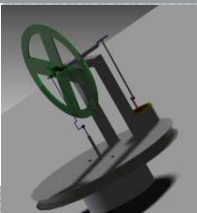
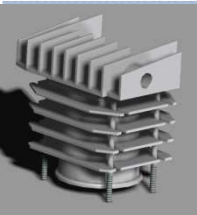
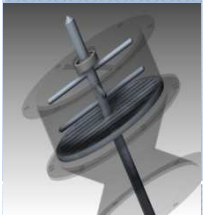
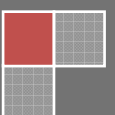


2012.

Fagázgenerátorban keletkező hő átalakítása
mozgási energiává, Stirling- motor
segítségével.



Sári József, III. éves Faipari mérnök hallgató
Nyugat-magyarországi Egyetem
Faipari Mérnöki Kar
Gépészeti és Mechatronikai Intézet
Konzulens: Csitári Csaba, II. éves PhD.
2012.02.15.



Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
Bevezetés	3
A fagázról általában.....	5
A fagázgenerátorról általában	9
Saját fagázgenerátor átalakításának tervezése, kivitelezése.....	16
Stirling-motor elvi felépítése	18
A hőforrások széles skálája	20
Tiszta kipufogó gáz	20
Nagyon halk üzem.....	20
A Stirling-motor fajtái	21
Előnyök.....	23
Hátrányok.....	23
A Stirling-motor energiája, teljesítménye és hatásfoka	25
Saját Stirling-motor tervezése	30
Irodalomjegyzék	41

Bevezetés

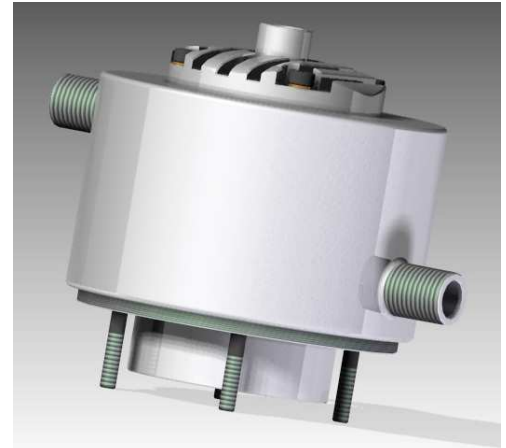
A TDK- dolgozatunk témájául, egy olyan szerkezet megtervezését és elkészítését választottuk, amely napjainkban épp aktuális, az alternatív energia felhasználásán alapul. Mint sok más iparágban, úgy a faiparban is keletkeznek hulladékok. Ebben a szektorban több-kevesebb sikerrel megpróbálják az adott „hulladékot-szemetet” felhasználni, jellemzően energia formájában újra hasznosítani. Sajnos a faipar a keletkezett hulladék felhasználása tekintetében, sok más iparággal szemben eléggé elmaradott - legalább is országos szinten. Adott egy probléma, nevezetesen a keletkezett különböző szemcse méretű fa hulladék, amit energia formájában szeretnénk visszanyerni a lehető legegyszerűbb, és természetesen leghatékonyabb módon. Előző félévben önálló labor keretében elkészítettünk az adott hőt felhasználva egy, a termikus energiára épülő külső hő bevezetésű, úgynevezett „Stirling-motor” modelljét. Második önálló laborom kapcsán találtunk rá egy, napjaink alternatív energia piacán „sláger” technológiára, a fa elgázosítására. A szakirodalmakat böngészve a már az 30-as években



1. ábra: Az elkészült fagázgenerátor
Forrás: Saját fotó

alkalmazott, azóta hasonló célra nem használt technológiát elevenítettünk fel, illetve vizsgáltunk meg. Ez a technológia a fa elgázosításával, a keletkező gázt üzemanyagként használja fel. Az adott problémakörünkbe teljes mértékben beleillik, hiszen bármilyen méretű tömör fa hulladékot képes energiává alakítani a lehető legegyszerűbb és környezetre legkevésbé ártalmas módon (működését a lentiekben részletezem). Mivel a lehetőségek egész tárházát biztosítja ez az adott szerkezet, csak a képzeletünk és a tudomány szab határt, ha a keletkező fagáz, vagy hőenergia felhasználását akarjuk hasznosítani.

A munkánk elején több irányba indultunk el, átgondoltuk, érdemes-e egy benzines motorral összekapcsolni a fagázgenerátort, amely az adott asztalos üzem áram ellátásának egy részét, és talán még a fűtését is megoldaná. Ezt az irányt azonban elvetettük, mivel a gáz összetétele nagyban befolyásolja a motor működését illetve a környezetre gyakorolt hatásait (*kátrány tartalom*) és a motor átépítése nagyon költséges és idő igényes feladat lett volna. Ezután visszatérve az eredeti tervünkhöz, elkezdtünk komolyabban utána olvasni a Stirling-motornak. Hosszas irodalmazási és tervezési folyamat után egy kompresszort választottunk ki az átalakításra, erre terveztünk egy teljesen új hengerfejet és dugattyút. A motor tervekhez kisebb átalakításokat eszközöltünk a tavaly elkészült fagázgenerátorban (*részletes átalakításokat lásd később*). A tervezési munkákat *Solid Edge* nevű 3D-s tervező szoftverrel végeztük. A programban több szimulációt is lefutattunk, majd a biztonság figyelembe vételével átszámoltuk és kiértékeltek a kapott eredményeket. Ezután már csak a legyárthatóság szempontjából kellett megvizsgálni az általunk megálmodott szerkezetet. (*Ezt a vizsgálatot arra a*



2. ábra: Az általunk tervezett Stirling-motor hengerfejének 3D-s modellje
Forrás: Saját fotó



3. ábra: Az általunk tervezett Stirling-motor 3D-s modellje
Forrás: Saját fotó

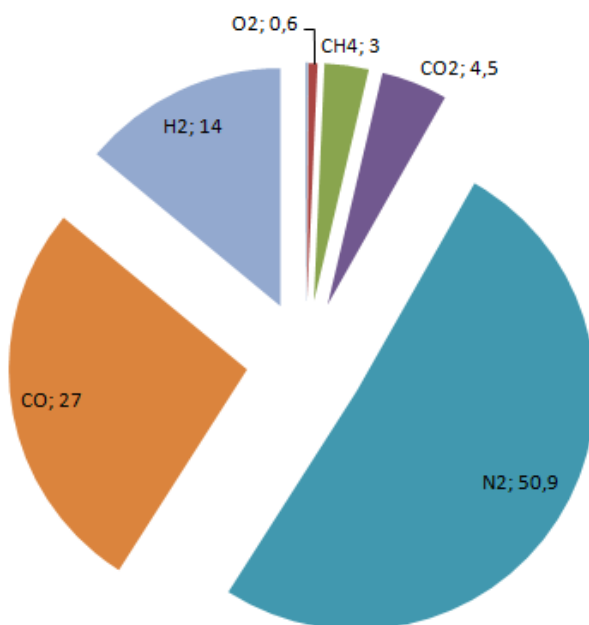
cégre bízuk, amellyel az egyedi alkatrészeket majd le fogjuk gyártatni.) Miután egyeztettünk az illetékesekkel, kisebb javításokkal elkészült a végleges változat. Jelenleg a fagázgenerátorban apróbb átalakításokat elvégeztük, sajnos a kompresszornál lévő egyedi alkatrészek legyártására még nincsenek meg a megfelelő forrásaink, de bízunk, hogy a következő időszakban pályázati pénzből sikerül a Fagáz-erőművünket teljesen befejezni.

A fagázról általában

A fagáz egyrészt a fa pirolízisekor, vagyis hő hatására történő elbomlásakor keletkező éghető gázok elegye, másfelől pedig a visszamaradó faszén és a szén-dioxid, illetve vízgőz reakciójából származó további éghető gázok keveréke.

A fagáz kémiai összetétele

- nitrogén N_2 50.9%
- szénmonoxid CO 27.0%
- hidrogén H_2 14.0%
- széndioxid CO_2 4.5%
- metán CH_4 3.0%
- oxigén O_2 0.6%
- +kis mértékben kátrány és egyéb szemcsés anyagok.



4. ábra: A fagáz kémiai összetétele

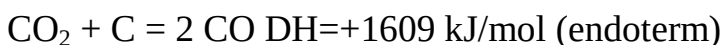
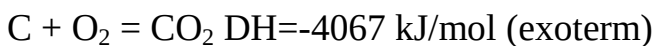
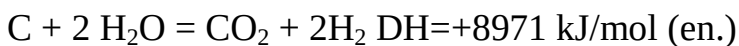
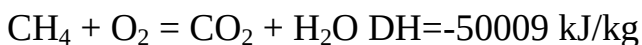
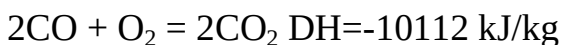
Forrás: Mechanical Wood Products Branch (1986) ^{1 ábra}

A fagáz előnyös tulajdonságai:

- Jobb az éghetőség, mint az aprított faanyag esetében.
- Gyorsabban indítható, szabályozhatóbb az égés.
- A szükséges égés kevesebb oxigént igényel.

A fagáz előnytelen tulajdonságai:

Mindkét összetevő éghető, ezek közül viszont a CO - a szén monoxid - mérgező, körülbelül százhatvanszor jobban tapad a vérben található hemoglobinhoz, mint az oxigén, így belélegezve, és a vérbe kerülve annak hemoglobin tartalmát lényegében használhatatlanná teszi. Ez pedig rosszulléhoz, fejfájáshoz, hányingerhez illetve halálhoz vezethet.

A generátor gázképződési reakciói:*A fagáz vízgőzképződési reakciói:**A generátorgáz elégetése során létrejövő reakciók:*

A generátorgáz összetétele és fűtő értéke (1. számú táblázat.)

