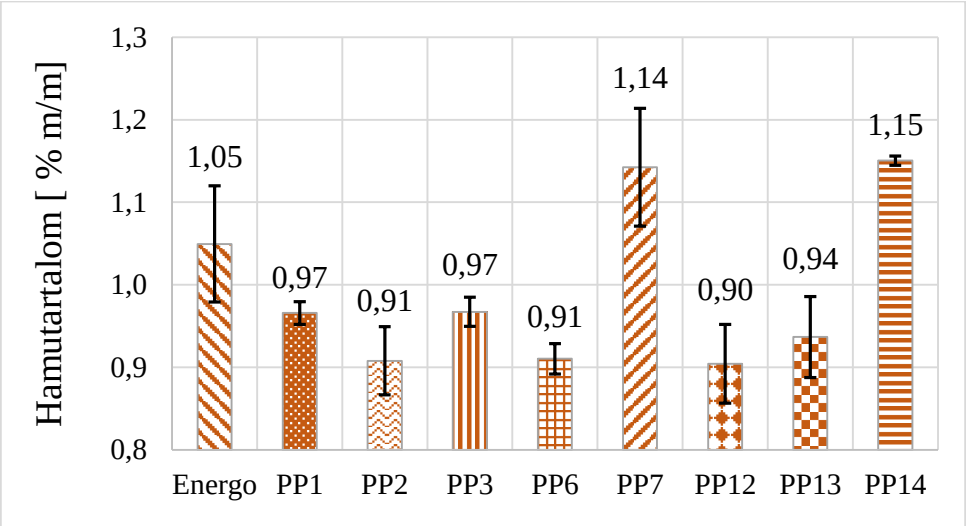


14. ábra: Egy éves energiafűz minták hamutartalma % m/m-ban, eredeti, légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

3.2.2.2 Két éves minták hamutartalma

A **15. ábrán** a két éves energiafűz minták hamutartalmát ábrázoltam % m/m-ban, eredeti frissen vágott állapotra vonatkoztatva.

Az **15. ábrán** látható, hogy az PP7 és PP14 energiafűz fafajták hamutartalma kiemelkedően magas és közel azonos értékekkel rendelkeznek (3,14 és 3,15 % m/m). A legalacsonyabb értékkel a PP2 rendelkezik, számszerűen 2,67% m/m-kal.



15. ábra: Két éves energiafűz minták hamutartalma m/m % - ban, eredeti, nedves állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Hamutartalom szempontjából tüzeléstechnikailag kedvezőbb paraméterekkel az PP2 minta, míg tüzeléstechnikailag kedvezőtlen értékekkel a PP14 minta rendelkezik.

3.2.2.3 Minták hamutartalmának összehasonlítása

A minták hamutartalmát is számos tényező befolyásolhatja, mint például a fűz fajtája, a környezet ahol növekedett, a betakarítás módja és egyéb körülmények.

Egy tanulmány 19 különböző génállománnyal rendelkező mintát vizsgált, öt különböző környezetben. A különböző génállománnyal rendelkező minták hamutartalma 1,27 – 2,57% m/m között volt. A környezet hatása vizsgálatának esetében a minták hamutartalma 1,37 - 2,16% m/m között volt. Tehát a helyszínek kisebb hatással vannak a hamutartalomra, mint a minták génállománya, mivel a hamu mennyiségének tartománya a különböző minták esetében nagyobb [16].

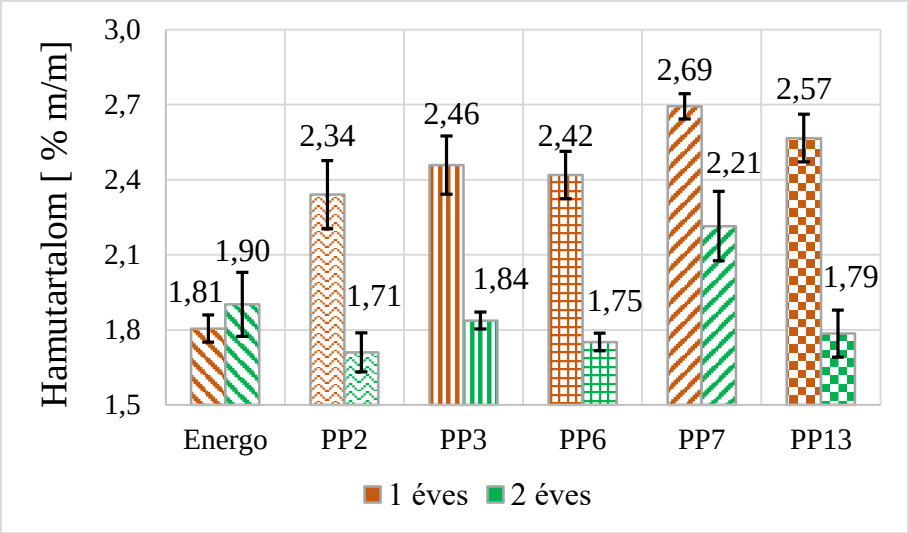
Egy másik tanulmányban két fajta fűzfa mintát vizsgáltak, ahol megállapították, hogy a minták kora jelentősen befolyásolja azok hamutartalmát. Míg az egyik fűzfajta esetében az egy éves mintáknak - addig a másik fűzfajta esetében rendre a három éves mintáknak volt a legnagyobb hamutartalmuk. A fa- és kéreg rész közötti különbséget is megvizsgálták. Mind két fűzfajta esetében a farész kevesebb hamut tartalmazott, mint a kéreg rész [17].