- Gáz fűtőértéke: 5900-6700 kJ/m³
- A gáz térfogata: 2,5-3,5 m³

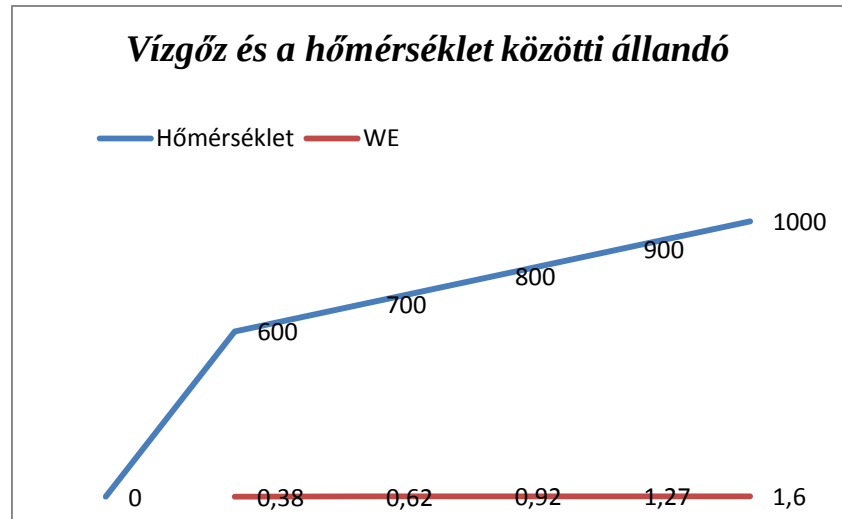
Az elgázosítás elmélete

Az elgázosítás nagyban függ a reakció sebességétől. Ha a reakció sebessége csökken, akkor hőmérséklet is leesik. Ha a reakció során a hőmérséklet 700 °C alá csökken, akkor a reakció „befagy”. A gázösszetétel ezután aránylag változatlan marad Ezt követően a pontosság érdekében a következő képlettel kell kiszámolni az összetételt (1):

$$K_{WE} = \frac{(CO)x(H_2O)}{(CO)x(H_2)} \quad (1)$$

Ez alapján már ki tudjuk számolni a vízgőz és a hőmérséklet közötti állandót:¹

Hőmérséklet (°C)	WE
600	0,38
700	0,62
800	0,92
900	1,27
1000	1,60



5. ábra: A vízgőz és a hőmérséklet függvénye
Forrás: Mechanical Wood Products Branch (1986) ^{1 ábra}

¹ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (4.-12. oldal)

^{1.ábra} Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (9. oldal)

^{2.ábra} Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (9. oldal)

A fagáz hatékonysági tényezője

Fontos-e tényező meghatározása. Az aktuális technika, üzemeltetési, valamint a gazdasági megvalósításhoz, ki kell számolni egy fagázgenerátor hatékonyságát.

Először egy hasznos értéket kell meg határoznunk (2), a gázosodási folyamat hatásfokát:

$$\eta_m = \frac{H_g \times Q_g}{H_s \times M_s} \times 100 \quad (2)$$

ahol,

η_m - a mechanikai gázosítás hatásfoka [%]

H_g - a gáz fűtőértéke [kJ/m³]

Q_g - a gáz térfogat árama [m³/s]

H_s - alacsonyabb értékű fűtő anyag fagázgenerátor részére [kg/kJ]

M_s - a fagáz generátor szilárdanyag üzemi fogyasztása [kg/s]

Ha a gáz közvetlenül felhasználható égésre (termikus), akkor a következő képlettel számoljuk ki (3):

$$\eta_{th} = \frac{(H_g \times Q_g) + (Q_g \times \rho_g \times C_p \times \Delta T)}{H_s \times M_s} \times 100 \quad (3)$$

ahol,

η_{th} - a gázosítás hatásfoka termikus esetben [%]

ρ_g - a gáz sűrűsége [kg/m³]

C_p - a gáz fajhője [kJ/kg * °K]

ΔT - hőmérséklet különbség a gázégő hőmérséklete és a belépő gáz hőmérséklete között.

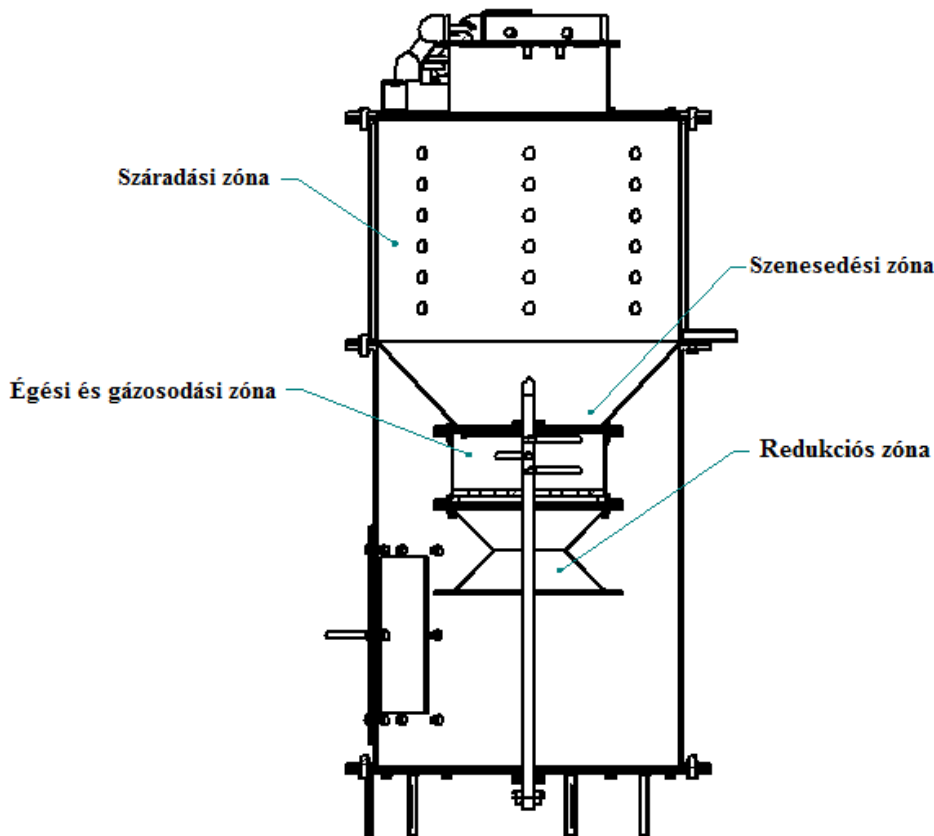
Típustól függően a fagázgenerátor hatásfoka lehet, az üzemanyag függvényében:

- mechanikai, ekkor a hatásfok 65-75 %
- termikus, ekkor 90% körül mozog²

² Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (10.-11. oldal)

A fagázt generátorról általában

A fagázt generátor elvi felépítése



6. ábra: A fagázt generátor elvi felépítése
Forrás: Saját rajz

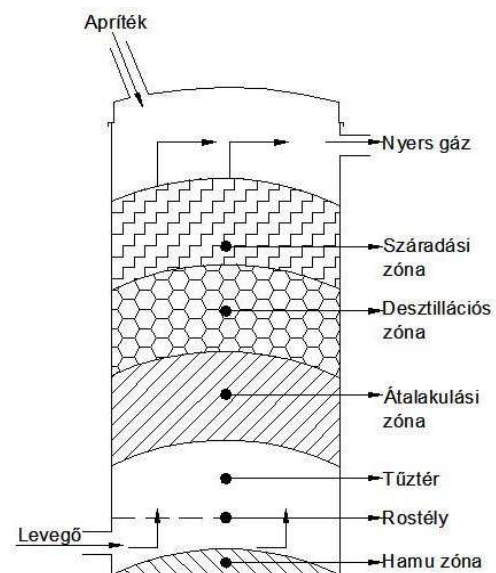
A gázt generátort felülről töltjük meg, lehetőleg minél tömörebben. Minél tömörebb az égéstérben az anyagunk, annál jobb a hatásfokunk, ugyanis annál könnyebben érjük el a tökéletes égést. A begyűjtés alulról történik, azonban lehetséges az elsődleges levegő irányából is. A begyűjtés és a beizzás közti idő szakirodalom szerint 5-15 perc, tehát ennyi időre van szükség ahhoz, hogy a kiáramló gázelegy már megfelelő mennyiségű éghető anyagot tartalmazzon, és egyúttal az égési zónák kialakuljanak. Először nyilván az égési zóna alakul ki, ami később gázosodási zónává alakul. Az itt keletkező hő elkezd szárítani a fölötte elhelyezkedő anyagot, ami száradás után elkezd szenesedni. Az idő múlásával a szenesedési zóna egyre tolódik fölfelé, mindaddig, amíg el nem éri határát. Felette alakul ki a száradási zóna.

Az égéstér két hengerpalástból áll, a belső hengerpalást perforált, a külső zárt. Hő hatására az áramlás az ábrán jelölt formában alakul ki, így a nedvesség a külső falon lecsapódik, ezért szükség van egy összefolyóra, ami elvezeti, és összegyűjti a kondenzvizet. Természetesen ennek egy megfelelő méretű tartálynak kell lennie, hogy ne kelljen gyakran leeresztetni az összegyűlt vizet. Az elsődleges levegő befűtésével tudjuk szabályozni az égést. A gáz sima égetése során is automatikussá válik a folyamat, ugyanis az égéskor keletkező hő, illetve oxigénelvonás depresszió okoz a rendszerben. A redukciós zónában tulajdonképpen egy konfúzt találunk, ami azt a célt szolgálja, hogy a gyors levegőáramlási sebesség hirtelen lecsökkenjen, így a nagyobb, hordozott hamu részecskéket ledobja.

A fagázugenerátor típusai (7. ábra)

❖ Függőleges gázkiáramlású fagázugenerátor

- „A légbeömlő a szerkezet alsó részén helyezkedik el, a fagáz felültávozik.
- A rostélyon is lépnek fel égési reakciók.
- A komolyabb fűtési és pirolízis folyamatok a felső részen mennek végbe.
- Ennek a következménye, hogy a kényszerű konvekció és a fagáz kibocsátás az alsó zónában lép fel.
- A legnagyobb előnye az, hogy egyszerű és nagyarányú szenesedés megy végbe. Viszont ennek a képességnek köszönhetően magas hőmérsékleten távozik a gáz a rendszerből. Előnye még, hogy sokféle alapanyag (fűrészpor, gabona szár, hasított fa) felhasználható.
- Hátránya viszont, hogy nagyon nehezen tudja továbbítani az adott fagázt, ezáltal eléggé robbanás veszélyes. „³

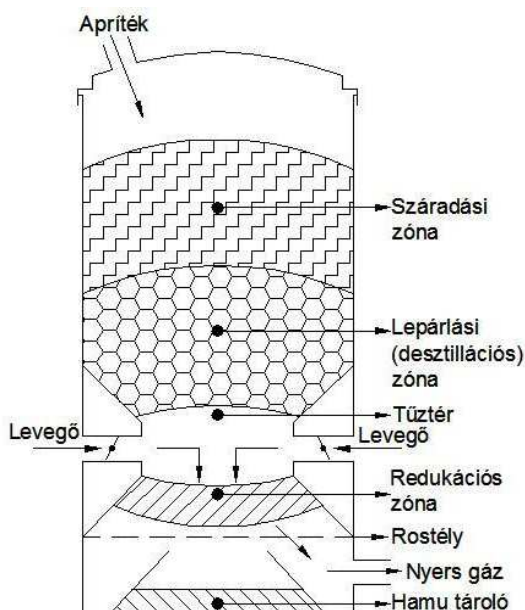


7. ábra: Függőleges gázkiáramlású fagázugenerátor

Forrás: Csitári Csaba, (2009) ^{3.ábra}

³ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (18. oldal)

^{3.ábra} Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (18. oldal)

❖ *Alsó gázkiáramlású fagázgenerátor (8. ábra)*

8. ábra: Alsó gázkiáramlású fagázgenerátor
 Forrás: Csitári Csaba, (2009) ^{4. ábra}

- „A levegő a tetején áramlik be a rendszerbe, a fagáz pedig az alján távozik a fagázgenerátorból, annak érdekébe, hogy az üzemanyag és a gáz áramlási irányja megegyező legyen. Útközben a gáznak át kell mennie az izzó- fagáz „ágyon”, ezáltal a gázban lévő kátrány tovább bomlik különböző gázokká (metán+etán+vízgőz jelenlétében hidrogén), a gáz tisztán hagyja el az égés teret (a gáz kátránymentes).