A gép által betakarított növények hamutartalma szintén minden esetben kisebb, mint a kézzel betakarított növényeké, melynek magyarázata az, hogy a kézzel történő betakarítás során több külső szennyező tapadhat a növények külső felületére [13].

A **16. ábrán** az egy éves és két éves fűzfajták hamutartalmát hasonlítottam össze.

A két éves minták hamutartalma kedvezőbb, rendre kisebb, mint az egy éveseké.

Az egy éves, nemesített minták hamutartalma, minden esetben nagyobb, mint az Energo minta hamutartalma. Két éves minták esetében, PP7 kivételével, a nemesített fajták hamutartalma kisebb, mint az Energo minta hamutartalma. A legnagyobb hamutartalommal az egy éves PP7 minta rendelkezik, számszerűen 2,69% m/m.



16. ábra: Energiafűz minták hamutartalma % m/m-ban száraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált energiafűz minták eltüzelésekor keletkező hamu mennyisége az elégetett mennyiség ~1,7-2,7%-a lesz. A növények korának növekedésével azok hamutartalma csökken, ami tüzeléstechnikai szempontból kedvező.

A hamutartalom növekedésével csökken az illó-és fix karbontartalom a mintában, ezáltal ezek fűtőértéke is. Az égetés szempontjából a két éves, nemesített minták rendelkeznek a legkedvezőbb paraméterekkel, különösen a PP2 minta, melynek hamutartalma 1,71% m/m.

Hamutartalom vizsgálata környezetvédelmi szempontból akkor válik fontossá, hogy ha a növények barnamezős területekről származnak, ugyanis a hamu vélhető szennyezői miatt annak kezelési és elhelyezési lehetőségeiről is foglalkozni kell.

3.2.3 Nemesített fűzfa minták elemi összetétele

Az elemi összetétel ismeretében megállapíthatjuk az égetés során keletkező füstgáz mennyiségét és összetételét, illetve meghatározhatjuk a minták fűtőértékét is az égéshő és a nedvességtartalom segítségével.

A főbb elemi komponensek átlagos koncentrációi a fás biomasszában a következők: szén (C) 50% m/m, oxigén (O) 43% m/m és hidrogén (H) 6% m/m. Ezek a mennyiségek nem különböznek szignifikánsan a különböző fajok között. Más nem fémes és fémes kémiai elemek alkotják a fennmaradó 1% m/m-ot. A legfontosabb a nitrogén, amely a fákban körülbelül

átlagosan 0,2% m/m-ban fordul elő. A nitrogén a legfontosabb tápanyag, mivel a növény növekedését biztosítja [7].

3.2.3.1 Egy éves minták elemi összetétele

A **3. táblázatban** az egy éves energiafűz minták elemi összetételét tüntettem fel % m/m-ban, eredeti, légszáraz állapotra vonatkoztatva.

3. táblázat: Egy éves energiafűz minták elemtartalma % m/m-ban, eredeti, légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Anyagneve	Elemtartalom (eredeti, légszáraz állapot) [% m/m]				
	N	C	H	S	O
ENERGO	0,672 ± 0,04	46,20 ± 0,17	5,88 ± 0,10	0,042 ± 0,004	45,53 ± 0,29
INGER	0,883 ± 0,05	46,55 ± 0,16	5,95 ± 0,11	0,060 ± 0,003	44,320 ± 0,18
TORDIS	0,652 ± 0,02	46,63 ± 0,19	5,95 ± 0,10	0,044 ± 0,001	44,90 ± 0,24
PP-6	1,046 ± 0,01	46,00 ± 0,19	5,91 ± 0,08	0,061 ± 0,000	44,74 ± 0,20
PP-7	1,034 ± 0,02	46,12 ± 0,19	5,85 ± 0,17	0,060 ± 0,000	44,45 ± 0,24
PP-13	0,809 ± 0,02	46,01 ± 0,15	5,88 ± 0,05	0,043 ± 0,003	44,89 ± 0,20
PP-2	0,883 ± 0,01	45,94 ± 0,19	5,81 ± 0,06	0,048 ± 0,003	45,17 ± 0,21
PP-3	0,898 ± 0,00	46,10 ± 0,11	5,96 ± 0,09	0,05 ± 0,003	44,73 ± 0,14

A **3. táblázatban** a legkisebb értékeket sárga színnel, míg a legnagyobb értékeket zöld színnel jelöltem ki. Az Energo fajtából nemesített növények nitrogéntartalma minden esetben nagyobb, mint az Energo nitrogéntartalma. Ez azzal magyarázható, hogy a nitrogén a biomassza növekedésének a tápeleme. A növény az intenzív növekedés és termésképzés szakaszában nagyobb mennyiséget vesz fel a nitrogénből, mint a korai növekedés szakaszában [18].

A nemesített növények nitrogén tartalmának ismerete azért is fontos, mivel a nagyhőmérsékletű égési folyamatok során a biomassza eredeti nitrogéntartalma, illetve nitrogéntartalmú szerves

vegyületei nitrogén-monoxiddá alakulnak, melyek csökkentéséről primer és szekunder égetési módszerek segítségével gondoskodni kell.

A nemesített növények kéntartalma szintén minden esetben nagyobb volt az eredeti növény kéntartalmánál, de még így is nagyságrendekkel kisebb, mint a fosszilis szilárd tüzelőanyagok kéntartalma. Emiatt várhatóan a növények elégetésekor nem kell számolni a kén-dioxidra vonatkozó nagyon szigorú határértékek túllépésével.

Az égéshez szükséges oxigén viszonylag nagy mennyiségben van jelen mintákban, ezért kevesebb égési levegőt szükséges bevinni az égési folyamathoz, ami a füstgáz mennyiségének csökkenését eredményezi.

3.2.3.2 Két éves minták elemanalízise

A **4. táblázatban** a két éves energiafűz minták elemi összetételét tüntettem fel % m/m-ban, eredeti, nedves állapotra vonatkoztatva.

4. táblázat: Két éves energiafűz minták elemtartalma m/m % - ban, eredeti, nedves állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Anyagneve	**Elemtartalom (eredeti, frissen vágott állapot) [% m/m]**				
	N	**C**	**H**	**S**	**O**
ENERGO	0,021 ± 0,03	26,51 ± 0,23	5,80 ± 0,08	0,028 ± 0,004	66,59 ± 0,14
PP-1	0,041 ± 0,03	25,76 ± 0,09	5,71 ± 0,01	0,030 ± 0,017	67,49 ± 0,06
PP-2	0,110 ± 0,02	24,43 ± 0,97	5,65 ± 0,12	0,028 ± 0,006	68,88 ± 1,08
PP-3	0,149 ± 0,02	25,27 ± 0,08	5,79 ± 0,09	0,032 ± 0,002	67,79 ± 0,13
PP-6	0,032 ± 0,02	24,96 ± 0,23	5,73 ± 0,03	0,022 ± 0,002	68,35 ± 0,26
PP-7	0,159 ± 0,01	24,80 ± 0,08	5,65 ± 0,07	0,032 ± 0,006	68,22 ± 0,14
PP-12	0,116 ± 0,02	23,92 ± 0,08	5,58 ± 0,06	0,031 ± 0,006	69,45 ± 0,04
PP-13	0,138 ± 0,03	25,43 ± 0,10	5,64 ± 0,09	0,030 ± 0,016	67,83 ± 0,17

Anyagneve	Elemtartalom (eredeti, frissen vágott állapot) [% m/m]				
	N	C	H	S	O
PP-14	0,154 ± 0,02	25,13 ± 0,05	5,70 ± 0,05	0,039 ± 0,001	67,83 ± 0,10

Ugyanúgy, mint a **3. táblázatban**, a **4. táblázatban** is a legkisebb értékeket sárga színnel, míg a legnagyobb értékeket zöld színnel jelöltem ki.

Hasonlóan az egy éves mintákhoz a két éves nemesített minták nitrogéntartalma is rendre nagyobb. A két éves nemesített minták nitrogéntartalma nagyobb, mint az eredeti két éves Energo mintáé. Az Energo minta nitrogéntartalma a nemesített minták nitrogéntartalmához képest a legkisebb, számszerűen 0,021% m/m. A legnagyobb nitrogéntartalommal a PP7 minta rendelkezik.

A két éves nemesített minták kéntartalma, a PP6 kivételével, minden esetben nagyobb, mint az Energo kéntartalma, de ugyanaz az a megállapítás igaz, mint az egy éves minták esetében.

Az oxigéntartalom minden PP minta esetében nagyobb, mint az Energo minta oxigéntartalma, tehát ennyivel kevesebb oxigént szükséges bevinni az égési folyamathoz.

3.2.3.3 Minták elemanalízisének összehasonlítása

A **5. táblázatban** az egy és két éves energiafűz minták elemi összetételét tüntettem fel % m/m-ban, száraz állapotra vonatkoztatva.

5. táblázat: Energiafűz minták elemtartalma % m/m-ban, száraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

	Egy éves					Két éves				
	N	C	H	S	O	N	C	H	S	O
Energo	0,725 ± 0,04	49,84 ± 0,19	5,47 ± 0,10	0,045 ± 0,004	42,12 ± 0,31	0,038 ± 0,05	48,06 ± 0,42	5,49 ± 0,14	0,050 ± 0,007	44,46 ± 0,26
PP2	0,958 ± 0,01	49,85 ± 0,21	5,35 ± 0,06	0,052 ± 0,003	41,45 ± 0,23	0,207 ± 0,03	46,01 ± 1,82	5,39 ± 0,23	0,053 ± 0,011	46,64 ± 2,04
PP3	0,974 ± 0,01	50,00 ± 0,16	5,52 ± 0,10	0,054 ± 0,003	41,00 ± 0,15	0,283 ± 0,03	48,00 ± 0,15	5,70 ± 0,17	0,060 ± 0,004	44,11 ± 0,24

	Egy éves					Két éves				
	N	**C**	**H**	**S**	**O**	**N**	**C**	**H**	**S**	**O**
PP6	1,130 ± 0,01	49,69 ± 0,20	5,48 ± 0,09	0,066 ± 0,000	41,22 ± 0,22	0,061 ± 0,034	48,03 ± 0,44	5,65 ± 0,06	0,041 ± 0,004	44,47 ± 0,49
PP7	1,120 ± 0,02	49,96 ± 0,21	5,41 ± 0,18	0,065 ± 0,000	40,76 ± 0,26	0,308 ± 0,02	48,07 ± 0,15	5,54 ± 0,14	0,062 ± 0,011	43,81 ± 0,27
PP13	0,875 ± 0,03	49,76 ± 0,16	5,45 ± 0,06	0,046 ± 0,003	41,31 ± 0,22	0,263 ± 0,05	48,47 ± 0,20	5,43 ± 0,17	0,057 ± 0,030	44,00 ± 0,33

Az **5. táblázatban** a legkisebb értékeket sárga színnel, míg a legnagyobb értékeket zöld színnel jelöltem ki. Látható, hogy az egy éves minták nitrogéntartalmához képest a két éves minták nitrogéntartalma jelentősen csökkent. A nitrogén a biomassza azon szövetrészeiben található, amelyek még növekedésben vannak. A fűzfa az első évben erőteljesebb növekedést mutat, a két éves mintákban a nitrogéntartalom csökken, tehát a fűzfa növekedési intenzitása is csökken.