- A fő előnye az, hogy az így megszűrt gáz alkalmas belsőégésű motorok üzemeltetéséhez. Ezen tulajdonsága miatt használjuk mi is ezt az elrendezést.

- Egyszerűen képtelen feldolgozni nagy mennyiségű tüzelő anyagot, főleg ha az adott üzemanyag nem elég tömör. Ezt a tulajdonságát a szerkezet méretének növelésével lehet javítani.”⁴

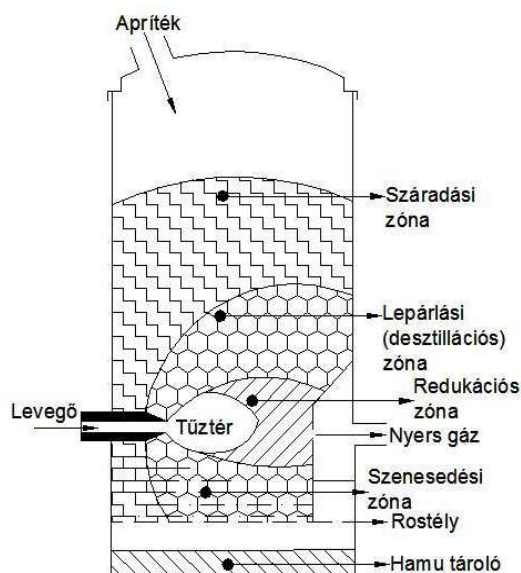
❖ *Kereszt- gázkiáramlású fagázgenerátor (9. ábra)*

- „A működési elve az, hogy a faanyagot elég magas hőmérsékleten elgázosítja (1500 Celsius-fok felett)
- A legnagyobb gond az adott technológiával az, hogy a magas hőmérsékleten végbemenő oxidációs zóna megfelelő szigetelése elég költséges.
- Előnye viszont, hogy a kész rendszert már eléggé olcsó üzemeltetni. A második előnye pedig, hogy elég egy ciklon illetve egy „forró szűrő” és már egyből össze lehet kötni, szinte bármilyen belsőégésű motorral.

⁴ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (19. oldal)

^{4. ábra} Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (19. oldal)

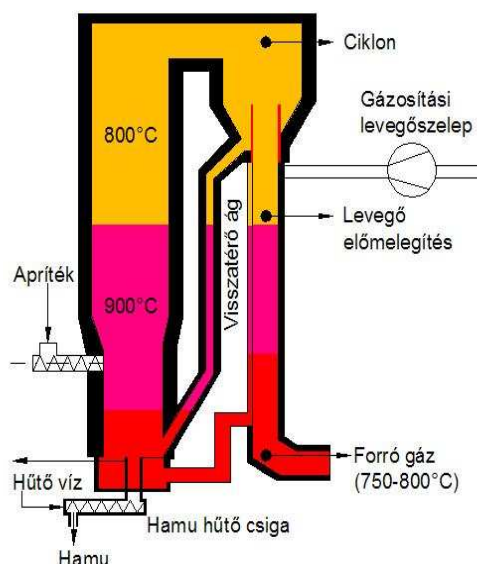
- Hátránya a kereszt-gázkiáramlású fagázgenerátornak, hogy előállítása eléggé költséges, illetve eléggé jó minőségű faszenet kell felhasználni az üzemeltetéséhez, ezáltal eléggé kevés alapanyag jöhet szóba. „⁵



9. ábra: Kereszt- gázkiáramlású fagázgenerátor

Forrás: Csitári Csaba, (2009) ^{4.ábra}

❖ Fluid-ágyas fagázgenerátor (10. ábra)



10. ábra: Fluid-ágyas fagázgenerátor elvi felépítése

Forrás: Csitári Csaba, (2009) ^{5.ábra}

⁵ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (20. oldal)

^{4.ábra} Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (20. oldal)

^{5.ábra} Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (21. oldal)

- „Működését nagyban befolyásolja a tüzelő anyag fizikai, kémiai tulajdonságai. Legtöbbször felmerülő probléma a rendszerrel kapcsolatban a „bunker” áramlás, azaz a levegő elkezd a zárt rendszerben cirkulálni, ez a folyamat hirtelen nyomás veszteséghez vezet, ami csökkenti a fagáz minőségét.
- Maga a fagázgenerátor két szerkezeti részre bontható: első az adagoló-keverő fej, amin keresztül tudjuk a beömlő levegő mennyiségét szabályozni, illetve az üzemanyagot adagolni. A második főrésze a reaktor, ahol a pirolizált folyamatok nagyon gyorsan mennek végbe.
- Előnye, az alapanyag rugalmassága miatt könnyen tudjuk szabályozni a hőmérsékletet.
- Hátránya, a viszonylag magas kátrány tartalom.(500 mg/m³)
- A fluid-ágyas generátor elérhető kereskedelmi forgalomban. Több gyártója van Európában, illetve az Egyesült Államokban is.”⁶

A fagázgenerátor történelmi áttekintése

Az a technológia, ami lehetővé tette a fagáz előállítását már az 1840-es években adott volt. Ám az első kutatások ezzel kapcsolatban, Európában, csak 1880-as évek közepétől folytak, Angliában.

Az 1900-as évek előtt komolyabban a témával a következő szervezetek foglalkoztak: Svéd Királyi Akadémia, Kaupps és Goss cég, Skov vállalat, Bailey, illetve az Amerikai Tudományos Akadémia

Egészen az 1940-es évekig elismert, ám széles körben nem terjedt el ez a technológia, viszont a második világháborúnak köszönhetően a kőolaj és más egyéb nyersanyag hiánya miatt felkapott lett és elkezdte élni az „aranykorát”.

⁶ Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (22. oldal)



11. ábra: II: világháborúban használt fagázzal működő teherautó
Forrás: Mechanical Wood Products Branch (1986) ^{6 ábra}

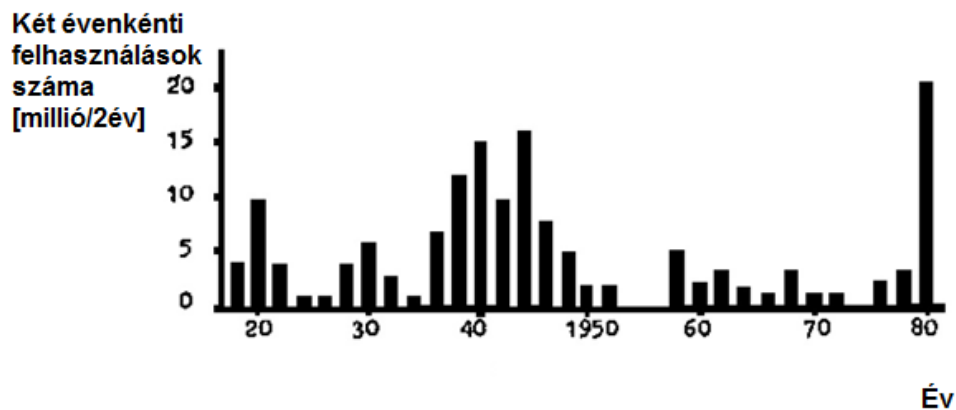
Ez után az 1973-as és az 1979-es úgynevezett kettős üzemanyag válság hozott nagy áttörést világszerte. Azon fejlett országok gazdaságai, melyek nem tudták megfizetni az egekbe szökő kőolaj árakat, illetve nem tudtak a telükön sem vízi energiát sem pedig szél energiát hasznosítani, elkezdtek szépen lassan fagázzgenerátorokat használni.

A fejletlen országokban még rosszabb volt a helyzet, hiszen az embereknek a megélhetését jelentette a mezőgazdaság. Ezért az 1980-as évek elejétől teljes kormányprojektek jöttek létre a megújuló energiaforrások kiaknázására (nagy részben a fagázzgenerátorra történő átállásra). Ilyen programok az 1982-es Fülöp-szigeteki program, illetve az 1984-es Nagy Mezőgazdasági reform program (Brazília).

A technológia még szélesebb körben történő elterjesztésére 1983-ban UNDP és a Világ Bank létrehozott egy programot, amely a THE BIOMASS GASIFIER MONITORIN PROGRAMME (BGMP) nevet viselte. Ennek a projektnek az volt a célja, hogy a biomassza gázosítási technológiájának a promóciós felhasználását elterjessze a fejlődő országokban.⁷

⁷ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (2-6. oldal)

^{6 ábra} Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (4. oldal)



12. ábra: A fagásgenerátorok használata, két évenkénti statisztikából.
(millió/2 év)

Forrás: Mechanical Wood Products Branch (1986) ⁷ ábra

Sajnos 12 év kellett ahhoz, hogy egy olyan átfogó elemzés elkészüljön, ami alapján már akár egy olyan szerkezetet is el tudnak készíteni, min a fagázerőmű.

A legtöbb fagásgenerátor Svédországban és Svájcban készült. Svédországban teljes iparág nőtt ki magát a fagásgenerátor építésére és fejlesztésére.