A biomasszának a szénnel szemben az az egyik nagy előnye, hogy igen kis mértékben, vagy egyáltalán nincs bennük kén. Ebben az esetben is a minták kéntartalma olyan kicsi, hogy tüzeléstechnikai szempontból nincs jelentőségük.

Az egy és két éves minták hidrogéntartalmában figyelemre méltó eltérés nem tapasztalható.

A kétféle minta karbon- és oxigéntartalmának vonatkozásában az állapítható meg, hogy a két éves minták karbontartalma kis mértékű csökkenést, míg oxigéntartalmuk kis mértékű növekedést mutat.

Az oxigén tartalom minden minta esetében viszonylag nagy, tehát ennyivel kevesebb levegőt kell bejuttatni az égési folyamatba. A minta nagy oxigéntartalma kedvezően hat a tüzelési folyamatokra, mert kevesebb ballaszt N_2 jut az tűztérbe, emiatt növekedni fog az égési hőmérséklet.

3.2.4 Nemesített fűzfa minták égéshője és fűtőértéke

Az égéshő és fűtőérték a legfontosabb tüzeléstechnikai paraméter. Ezen jellemzők ismeretében határozható meg, hogy 1 kg tüzelőanyaggal hány kJ-nyi energia szabadítható fel.

3.2.4.1 Egy éves minták égéshője és fűtőértéke

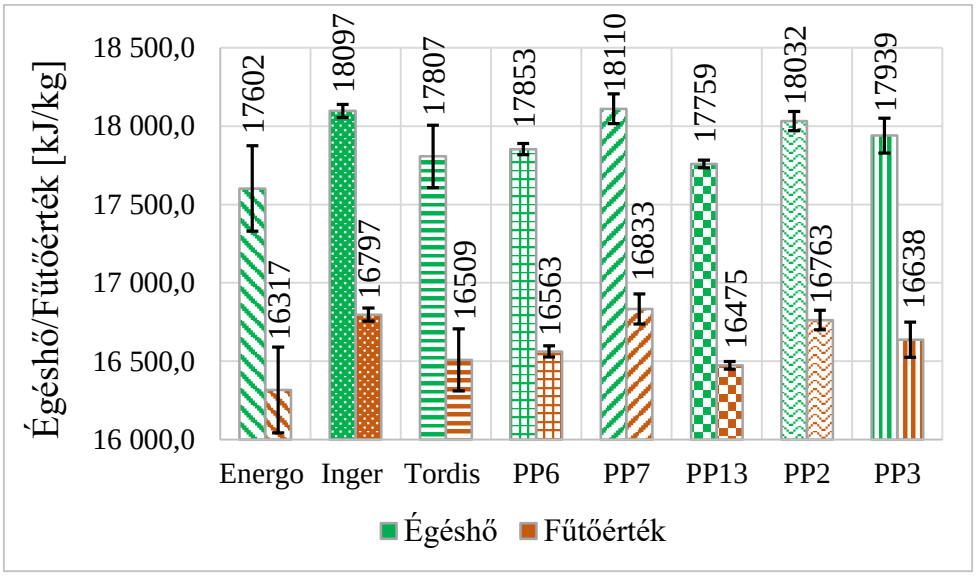
A **6. táblázatban** az egy éves energiafűz minták légszáraz állapotra vonatkoztatott égéshő és fűtőérték adatait tüntettem fel kJ/kg-ban.

6. táblázat: Fiatalabb energiafűz minták égéshője és fűtőértéke kJ/kg-ban, eredeti / légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

	Égéshő [kJ/kg]	**Fűtőérték [kJ/kg]**
Energo	17602 ± 272	16317 ± 272
Inger	18097 ± 41	16797 ± 41
Tordis	17807 ± 198	16509 ± 198
PP2	17759 ± 24	16475 ± 24
PP3	18032 ± 61	16763 ± 61
PP6	17853 ± 35	16563 ± 35
PP7	18110 ± 95	16833 ± 95
PP13	17939 ± 111	16638 ± 111

Észrevehető, hogy a legkisebb értékkel, mind égéshő és fűtőérték tekintetében az Energo minta rendelkezett. A legnagyobb értéke mindkét paraméter esetében a PP7 mintának volt. Ez alapján megállapítható, hogy a dolgozat elején elvárt célunk, miszerint az Energo fűzfajtából származó, nemesített minták tüzeléstechnikai paraméterei, ebben az esetben fűtőérték, jobbak legyenek, mint az Energo minta paramétere, teljesült.

A **6. táblázat** adatait a **17. ábra** szemlélteti.



17. ábra: Fiatalabb energiafűz minták égéshője és fűtőértéke kJ/kg-ban, eredeti / légszáraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

A **17. ábrán** látható, hogy a fiatalabb energiafűz Energo fajtájának fűtőértéke jóval kisebb (16 317 kJ/kg), mint az Energo fajtából származtatható, nemesített energiafűz növények fűtőértéke. Az Energo fajtához képest kimagasló értékkel rendelkezik a PP-7-es minta, számszerűen 16 833 kJ/kg – mal.

3.2.4.2 Két éves minták égéshője és fűtőértéke

A **7. táblázatban** a két éves energiafűz minták frissen vágott állapotra vonatkoztatott égéshőjét és fűtőértékét tüntettem fel kJ/kg-ban.

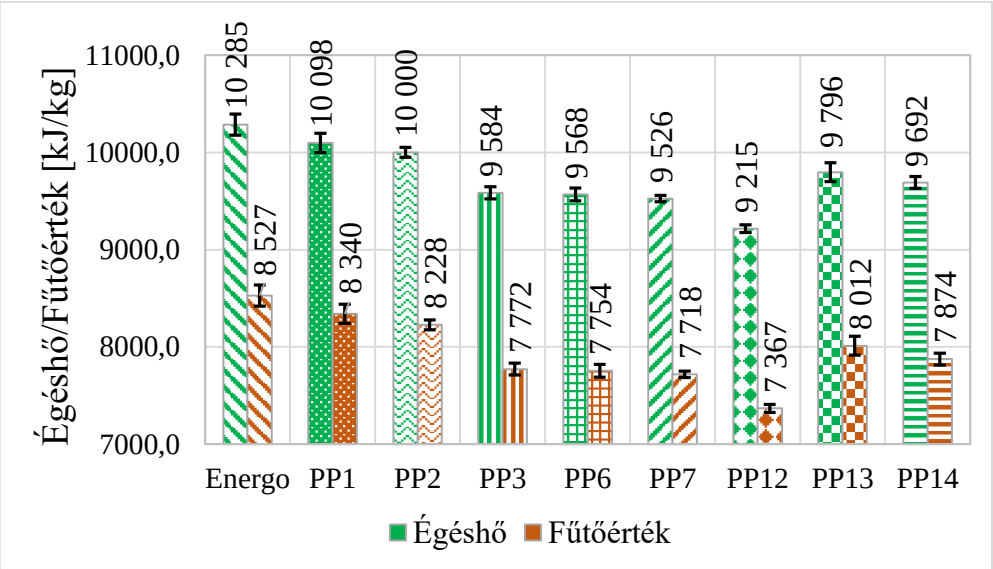
7. táblázat: Két éves energiafűz minták égéshője és fűtőértéke kJ/kg-ban, eredeti / frissen vágott állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

	Égéshő [kJ/kg]	**Fűtőérték [kJ/kg]**
Energo	10285 ± 108	8527 ± 108
PP1	10098 ± 99	8334 ± 99
PP2	10000 ± 50	8228 ± 50
PP3	9584 ± 61	7772 ± 61
PP6	9568 ± 64	7754 ± 64
PP7	9526 ± 32	7718 ± 32

	Égéshő [kJ/kg]	Fűtőérték [kJ/kg]
PP12	9215 ± 40	7367 ± 40
PP13	9796 ± 97	8012 ± 97
PP14	9692 ± 60	7874 ± 60

Észrevehető, hogy a legkisebb értékkel, mind égéshő és fűtőérték tekintetében a PP12 minta rendelkezett. A legnagyobb értéke mindkét paraméter esetében az Energo mintának volt. Ez alapján megállapítható, hogy a dolgozat elején elvárt célunk, miszerint az Energo fűzfajtából származó, nemesített minták tüzeléstechnikai paraméterei, ebben az esetben fűtőérték, jobbak legyenek, mint az Energo minta paramétere, nem teljesült.

A **7. táblázat** adatait a **18. ábrán** szemléltettem.



18. ábra: Idősebb energiafűz minták égéshője és fűtőértéke kJ/kg-ban, eredeti / frissen vágott állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

A **18. ábrán** látható, hogy a legnagyobb fűtőértékkel frissen vágott állapotban az Energo minta rendelkezik, számszerűen 8 527 kJ/kg. A legkisebb fűtőértékkel a PP12 minta rendelkezik, melynek értéke 7 367 kJ/kg.

3.2.4.3 Minták fűtőértékének összehasonlítása

Több tanulmányban is megvizsgálták a fűzfa minták kora és fűtőértéke közötti összefüggéseket. Kilenc fűzfajtának tizenöt különböző génállománnyal rendelkező mintáinál azt az összefüggést állapították meg, hogy az egy éves minták száraz állapotra vonatkoztatott fűtőértéke nagyobb, mint a három éves minták száraz állapotra vonatkoztatott fűtőértéke. Az egy éves minták fűtőértéke átlagosan 19,66 MJ/kg, míg a két éves minták fűtőértéke átlagosan 19,60 MJ/kg volt [14].

Egy másik tanulmányban kétféle fűzfajta fa és kéreg részeinek fűtőértékét vizsgálták. Mindkét fűzfajta esetében megállapítható, hogy az egy éves fa részek fűtőértékei minden esetben nagyobbak, mint a két vagy három éves fa részek fűtőértékei. A kéreg vizsgálatok a két fűzfajta között eltérő eredményeket mutattak. Az egyik esetében az egy éves kéreg minták, míg a másik esetében a három éves kéreg minták rendelkeztek nagyobb fűtőértékkel [17].

A **8. táblázatban** az egy és két éves energiafűz minták száraz állapotra vonatkoztatott fűtőértékét tüntettem fel kJ/kg-ban.