Ma a világon közel 4 millió fagásgenerátor üzemel, ezek legnagyobb része fűtési célokat szolgál, de az ugrásszerű elterjedés a második világháborúra és a 1980-as évek elejétől tehető.⁸

⁸ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (2-6. oldal)

⁷ ábra Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (3. oldal)

Saját fagázugenerátor átalakításának tervezése, kivitelezése

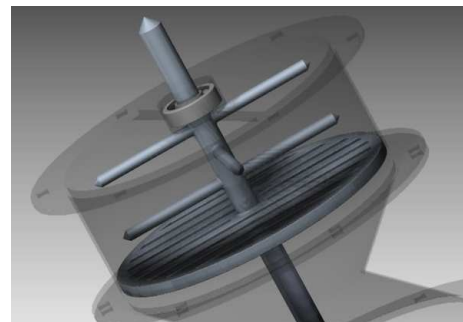
Az előző tudományos diákköri dolgozatom kapcsán elkészítettünk egy fagázugenerátort. Ezt mi egy belsőégésű motorral szerettük volna összekapcsolni és kibővíteni egy szakdolgozathoz. Ám ahogy egyre jobban beleástuk magunkat a témába, hamar rájöttünk, hogy a kátránytartalom –*ahogy eddig is látszott*- még hosszú tervezés és új megoldások bevezetése ellenére is, elég magas. Azt, hogy eljutottunk a belsőégésű motoroktól a külsőégésű rendszerekig, elég hosszas, hozzávetőleg nyolc hónapos kutató és tervező munka előzte meg. Sok irodalmazás és a már kész fagázugenerátorból nyert tapasztalatok, meghozták a várt eredményt, ehhez kisebb-nagyobb külső- belső átalakításokat kellett végrehajtani, ezeket szeretném itt részletezni:

Bolygató rendszer beépítése

Az előző dolgozatban a generátort egy vázzal illetve motorral építettük volna egybe. Ezért a faforgácsot, illetve a hamuzó-rostély mozgását az autó okozta vibrációval próbáltuk helyettesíteni. Sajnos az alapötlet változtatása miatt, és mint kiderült a vibrációtömörítő hatásának köszönhetően, mindenképpen be kellett egy bolygató rendszert építenünk. Az elképzelésünk alapjául két



14. ábra: Az általunk elkészített Bolygató rendszer fogókarja.
Forrás: Saját fotó



13. ábra: Az általunk tervezett Bolygató-rendszer 3D-s modellje.
Forrás: Saját fotó

egyszerű irányelv szolgált:

maga a bolygató és a

mozgató szerkezet egy tengelyen helyezkedjen el. A mozgítás motorral és kézzel is könnyű legyen. A tengely összekapcsolást egy egyszerű megoldással váltottuk ki. A tengelyt a toroknál és alul a hamuháznál két golyós csapággal megvezettük. A gépi és kézi mozgatót úgy oldottuk meg, hogy mozgató rúd alá beszereltünk egy ékszíj tárcsát, így át lehet gyorsan kapcsolni motorikus hajtásra és ez mellett kézzel is mozgatható.

A fagázgenerátor üzembiztossá történő átalakítása



15. ábra: Az általunk elkészített robbanás biztos tető 3D-s terve és a már készítő.

Forrás: Saját fotó

Sajnos az előző tudományos diákköri dolgozatomból és - *főleg a tapasztalat hiányában*-, egy fontos tényezőt nem vettünk számításba. Ez a megfelelő mennyiségű és nagyságú robbanó felület beépítése a fagázgenerátorba. Ezt a problémát a nyíló ajtók robbanás biztosító történő alakításával oldottuk meg, a felső nyílórészt kellőképp elvékonyítottuk, ezáltal a magas nyomás hatására ezek elnyíródnak és nem a generátor robban fel, továbbá az alsó hamuzó ajtó is át lett alakítva. A zsanérok annyira el lettek vékonyítva, hogy a magas nyomás inkább azokat hajlítja meg, mint sem a fagázgenerátor robbanjon fel.

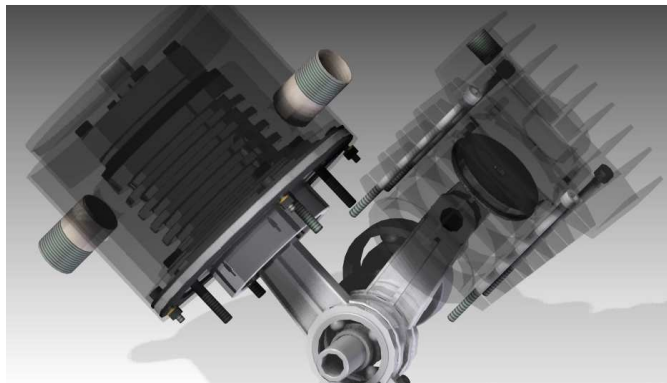


16. ábra: Az általunk elkészített robbanás biztos hamuzó-ajtó

Forrás: Saját fotó

Stirling-motor elvi felépítése

A Stirling-motor vagy más néven hőlégmotor, külső hő bevezetésű hőerőgép, általában dugattyús-forgattyús mechanizmussal készül. A belsőégésű motorokkal szemben a Stirling-motor hőforrása nem a hengerben eléggő fűtőanyag, mint az Otto- és Diesel-motoroknál vagy a gázturbináknál, hanem a motoron kívül van. A hőátadási folyamat lehetővé teszi, hogy az összes hőerőgép közül a legjobb hatásfokot nyújtsa: hatásfoka megközelítheti annak az ideális Carnot- körfolyamatnak a hatásfokát, mely az alkalmazott szerkezeti anyagoknál gyakorlatilag elérhető. (A termikus hatásfokot a hőmérséklet határoolja le).



17. ábra: Az általunk tervezett Stirling-motor hengereinek, 3D-s rajza
Forrás: Saját fotó

A Stirling motorban egy adott tömegű, a környezettől tömítésekkel elzárt gáz, általában levegő, hidrogén vagy argon van. Ennek a gáznak az állapotjelzői (például nyomás, hőmérséklet, fajtérfogat) a gáztörvények szerint változnak. Amikor az adott térfogatú gázt melegítik, a nyomása megnő, és a dugattyú felületére hatva mechanikai munkát fog végezni a motor munkaciklusában. Amikor a gázt lehűtik, nyomása esik, ez azt jelenti, hogy kevesebb munkára van szükség a gáz összenyomására a következő ütemben, mint amit a munka ütemben szolgáltatott, így az energiamérleg nyereséges lesz, ez a motor tengelyén hasznos munkaként fog megjelenni. A gáz ciklikusan áramlik a fűtő és hűtő hőcserélők között. A gáz nem távozik a munkaciklus után, hanem állandóan a motorban marad. Nincs szükség szelepekre sem, mint más motoroknál.⁹

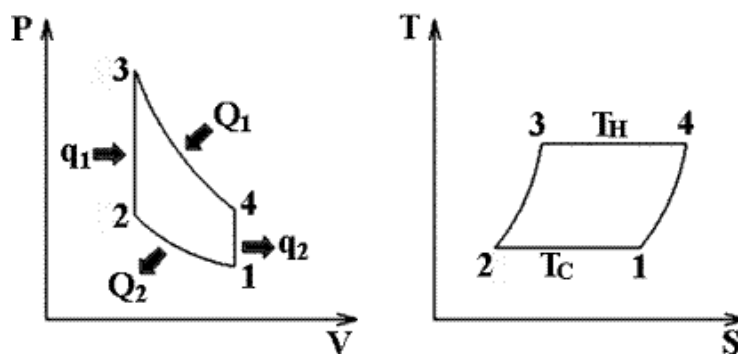
⁹ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (12.- 19. oldal)

A Stirling-motor termodinamikája

A termodinamika fogalmai szerint a Stirling-motor egy megújuló energiaforrású külsőégésű motor, mely a Stirling körfolyamat szerint működik.

❖ A Stirling körfolyamat

A Stirling körfolyamat állandó térfogatú melegítési folyamatból, izotermikus tágulási folyamatból, állandó térfogatú hűtési folyamatból és izotermikus összehúzódási folyamatból áll. Elméletileg a Carnot körfolyamatnak a legjobb a hatásfoka, s a Stirling körfolyamat hatásfoka ezzel vetekszik. A Stirling körfolyamat megfordítható, reverzibilis, azaz külső erővel hajtva hűtőként is viselkedhet.



18. ábra: A stirling körfolyamat
Forrás: Dieter Viebach (1998) ^{8 ábra}

A Stirling motornál a gáz két, egymástól bizonyos távolságra lévő és különböző hőmérsékletű térben áramlik, s ez a hőmérsékletkülönbség nyomáskülönbséget hoz létre. Ez a két tér nagyon jól el van szigetelve a külső tértől, így nincs keveredés a külső tér levegőjével. A motor, bárhol működhet, ahol hőmérsékletkülönbség van jelen, így a jövőben sok helyen lesz használható a Stirling motor.¹⁰

¹⁰ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (12.- 16. oldal)

^{8 ábra} Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (17. oldal)

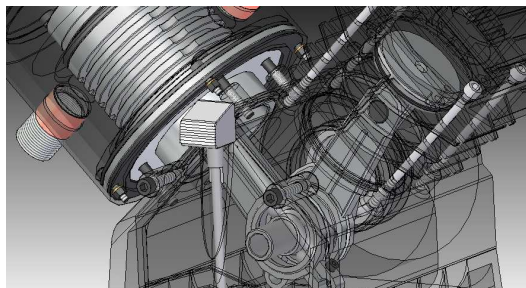
❖ A Stirling motor jellemzői

A hőforrások széles skálája

A belsőégésű motorok, mint pl. a benzin- vagy dízelmotorok csak távolú üzemanyagot használhatnak. Ugyanakkor a Stirling-motor nem csak ezeket az üzemanyagokat használhatja, hanem bármilyen éghető anyagot, mint pl. faszenet vagy fát is, *esetünkben fagázt*. Ezen kívül nem üzemanyag jellegű hőforrásokat is használhat, mint pl. a Föld hőjét, meleg légáramlatokat, vagy a napfényt. Jelenleg a világ számos pontján fejlesztenek napenergiával működő Stirling-motorokat.

Tiszta kipufogó gáz

Mivel a Stirling-motor külsőégésű, ezért az üzemanyag elégetése a motoron kívül történik. Ebből kifolyólag az égés könnyebben kontrollálható a belsőégésű motorokhoz képest. Ennek eredménye a nagyon tiszta kipufogó gáz. Esetünkben a fagáz 99,9%-ban elég ez által a Stirling technológiával működő fagázerőmű kíméli a környezetet, egyszóval környezetbarát.



19. ábra: A nyomáskülönbség nagyon finommá és csendessé teszi a folyamatot
Forrás: Saját fotó

Nagyon halk üzem

A belsőégésű motoroknál a nyomáskülönbség robbanás kíséretében alakul ki, ezért ott a zaj és a vibráció elkerülhetetlen velejárója a folyamatnak. A Stirling-motoroknál ezzel szemben a nyomás különbség nagyon finoman alakul ki, ami csöndessé teszi a folyamatot, ezen kívül nincs szükség összetett szelepmechanizmusra sem.¹¹

¹¹ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (17.-19. oldal)

A Stirling-motor fajtái

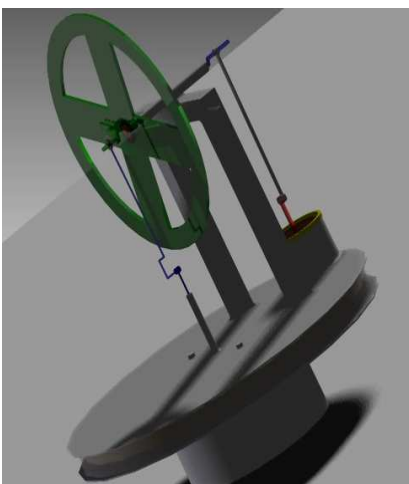
Az alfa típusú Stirling-motor (20. ábra)

- Az alfa Stirling változat két külön dugattyúval rendelkezik, egyik a meleg hőcserélőben, a másik a hideg hőcserélőben. Ennek a típusnak az egységnyi térfogatra eső teljesítménye nagy, de nehézségek merülnek fel a tömítéssel, mivel az egyik dugattyú állandó magas hőmérsékleten üzemel.
- Stirling-motorok tanulmányozása során, mi készíteni akartunk egy működő alfa típusú motort, ám két nagy probléma merült fel. Elsőként nem találtunk olyan kézen fekvő anyagot, ami a melegítést elviselte volna és legyártatása nem lett volna költséges. A másik nagy problémát a hengerfejek megfelelő szigetelése okozta, mivel otthon sajnos nem tudtunk megfelelő pontosságot előállítani, így nem próbálkoztunk tovább.



20. ábra: alfa stirling változat, általunk készített 3D-s modellje
Forrás: Saját fotó

A béta típusú Stirling-motor (21. ábra)



- A béta Stirling-motornak egyetlen hengerben egy terelődugattyúja és ezt körülvevő munkadugattyúja van, mely a terelődugattyúval egy tengely mentén mozog. A terelődugattyú hézaggal illeszkedik a hengerbe, nem szolgáltat hasznos munkát, csupán arra szolgál, hogy a gázt a forró kamrából a hidegkamrába tolja. Amikor eléri a meleg hengervéget (a gáz a hidegben van), a lendítőkerék kis késleltetéssel átsegíti a munkadugattyút a holtpontra, amely megkezdődik a hideg gáz komprimálása, és a terelődugattyú a gáz a meleg hengerbe átnyomását.

21. ábra: A béta típusú stirling-motor általunk készített 3D-s vázlata
Forrás: Saját fotó

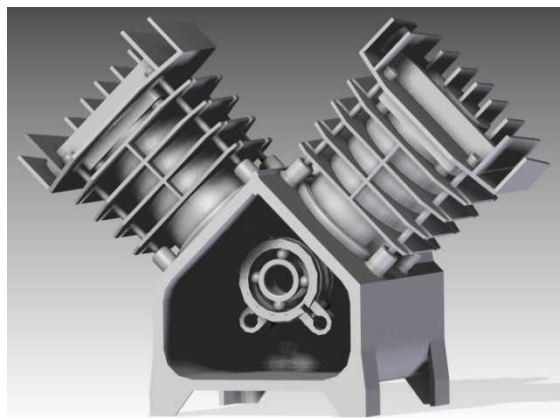
- Ez a konstrukció elkerüli az alfa változatnál felmerülő problémákat. Ezt mi is tapasztaltuk, sikerült egy működő modellt készítenünk a rendelkezésre álló anyagokból. A típushoz már az interneten is könnyű találni gyártási leírásokat háztartási cikkekből. Hátránya viszont, hogy a méret növekedéssel csökken a hatásfoka, nagy méretekben nem gazdaságos.



22. ábra: Az általunk készített béta típusú stirling-motor.
Forrás: Saját kép

Gamma típusú Stirling-motor (23. ábra)

- A gamma Stirling-motor egyszerűen egy olyan béta változat, ahol a munkadugattyú és a terelődugattyú két különálló hengerben mozog, de mindkét forgattyú ugyanahhoz a forgattyús tengelyhez csatlakozik. A gáz a két henger között szabadon áramolhat. Ez a megoldás kisebb kompresszió viszonyt tesz lehetővé, de az előbbieknél egyszerűbb a szerkezete és gyakran használják többhengeres kiviteleknel.
- Az általunk tervezett Stirling-motor gamma típusú. Azért ezt választottuk, mert nem egy működő makettet szerettünk volna készíteni, hanem egy akkor kapacitásút, ami esetünkben áramot termel és a mozgási energiává alakítja a fagázgenerátor hőjét. Erre az irodalmunkban (*Der Stirling motor*) már találtunk utalást, hogy a gamma típusú a legalkalmasabb. A számolások kapcsán (amint lentebb ismertettünk) ez bizonyult a legmegbízhatóbbnak és legolcsóbbnak.¹²



23. ábra: Az általunk tervezett Stirling-motor váza:
Egy egyszerű V-állású kompresszor
Forrás: Saját kép

¹² Dieter Viebach- *Der Stirling-motor* (1998) (71.-82. oldal)

Stirling-motorok előnyei-hátrányai

Előnyök

- Az égés kívül zajlik le, ezért a levegő- tüzelőanyag- keveréket sokkal pontosabban lehet szabályozni.
- A hőforrás folytonos égést kíván, ezért az elégtelen füstgázok mennyisége elenyésző.
- Sok Stirling-motor csapágyazása a hideg oldalon helyezkedik el, ezért a kenést egyszerűbb megoldani és a kenőanyag élettartama két olajcsere között hosszabb lehet.
- Az egész motor sokkal kevésbé bonyolult szerkezet, mint a belsőégésű motorok.
- Sokkal kisebb nyomáson üzemelnek, ezért sokkal biztonságosabbak, mint a konvencionális hőerőgépek.
- A kisebb üzemnyomás könnyebb szerkezeti elemek beépítését teszi lehetővé.

Hátrányok

- A Stirling-motor hideg és meleg oldali hőcserélői költséges szerkezetek, ezek nyomásálló és korrózióálló kivitelben kell, hogy készüljenek. Ez megnöveli a költségeket különösen akkor, ha jó hatásfokú motort kell készíteni.
- Különösen kis hőmérsékletkülönbség esetén a hideg és meleg oldal között a motor méretei sokkal nagyobbak az azonos teljesítményű belsőégésű motorokhoz képest a nagy hőcserélők miatt.
- A Stirling-motort nem lehet gyorsan beindítani, lassú felmelegedésre van szüksége. Ez ugyan a belsőégésű motorokra is igaz, de a felfűtéshez szükséges idő itt sokkal hosszabb.
- A leadott teljesítményt nehéz változtatni, gyors változtatás nem is lehetséges. A teljesítményt vagy a dugattyú lökethosszának változtatásával vagy az áramló gáz mennyiségével lehet szabályozni. Ez hibrid hajtásokban és alaperőforrásoknál, ahol állandó teljesítményre van szükség, kevésbé problematikus.¹³

¹³ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (19. oldal)

A Stirling-motor történelmi áttekintése

A motort Robert Stirling lelkész találta fel 1816-ban, aki az első gépeken lényeges újításokat dolgozott ki, az első szabadalmat adta be és később segített mérnök fivérének, James Stirlingnek a további fejlesztésben. A tizenkilencedik század folyamán a Stirling-motor olyan alkalmazásoknál terjedt el, ahol kis vagy közepes teljesítményekre volt szükség. Ma ilyen helyen villanymotorokat használnak. Az első hűtőgépekben hőszivattyúként használták. A 40-es évek vége felé Hollandiában a Philips Elektronikai Vállalat olyan sokoldalú erőgépet keresett elektronikus berendezéseik aggregátjaihoz, melyet világszerte alkalmazni tudott olyan helyeken, ahol nem volt kiépítve villamos hálózat. A társaság hatalmas fejlesztési munkát szentelt a Stirling-motornak, az 1930-as évektől az 1970-es évekig. Az utolsó nagy felfutás a fejlesztésben a hűtőtechnikában történt fordított működésű Stirling-motorra. A Kokums svéd hajógyár több mint tíz tengeralattjárót épített Stirling hajtással az 1980-as években, melyek nagy üzleti sikert jelentettek. 2005-ben a Southern California Edison jelentett be egy megállapodást 500 MW összteljesítményű, 20 000 db napfény fűtésű Stirling-motor szállítására az Energy Systems-től 20 éven keresztül. Ez a rendszer egy 19 km² területű napfény farmon lesz elhelyezve és tükrök fogják a napfényt a motorokra vetíteni, melyek generátorokat hajtanak majd. A Los Alamos Nemzeti Laboratóriummozgó alkatrészek nélküli *akusztikus Stirling-motort* fejlesztett. Ez a hőenergiát rendkívül erős hangenergiává alakítja.¹⁴

¹⁴ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (2.-4. oldal)

A Stirling-motor energiája, teljesítménye és hatásfoka

Schmidth féle elmélet Stirling motoroknál

Ez az elmélet az ideális gázok izometrikus tágulásán és összehúzódásán alapszik. A motor hatásfokát egy P-V diagram segítségével lehet kiszámolni. A motor térfogatát könnyen meghatározhatjuk annak belső geometriája alapján. Mikor a térfogat, a munkagáz tömege és a hőmérséklet ismert, a nyomást az ideális gázok számolási módszerével már könnyen meghatározhatjuk.⁽⁴⁾

$$P \times V = m \times R \times T \quad (4)$$

ahol,

P- Motor nyomása [bar]

V- Teljes pillanatnyi térfogat [m³]

m- Munkagáz teljes tömege [kg]

R- Gázállandó [J/Kg*°K]

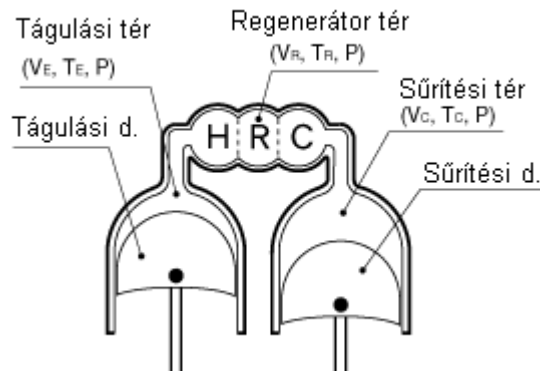
T- Tágulási és a Sűrítési tér gázhőmérsékletének a különbsége [°K]