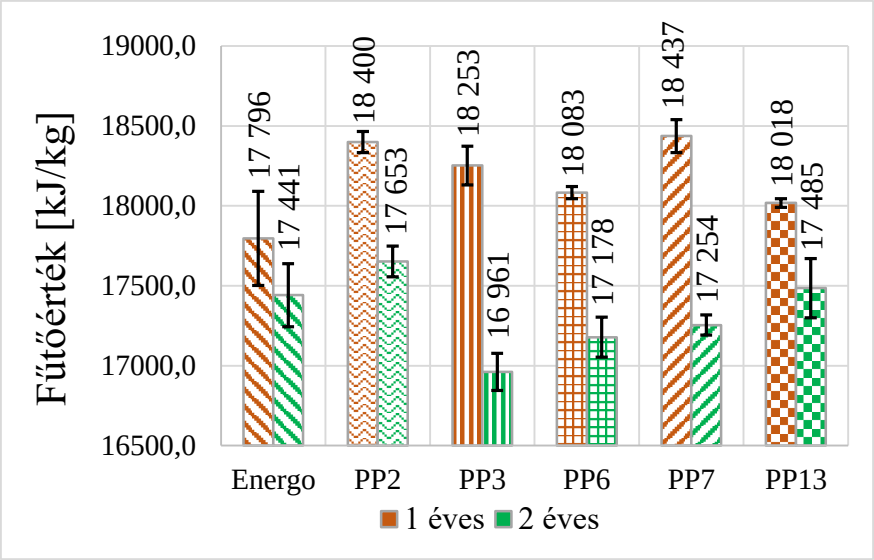
8. táblázat: Energiafűz minták fűtőértéke kJ/kg-ban, száraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

	Egy éves minták fűtőértéke [kJ/kg]	Két éves minták fűtőértéke [kJ/kg]
Energo	17796 ± 294	17441 ± 197
PP2	18400 ± 66	17653 ± 96
PP3	18253 ± 121	16961 ± 116
PP6	18083 ± 38	17178 ± 124
PP7	18437 ± 103	17254 ± 63
PP13	18018 ± 26	17485 ± 185

A dolgozat elején elvárt célunk, csak az egy éves minták esetében teljesült, tehát az Energo minta rendelkezik a legkisebb fűtőértékkel. Két éves minták esetében az Energo mintánál csak két darab nemesített minta rendelkezett nagyobb fűtőértékkel, PP2 és a PP13 minták.

A **8. táblázat** adatait a **19. ábrán** szemléltettem.

A **19. ábrán** az egy éves és két éves fűzfajták fűtőértékét hasonlítottam össze száraz állapotban.



19. ábra: Energiafűz minták fűtőértéke kJ/kg-ban, száraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

Az egy éves minták minden esetben nagyon fűtőértékkel rendelkeznek, mint a két éves minták. Az egy éves mintáknál a legkisebb fűtőértéke az Energo mintának van. A két éves minták esetében az Energo fűtőértékénél csak a PP2 mintának van nagyobb fűtőértéke, számszerűen 17 653 kJ/kg.

Az egy éves PP2 minta fűtőértéke is kiemelkedően magas, 18 400 kJ/kg fűtőértékkel rendelkezik.

Összességében, az egy és két éves mintákat is figyelembe véve a PP2 mintának van a legjobb fűtőértéke.

3.3 Laboratóriumi mérési eredmények összefoglalása

Ebben a fejezetben a laboratóriumi, mérési eredményeket fogom összehasonlítani. A minták tüzeléstechnikai paramétereit a **9. táblázat** tartalmazza.

9. táblázat: Laboratóriumi mérési eredmények száraz állapotra vonatkoztatva [Saját szerkesztés]

		Nedvesség-tartalom [% m/m]	Hamu-tartalom [% m/m]	Elemi összetétel [% m/m]					Fűtőérték [kJ/kg]
				N	C	H	S	O	
Egy éves	Energo	7,31 ± 0,03	1,81 ± 0,06	0,725 ± 0,04	49,84 ± 0,19	5,47 ± 0,10	0,045 ± 0,004	42,12 ± 0,31	17796 ± 294
	PP2	7,85 ± 0,07	2,34 ± 0,14	0,958 ± 0,01	49,85 ± 0,21	5,35 ± 0,06	0,052 ± 0,003	41,45 ± 0,23	18400 ± 66
	PP3	7,81 ± 0,1	2,46 ± 0,12	0,974 ± 0,01	50,00 ± 0,12	5,52 ± 0,10	0,054 ± 0,003	41,00 ± 0,15	18253 ± 121
	PP6	7,4 ± 0,01	2,42 ± 0,09	1,130 ± 0,01	49,69 ± 0,20	5,48 ± 0,09	0,066 ± 0,000	41,22 ± 0,22	18083 ± 38
	PP7	7,68 ± 0,06	2,69 ± 0,05	1,120 ± 0,02	49,96 ± 0,21	5,41 ± 0,18	0,065 ± 0,000	40,76 ± 0,26	18437 ± 103
	PP13	7,54 ± 0,1	2,57 ± 0,10	0,875 ± 0,03	49,76 ± 0,16	5,45 ± 0,06	0,046 ± 0,003	41,31 ± 0,22	18018 ± 26
Két éves	Energo	7,39 ± 0,19	1,90 ± 0,13	0,038 ± 0,05	48,06 ± 0,42	5,49 ± 0,14	0,050 ± 0,007	44,46 ± 0,26	17441 ± 197
	PP2	6,71 ± 0,26	1,71 ± 0,08	0,207 ± 0,03	46,01 ± 1,82	5,39 ± 0,23	0,053 ± 0,011	46,64 ± 2,04	17653 ± 96
	PP3	6,87 ± 0,06	1,84 ± 0,03	0,283 ± 0,03	48,00 ± 0,15	5,70 ± 0,17	0,060 ± 0,004	44,11 ± 0,24	16961 ± 116
	PP6	6,97 ± 0,22	1,75 ± 0,04	0,061 ± 0,03	48,03 ± 0,44	5,65 ± 0,06	0,041 ± 0,004	44,47 ± 0,49	17178 ± 124
	PP7	6,79 ± 0,25	2,21 ± 0,14	0,308 ± 0,02	48,07 ± 0,15	5,54 ± 0,14	0,062 ± 0,011	43,81 ± 0,27	17254 ± 63
	PP13	7,60 ± 0,04	1,79 ± 0,09	0,263 ± 0,05	48,47 ± 0,20	5,43 ± 0,17	0,057 ± 0,030	41,00 ± 0,33	17485 ± 185