A motor nyomását a következő feltételezések alapján számíthatjuk ki:

- Nincs nyomásvesztés a hőcsere folyamán és nincsenek különbségek a belső nyomásban
- b – a tágulási folyamat és az összehúzódási folyamat izotermikusan változik
- c – a munkagáz ideális gázként viselkedik
- d – a regeneráció tökéletes
- e- a körfolyamat során a tágulás holtpontján a táguló gáz hőmérséklete T_E, az összehúzódás holtpontján pedig T_C.
- f- a regenerátorban lévő gáz hőmérséklete a T_E és T_C hőmérsékletének az átlaga
- g- a tágulási tér (V_E) és az összehúzódási tér (V_C) változása szinuszos hullám alakot vesz fel.¹⁵

¹⁵ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (18. oldal)

A gamma típusú Stirling-motor számítása



24. ábra: A gamma típusú motor elvi felépítése
Forrás: Dieter Viebach (1998) ^{9 ábra}

A tágulási és sűrítési hengerek térfogatát kell először meghatározni egy adott „x” forgattyús ház szögénél. Ez a forgattyús ház szög 90° , mikor a tágulási dugattyú a felső holtponton van. A pillanatnyi tágulási térfogat V_E (5) a tágulási henger lökettérfogatától V_{SE} és a tágulási holt térfogattól V_{DE} függ a (g) feltétel szerint.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} \times (1 - \cos x) + V_{DE} \quad (5)$$

A pillanatnyi tágulási sűrítési térfogat V_C (6) a sűrítő henger lökettérfogatától V_{SC} és a sűrítési holt térfogattól V_{DC} , valamint a „dx” fázisszögtől függ.

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos x) + \frac{V_{DC}}{2} [1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \quad (6)$$

A teljes pillanatnyi térfogat: $V = V_E + V_R + V_C$

Az egyesített gáztörvényből már a megkapott adatok kapcsán ki tudjuk számolni a gáz tömegét (7):¹⁶

$$\frac{V_1 x P_1}{T_1} = \frac{V_2 x P_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1 x P_1 x T_2}{T_1 x P_2} \Rightarrow m = V_2 x \delta_{Argon} \quad (7)$$

¹⁶ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (24-32. oldal)

^{9 ábra} Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (24. oldal)

A gáz tömegének meghatározása

- Táguló vagy kiszorító dugattyú lökettérfogatának meghatározása (V_{SE}) (8):
- Átmérő (d): 60mm=0,06m
- lökethossz (s): 24mm=0,024m

$$V_{SE} = \frac{d^2 \pi}{4} x s = \frac{0,06^2 x 3,14}{4} x 0,024 = \mathbf{0,000067824 m^3} \quad (8)$$

- Sűrített és munka dugattyú lökettérfogata és a Tágulási tér holt térfogata ($V_{DE} V_{SL}$) (9):
- Átmérő (d): 60mm=0,06m
- lökethossz (s): 19mm=0,019m

$$V_{DE,SC} = \frac{0,06^2 x 3,14}{4} x 0,019 = \mathbf{0,000053694 m^3} \quad (9)$$

- Regenerátor tér térfogatának meghatározása (V_R) (10):
- d=20mm=0,02m

$$\frac{d^2 x \pi}{4} = \frac{0,02^2 x 3,14}{4} = \mathbf{0,000314 m^2}$$

$$V_R = 0,001 + 6 x (0,000314 x 0,198) = \mathbf{0,001373032 m^3} \quad (10)$$

- Sűrítési tér holt térfogata (V_{DC}) (11):

$$V_{DC} = 0,002826 x 0,014 = \mathbf{0,000039564 m^3} \quad (11)$$

- Pillanatnyi tágulási térfogat (V_E) (12):

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} x (1 - \cos x) + V_{DE} = \frac{0,000067824}{2} x (1 - \cos 90^\circ) + 0,000053694 = \mathbf{0,000087606 m^3} \quad (12)$$

- Pillanatnyi sűrítési térfogat (V_C) (13):

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2} x (1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2} x (1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} = \frac{0,000067824}{2} x 1 + \frac{0,000053694}{2} x 1 + 0,000039564 = \mathbf{0,000100324 m^3} \quad (13)$$

- A teljes pillanatnyi térfogat (V) (14):

$$V=V_E+V_R+V_C=0,001373032+0,000087606+0,000100324=\mathbf{0,001560962m^3} \quad (14)$$

- A gáz tömege ($m_{gáz}$) (15):

$$\frac{V_1 \times P_1}{T_1} = \frac{V_2 \times P_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1 \times P_1 \times T_2}{T_1 \times P_2} \Rightarrow m_{gáz} = V_2 \times \delta_{Argon} \Rightarrow$$

$$m_{gáz} = 0,003121924 \times 1,784 = \mathbf{0,0055695 \text{ kg}}^{17} \quad (15)$$

A regenerátor tér hőmérsékletének a meghatározása (16):

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (16)$$

ahol,

T_C - Sűrítési tér gázhőmérséklete, esetünkben $50^\circ\text{C} = 325,17^\circ\text{K}$

T_H - Tágulási tér gázhőmérséklete, esetünkben $250^\circ\text{C} = 523,15^\circ\text{K}$

$$T_R = \frac{325,17 + 523,15}{2} = \mathbf{424,16^\circ\text{K}}$$

A stirling-motor tervezett irodalmi hatásfokának meghatározása (17)

$$e = 1 - t \quad (17)$$

ahol,

t-a hőmérséklet aránya (18) esetünkben ,

$$t = \frac{T_C}{T_E} = \frac{50^\circ\text{C}}{250^\circ\text{C}} = \mathbf{0,2} \quad (18)$$

ebből következik:

$$e = 1 - t = 1 - 0,2 = 0,8 \Rightarrow \mathbf{80\%}$$

Ez a hatásfok megegyezik a Carnot körfolyamat hatásfokával, mely a hőerőgépek közül a legmagasabb.¹⁷

¹⁷ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (56.-58. oldal)

A stirling-motor tervezett irodalmi teljesítményének a meghatározása

A fentiekben már megkapott adatok alapján, ki tudjuk számolni a stirling-motorunk munkáját illetve a teljesítményét (19)

$$L = W_i \times n \quad (19)$$

ahol,

W_i - egy ciklus energiája (20), ami esetünkben:

$$W_i = \frac{P_{\text{átlagos}} \times V_{SE} \times \pi \times c(1 - t) \times \sin \alpha}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = 0,6989 \text{ KJ} \quad (20)$$

n -a motor maximális fordulát száma esetünkben (21):

$$n_{\max} = 4700,1 \frac{1}{\text{perc}} \quad (21)$$

A két kapott tényezőtől következik (22):

$$L = W_i \times n = 3285,3 \text{ W} \sim \mathbf{3,2KW} \quad (22)$$

Saját Stirling-motor tervezése



25. ábra: Az átalakításra megvásárolt Kompresszor
Forrás: Saját fotó

Miután az irodalmi értékeket megkaptuk, hosszas keresgélés következett, hogy mit, vagy egyáltalán valamit át lehet-e alakítani ilyen nagy teljesítményű Stirling-motorrá. Végül a sok keresgélés meghozta gyümölcsét, hiszen sikerült hozzá jutnunk egy *Kompresszorhoz*. Ezután már elkezdtünk a tervezésről-átalakításról gondolkodni. Amit mindenféleképpen át kellett terveznünk az: a melegítésre szánt *hengerfej*; a *dugattyúk* (ezeknek el kellene viselni a magas nyomást), ki kellett

fejlesztenünk egy olyan *gázhűtőt*, ami a lehető legnagyobb hatékonysággal lehűti a gázt a hideg és meleg hengerfejek számára. Ez a fejezet a saját „*Stirling-motor evolúciónkat*” hivatott bemutatni, részletesen, ahogy mi is végig jártuk a tervezés fázisait.

A kazán-formula

Első lépésként meg kellett határoznunk, hogy kész Stirling-motor milyen veszélyességi osztályba sorolható, ez után a cél az volt, hogy az adott veszélyességi osztályhoz megfelelő vastagságú hengert tervezzünk.

Veszélyességi tényező meghatározása

A túlnyomással terhelt „tartály” üzeme veszélyes. A tartály felrobbanása emberéletet veszélyeztethet és jelentős anyagi kárt okozhat. Ezért a Stirling-motor tervezését, gyártását és üzemét szigorú ellenőrzés kíséri. A nyomástartó edények üzemének veszélyességét a belső nyomás és a térfogat mellett felhasználásuk módja is befolyásolja.

A nyomástartó edények veszélyességét a T terhelésmutató (23) jellemzi:

$$T = c * \sqrt{V * p_{max}} \quad (23)$$

ahol,

c - a veszélyességi tényező, esetünkben 1000 (nyomás alatt lévő hengeres „tartály”)

P_{max} [bar]- engedélyezési nyomás, esetünkben 50 bar

V [m³]- a tartály térfogata, esetünkben 0,001560962 m³

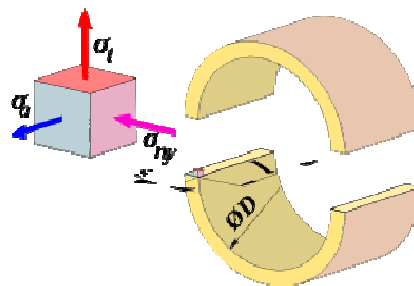
$$T = c * \sqrt{V * p_{max}} = 1000 * \sqrt{50 * 0,001560962} = 1000 * 0,27937 = 279,37 \sim \mathbf{280 \text{ bar} * m^3}$$

A terhelésmutató alapján a nyomás alatt lévő tartályokat a következőképpen sorolják be:

- $T < 1000$ veszélytelen terhelés
- $1000 < T < 30000$ kisterhelésű
- $30000 < T < 10^6$ közepes terhelésű
- $T > 10^6$ nagyterhelésű

Tehát az általunk tervezett Stirling-motor a - *veszélytelen terheléses*- osztályba soroljuk.

A fal vastagságának meghatározása



26. ábra: A nyomás alatt lévő hengerben ébredő feszültségek
 Forrás: Dieter Viebach (1998) ^{10 ábra}

ahol,

s – a nyomás alatt lévő henger falának, a vastagsága [mm]

D – a nyomás alatt lévő henger belső átmérője [mm]

l – a nyomás alatt lévő henger belső hossza [mm]

σ_t ; σ_{ny} ; σ_a ; - a henger falában ébredő feszültségek [N/mm²]

A vékonyfalú hengeres edényben belső nyomás hatására ébredő feszültséget az úgynevezett kazánformula vagy kazánképlet írja le. Az ábra szerinti D -átmérőjű hengeres nyomástartó edény egy tetszőleges l -hosszúságú szeletének képét ábrázolja, melyet egy szimmetriasíkja mentén képzeletben kettévágunk. A kettévágott két félkör alakú héjelemet a belső nyomás szét akarja húzni. A nyomástartó henger belső felületére a belső nyomás is hat, mely p - nagyságú nyomófeszültséget eredményez, tehát (24):

$$\sigma_{ny} = \sigma_t = \sigma_a = p \quad (24)$$

Ezek után már felírható a következő összefüggés, amellyel meg tudjuk határozni a fal vastagságát (25):

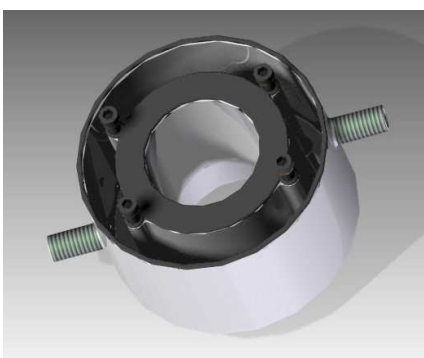
$$\sigma_a = \frac{D * p}{4 * s} \rightarrow s = \frac{D}{4} = \frac{0,06}{4} = 0,015m = \mathbf{15mm} \quad (25)$$

Tehát a hengerfej tervezésekor 15 mm-es vastagsággal kell számolni.

A nyomás alatt lévő hengerfejnek a vastagsága, a kazán-formula szerint, a nyomás alatt lévő henger, falvastagságának a kétszerese, tehát **30mm**.¹⁸

Az átalakított henger tervezése

Első verzió



27. ábra: Az első tervezett hengerfej, a dugattyú-ház és a termo-olaj tartály egyszerre lett volna kiöntve
Forrás: Saját fotó

Célunk az első terveknel az volt, hogy a legkevesebb átalakítással a lehető legkisebb költségen le tudjuk gyártani a hengerfejet.

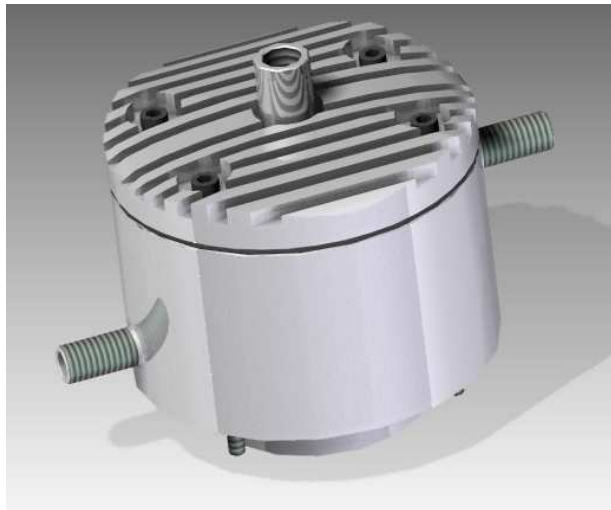
Ezeket szem előtt tartva készítettük el az első vázlatokat. A hengerfej és a termo-olaj számára a hőcserélő tartály egybe lett volna kiöntve. A rögzítést ugyanazokkal a csavarokkal oldottuk meg, mint az eredeti fejnél. Nagy előnye ennek a koncepciónak, hogy aránylag olcsón legyártható, a szigetelés is könnyen

kivitelezhető, hiszen a hengerfej nem áll sok alkatrészből.

¹⁸ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (74.-82. oldal)

¹⁰ ábra Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (82. oldal)

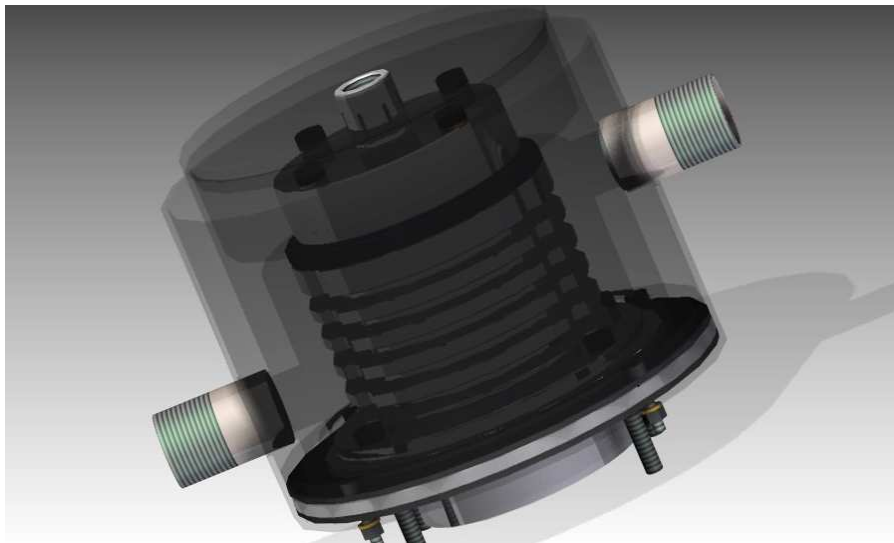
Az anyaga acél-alumínium ötvözet, így a hőt könnyen fel tudja venni és a termo-olaj folyamatos áramlásának köszönhetően hamar elérte volna az üzemi fordulatszámot.



28. ábra: Első típusú hengerfej, a kompresszor eredeti rögzítő csavarjaival.

Forrás: Saját fotó

Hátránya azonban, hogy mivel az egész hengerfejet egybe öntöttük volna ki ezért az öntés során hajszálrepedések jelennének meg, ez számottevően megnövelné a többlet költségeket, mert akár több fejet is ki kellett volna öntetnünk. Hiba lett volna még az alumínium ötvözet miatti menet vágás is. Mi egy olyan kísérleti prototípust szeretnénk készíteni, ami könnyen szétszerelhető. Ez sajnos az anyagának köszönhetően nem valósítható meg, mivel az alumíniumban menetet vágni illetve folyamatosan használni lehetetlen lett volna. Gondot okoznának még az eredeti fej csavarjai is, a kompresszor gyári alkatrészei nem nagy nyomásra lettek tervezve. Ezért ebből következik, hogy az eredeti csavarok nem tudták volna elviselni a magas nyomást és elnyíródának. Ez a terv kiindulásnak tökéletes volt, ám a gyártásnál illetve a használatnál számottevő problémák jelentkeznének.

Második verzió

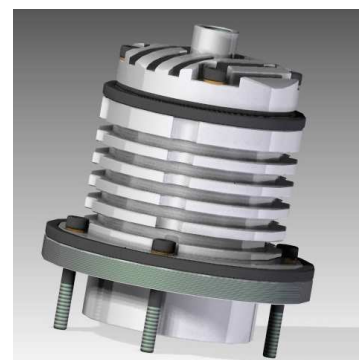
29. ábra: A második típusú hengerfej
Forrás: Saját fotó

A második hengerfejnél a célunk az első típusnál felmerülő problémák kiküszöbölése. Első lépésként szétbontottuk a hengerfejet alkatrészekre, mégpedig: egy dugattyú-házra; termo-olaj tartályra; egy hengerfejre; egy felső szigetelő tartályra; és az összes menetes részt kicseréltük réz csövekre. Remélhetőleg ezek a lépések megkönnyítik a gyártást, illetve átláthatóbbá, szétszerelhetőbbé teszik a hengerfejet.

Következő lépésként kicseréltük az eredeti csavarokat speciális nagyobb szakítószilárdságú csavarokra. A rögzítést is átterveztük, kisebb csavarokat használunk, amik nem futnak végig az egész hengerfejen, hanem csak az alsó peremig ahol a termo-tartályt rögzítjük. Ezzel a célunk az volt, hogy a *melegítő-kör* teljesen függetlenítsük a hengerfejtől.

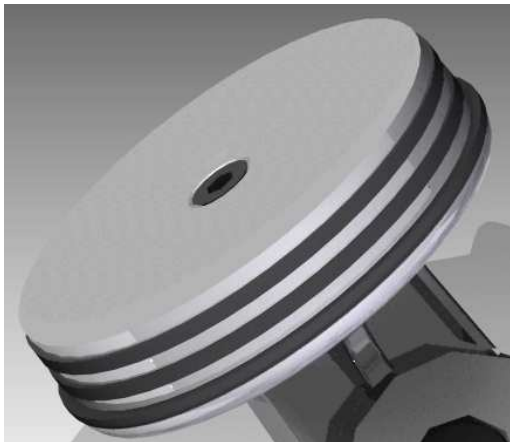
A dugattyú-házat bebordáztuk, ezáltal a terveink szerint hamarabb felmelegszik, és jobban megtartja a hőt.

Hátránya ennek a koncepciónak, hogy a megnövekedett alkatrészek miatt sokkal több tömítési felület keletkezik. Ez azt jelenti, hogy több helyen eltud „szökni” az argon gáz, de már léteznek olyan korszerű szigetelések, amik megakadályozzák ezt a problémát.



30. ábra: A "függetlenített" verziójú hengerfej
Forrás: Saját fotó

Az átalakított dugattyú tervezése



31. ábra: Az átalakított Dugattyú 3D-s modellje
Forrás: Saját fotó

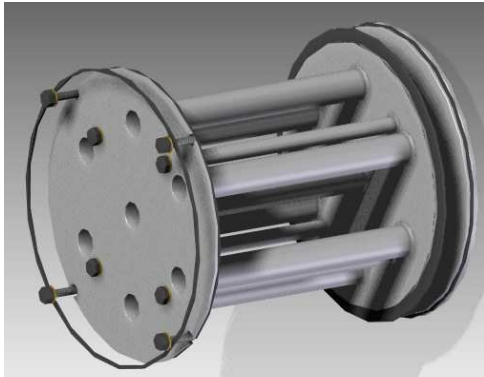
Miután a hengerfejet nyomásállóvá alakítottuk át, a dugattyú-kart is át kellett terveznünk. Első lépésként a dugattyú-fej vastagságát kellett megnövelni. Ezt a vastagságot már a kazán-formulánál kiszámoltuk, hiszen a hengerfej vastagságával megegyezőnek kell lenni a dugattyú-fejnek is, *(Mivel a kazánformula kimondja, hogy a nyomás alatt lévő tartálynak, a tetejének és az aljának is ugyan olyan vastagnak kell lenni, tehát a teteje a hengerfej, az alja pedig a dugattyú-fej)* ez a vastagság pedig **30mm**. Következő lépésként azt kellett megterveznünk, hogy az Argongáz

ne szökjön el a hengerfejben. Ezt egy speciális módszerrel oldottuk meg. Az ötlet az autóiparból jött, mivel ott a nagy nyomásnak köszönhetően több *kompresszor-* gyűrűt is be szoktak építeni a dugattyú-fejbe. Nekünk mivel nagy a nyomás és a gáz miatt elég jól kell szigetelnünk, három darab gyűrűt terveztünk a rendszerbe.