A **9. táblázat** alapján megállapítható, hogy a mintákban a nedvesség-, hamu-, nitrogén- és karbontartalom csökken, míg az oxigéntartalom nő a növények korának növekedésével. Hidrogéntartalmuk közel azonos marad az évek során.

A fűtőérték az Energo minta kivételével, csökken a fűz életkorának növekedésével.

Habár az egy éves PP7 minta rendelkezik a legnagyobb fűtőértékkel, minden szempontot összevetve tüzeléstechnikailag a PP2 minta számít a legkedvezőbbnek. Minden esetben nagyobb a PP2 minta fűtőértéke, mint az Energo mintáé. A PP2 minta kisebb hamu-, illetve nitrogéntartalommal rendelkezik, mint a PP7 minta, valamint kisebb kéntartalommal rendelkezik, mint az Energo minta.

A korábbi fejezetekben elemzett levélterület változását is figyelembe véve összességében megállapítható, hogy a nemesített fajták közül a PP2 az a minta, amely mind környezetvédelmi, mind tüzeléstechnikai szempontból kedvező tulajdonságokkal rendelkezik.

4 ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásom célja az volt, hogy meghatározzam melyik nemesített fűzfajta hasznosítható legeredményesebben energetikai célokra.

A feladatom a Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Biológiai Kutatóközpontjából származó minták vizsgálata volt. A szegedi kutatócsoport célja egy olyan fűzfajta nemesítése, mely a környezetéből hatékonyabban köti meg CO_2-t, ezen felül kedvező tüzeléstechnikai és fitoremediációs tulajdonságokkal is rendelkezik.

Laboratóriumi munkám során részletesen megvizsgáltam a nemesítés előtti és több, különböző génállománnyal rendelkező nemesített fűzfajta tüzeléstechnikai tulajdonságait. A hamutartalom-, nedvességtartalom-, elemanalízis-, égéshő- és fűtőérték vizsgálatával arra kerestem a választ, hogy milyen hatása van a felsorolt paraméterekre a minták kora, illetve keresztmetszete. Ennek értelmében elemeztem a minták keresztmetszetén látható háncs-kéreg arányt, valamint a különböző fajtákhoz tartozó levélterület arányokat.

Az eredmények azt mutatták, hogy fűzfa életkorának növekedésével általában csökkent a minták nedvesség-, hamu- és széntartalma, illetve nőtt a kén- és oxigéntartalma. A minták hidrogéntartalma közel azonos marad az növekedés során. A legjelentősebb csökkenést a nitrogéntartalomban tapasztaltunk. A nitrogéntartalom ilyen mértékű csökkenése tüzeléstechnikai szempontból nagyon nagy jelentőséggel bír, hiszen az égetés során a tüzelőanyag nitrogéntartalmából származó NO_x kibocsátás jelentős mértékben csökken.

Az egy éves minták esetében a nemesítés növelte a minták nedvesség-, hamu-, nitrogén- és kéntartalmát. Habár e paraméterek növekedése tüzeléstechnikai szempontból kedvezőtlen, mégis a nemesített minták nagyobb karbontartalma miatt az egy éves minták rendelkeztek nagyobb fűtőértékkel.

Két éves minták esetében a nemesítés általában csökkentette a minták nedvesség- és hamutartalmát.

A legkedvezőbb tulajdonságokkal PP2 minta rendelkezett, mind tüzeléstechnikai, mind pedig környezetvédelmi szempontokat figyelembe véve, melynek termesztése a jövőben jelentős szerepet játszhat a biomasszák energetikai hasznosítása, valamint az üvegházhatású gázok csökkentése terén.

Köszönetnyilvánítás

Hálámat szeretném kifejezni konzulensemnek, ***Dr. Szemmelveisz Tamásné*** docens asszonynak rendkívüli segítőkészségéért és türelméért, továbbá hogy sohasem szegte lelkesedésemet a TDK dolgozatom elkészítése során. A hasznos szakmai tanácsai és bátorítása nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Köszönettel tartozom ***Prof. Dr. Palotás Árpád Bence*** dékán úrnak, aki egyben az Energia- és Minőségügyi Intézet igazgatója és konzulensem, hogy lehetőséget biztosított TDK dolgozatom elkészítéséhez, valamint engedélyezte azt.

Hálával tartozom ***Koós Tamásnak*** a nemesített minták elemanalízisének elvégzéséért és a tüzeléstechnikai laborban nyújtott segítségéért.

Köszönetemet szeretném kifejezni ***prof. Dr. Dudits Dénes akadémikusnak*** és a ***Magyar Tudományos Akadémia Biológiai Kutatóközpont munkatársainak*** a nemesítési tapasztalatok, kísérletek, valamint a témához kapcsolódó adatok megosztásáért.

A TDK dolgozat az Emberi Erőforrások Minisztériuma ***ÚNKP-17-2-I.-ME/16*** kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

IRODALOM

[1] Nicolaj Stenkjaer; Energy Willow; Nordic Folkecenter for Renewable Energy; March 2009
http://www.folkecenter.net/gb/rd/biogas/biomass-energy-crops/energy_willow/
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[2] Energia fűz (Salix Viminalis "ENERGO"); Zöldcentrum, Rácalmás kertészet; http://www.zoldcentrum.hu/index.php?op=energiafuz
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[3] Dudits Dénes, Nagy Anna Viktória; A fás szárú energianövények nemesítése hagyományos és géntechnológiai módszerekkel; Növénytermelés; (2017) p. 97-118

[4] Dénes Dudits, Katalin Török, András Cseri, Kenny Paul, Anna V. Nagy, Bettina Nagy, László Sass, Györgyi Ferenc, Radomira Vankova, Petre Dobrev, Imre Vass and Ferhan Ayaydin; Response of organ structure and physiology to autotetraploidization in early development of energy willow Salix viminalis L.; Plant Physiology Vol. 170; (March 2016) p. 1504-1523

[5] Cseri András; Genomikai és fenomikai megközelítések kombinálása az árpa szárazságtűrésének jellemzésében; PhD. értekezés; SZTE TTIK, MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Növénybiológiai Intézet; (2013) p. 114
http://doktori.bibl.u-szeged.hu/1738/1/DISSZERT%C3%81CI%C3%93.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[6] Helga Kovács, József Paulovics, Katalin Szemmelveisz; Sustainable reuse of heavy metal contaminated brownfield lands by phytoextraction; Materials Science and Engineering Volume 39, No. 2 (2014), p. 33–42.
http://www.matarka.hu/koz/ISSN_2063-6792/vol_39-2_2014_eng/ISSN_2063-6792_vol_39_2_2014_eng_033-042.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[7] H. Kovács, O. Bánhidi, K. Szemmelveisz; Distribution of chemical elements within ligneous parts of various trees; Material Sciences and Engineering, Miskolc, Volume 36/2. (2011) p. 41–50.
http://www.matarka.hu/koz/ISSN_1789-7661/2_ser_vol_36_2_2011_eng/ISSN_1789-7661_2_ser_vol_36_2_2011_eng_041-050.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[8] Dr. Szemmelveisz Tamásné; Fás- és lágyszárú biomasszák tüzelhetiségi feltételeinek vizsgálata; Doktori (PhD) értekezés; Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstani és Hőenergia Tanszék, (2006) p. 100
http://midra.uni-miskolc.hu/JaDoX_Portlets/documents/document_5590_section_1379.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[9] Kovács Helga; Nehézfémekkel szennyezett bányaterületről származó fás szár biomassza égetéssel történő ártalmatlanítási feltételeinek vizsgálata; Doktori értekezés; Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék; (2013) p. 129
http://www.siphd.uni-miskolc.hu/ertekezesek/2013/KovacsHelga_phd.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[10] KÉP
https://websites.pmc.ucsc.edu/~silab/pictures/ea.portrait.JPG
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[11] Szilárd energiahordozó fűtőértékének meghatározása; Felkészülési tananyag a Tüzeléstan tantárgy 1. számú laboratóriumi gyakorlatához; Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék; p.10
http://combustion.uni-miskolc.hu/oktatas/jegyzetek/Tuzelestan_1.gyak_Szilard_energiahordozo_futoertekenek_meghatarozasa.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[12] KÉP
http://www.sasentp.biz/wp-content/uploads/product-model-6100-compensated-jacket-calorimeter.jpg
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[13] Eisenbies M, T Volk, J Posselius; Research Summary: Characteristics of Willow Biomass Chips Produced Using a Single-Pass Cut-and-Chip Harvester; Extension; (April 20, 2016)
http://articles.extension.org/pages/71883/research-summary:-characteristics-of-willow-biomass-chips-produced-using-a-single-pass-cut-and-chip-
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[14] Michał Krzyżaniak, Mariusz Jerzy Stolarski, Stefan Szczukowski, Józef Tworkowski; Thermophysical and chemical properties of biomass obtained from willow coppice cultivated in one- and three-year rotation cycles; Chair of Plant Breeding and Seed Production University of Warmia and Mazury in Olsztyn; J. Elem.; (2014); p. 161–175

[15] Willow as Fuel Methods and Techniques for 50 kW-2 MW Heating Boilers; SP Technical Research Institute of Sweden
http://www.woodheatassociation.org.uk/media/2016/02/willow-as-fuel.pdf
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.

[16] Eric S. Fabio, Timothy A. Volk, Raymond O. Miller, Michelle J. Serapiglia, Armen R. Kemanian, Felipe Montes, Yulia A. Kuzovkina, Gary J. Kling, Lawrence B. Smart; Contributions of environment and genotype to variation in shrub willow biomass composition; Industrial Crops & Products 108; (2017) p. 149–161

[17] Jyrki Hytonen, Juha Nurmi HEATING VALUE AND ASH CONTENT OF INTENSIVELY MANAGED STANDS; Natural Resources Institute Finland Kannus, Finland; WOOD RESEARCH; (2015) p. 71-82

[18] Kertészek kis/nagy áruháza Kft.; Nitrogén;
http://www.kerteszekaruhaza.com/tapanyagellatas/tapelemek/nitrogen.html
Utolsó megtekintés: 2017.11.12.