32. ábra: Az általunk tervezett, átalakított Dugattyú 3D-s terve
Forrás: Saját fotó

Gáz-hűtő tervezése



33. ábra: Az általunk tervezett gázhűtő, 3D-s modellje
Forrás: Saját fotó

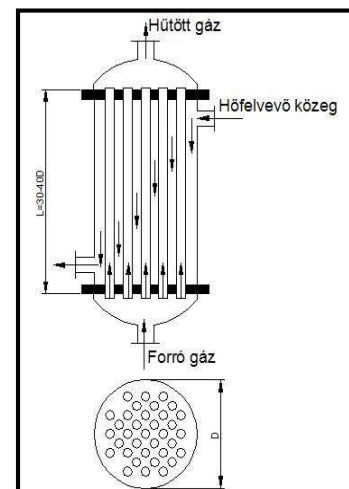
Stirling-motornál, minél nagyobb a *sűrítési-* és a *tágulási-tér* közötti hőmérséklet különbség, annál nagyobb a hatásfok. Azt, hogy ezt garantálni tudjuk, mindenképp be kellett iktatni a rendszerbe egy *gázhűtőt*. Ennek a fontos alkatrésznek a megtervezése talán a legtöbb időt emésztette fel, ez érhető mivel létfontosságú elem. Nem mindegy, hogy a hűtött gázt mire akarjuk használni, tovább akarjuk-e tisztítani vagy már a beáramló gáz állapota megfelelő. Esetünkben a belépő gáz tisztasága ideális nem kell tovább tisztítani.

Csőköteges gáz-hűtő

„A csőköteges hőcserélőknek számos konstrukciós elrendezését alkalmazzák a gyakorlatban, melyet a 32. ábra illusztrál. A (külső) köpenytérben az áramlás gyorsítása, ezzel a hőátadás intenzitásának növelése érdekében terelőlemezeket alkalmaznak.”¹⁹

A terelőlemezek lehetnek kör, körgyűrű és körszegmens alakúak. Esetünkben a terelők 20mm átmérőjű körgyűrűk. Szám szerint 7db található benne, melyek hossza 230mm. Hőcserélő 200mm széles és 250mm hosszú. Ezek azok a befoglaló méretek, melyek az ideális

gázáramlást lehetővé teszik. Az átáramló gáz hűtését vízzel terveztük. A keringetéséről egy szivattyú gondoskodik. A gáz-hűtő szigetelését korszerű hőálló szigeteléssel oldanánk meg.



34. ábra: A csőköteges gáz-hűtő elvi felépítése
Forrás: Csitári Csaba (2012)

¹⁹ ¹⁹ Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagásgenerátorhoz (2012) (18. oldal)

¹¹ ¹¹ ábra Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagásgenerátorhoz (2012) (19. oldal)

A gáz hűtése csőköteges hőcserélővel

„A gázelőkészítés első fázisában a szintézis gázt egy vízűtéses csőköteges hőcserélőn vezetjük át. A célunk, hogy a gázmosóba maximum 50°C – os gáz érkezzon. A feladatunk tehát egy ellenőrzési feladat, miszerint a kilépő gáz hőmérséklete alatta van a számunkra ideális hőmérsékletnél. Másodlagos szempont, hogy a hűtővíz hőmérséklete ne érje el a 100 °C – ót. A csőköteges hőcserélőben szintézis gázt hűtünk.

A gáz paraméterei:

$$\text{Fajhő: } c_{p,gáz} = 29,099 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\text{Tömegáram: } \dot{m}_{gáz} = 0,004 kg/s$$

$$\text{Belépő hőmérséklete: } t_{gáz,be} = 250^{\circ}C = 523,15^{\circ}K$$

A hűtővíz paraméterei:

$$\text{Fajhő: } c_{p,víz} = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\text{Tömegáram: } \dot{m}_{víz} = 0,25 kg/s$$

$$\text{Belépő hőmérséklete: } t_{víz,be} = 14^{\circ}C = 287K$$

35 ábra - A csőköteges hőcserélőben alkalmazott csövek paraméterei

Varratnélküli acélcső műszaki paraméterei	
Külső átmérő [Dk]	24mm
Belső átmérő [Db]	20 mm
Csövek száma	7
Hő átadó felület [A]	1,49 m ²
Számítási csőhossz [Lsz]	240mm
Összes csőtér fogat [Vö]	0,00045216 m ³

35. ábra: A csőköteges hőcserélő paraméterei

A számítási feladatot az adiabatikus kitevő meghatározásával kezdjük. Ebben az esetben idealizáljuk a gázunkat és állandó térfogatúnak és nyomásúnak tételezzük fel. Az adiabatikus

kitevőt többféle képen is meghatározhatjuk, de mi a gázmolekulák szabadságfokával (26) adjuk meg:

A mi esetünkben:

$$\kappa = \frac{f + 2}{f} = \frac{5 + 2}{5} = 1,4 \quad (26)$$

ahol

κ az adiabatikus kitevő,

f a fagáz szabadságfoka.

Az adiabatikus kitevő segítségével meghatározzuk a gáz fajhőjét (27):

$$c_p = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} = \frac{1,4 \cdot 8,314}{1,4 - 1} = 29,099 \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad (27)$$

ahol

c_p a gáz fajhője állandó nyomáson,

R egyetemes gázállandó.

Tehát

$$C_{gáz} = c_{p,gáz} \cdot \dot{m}_{gáz} = 0,16206 \frac{W}{K}; \quad (28)$$

$$C_{víz} = c_{p,víz} \cdot \dot{m}_{víz} = 1,045 \frac{W}{K}; \quad (29)$$

Ahol

a $C_{gáz}$ és $C_{víz}$ az adott közegek hőkapacitásárama.

$$C_{min} = 0,16206 \frac{W}{K}; C_{max} = 1,045 \frac{W}{K}$$

$$R_c = \frac{C_{min}}{C_{max}} = 0,155$$

Ahol

R_c hőkapacitásáram arány.

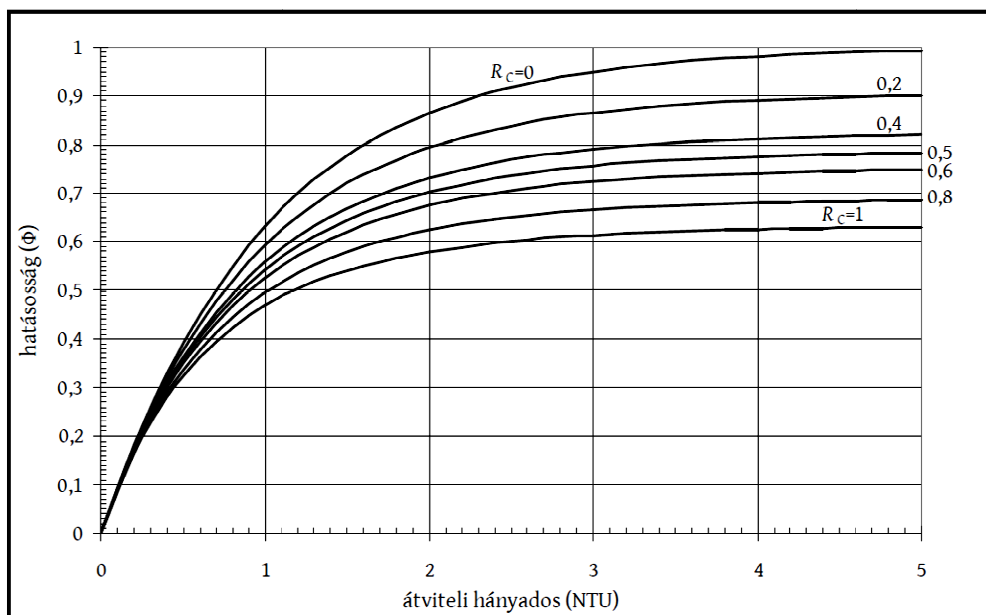
$$Q_{max} = C_{min} \cdot (t_{gáz,be} - t_{víz,ki}) = 79847,65W$$

A hőcserélőkre jellemző hő átviteli tényező $U = 850 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Ebből az átviteli hányados (NTU):

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} = 10,88$$

Az NTU értékéből meghatározható a hőcserélő hatásossága az 36. ábra segítségével.



36. ábra: Csőkötegelés hőcserélő hatékonysága
 Forrás: Csitári Csaba (2009) ^{12. ábra}

Innen a Φ értékét leolvassva:

$$\Phi = 0,92$$

A hőcserélő hő mérlege:

$$Q = \Phi \cdot Q_{max} = 73459,844 \text{ W}$$

A hő mérleg ismert összefüggését felhasználva, abból kifejezve a két közeg kilépő hőmérsékletét:

$$t_{gáz,ki} = t_{gáz,be} - \frac{Q}{C_{gáz}} = 68,73^\circ\text{C}$$

$$t_{víz,ki} = t_{víz,be} + \frac{Q}{C_{víz}} = 84,29^\circ\text{C}$$

A csőköteges hőcserélőnk megfelel az előírt műszak paraméterek előállítására. A gázmosóba belépő gáz hőmérséklete $68,73^\circ\text{C}$. Ez a gáz fog bekerülni a kombinált gázmosó egységbe.²⁰

²⁰ Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagázsgenerátorhoz (2012) (30.-36. oldal)

^{12 ábra} Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagázsgenerátorhoz (2012) (35. oldal)

Irodalomjegyzék

- ¹ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (4.-12. oldal)
- ² Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (10.-11. oldal)
- ³ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (18. oldal)
- ⁴ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (19. oldal)
- ⁵ Csitári Csaba: Szakdolgozat (2009) (20. oldal)
- ⁶ Csitári Csaba Szakdolgozat (2009) (22. oldal)
- ⁷ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (2-6. oldal)
- ⁸ Mechanical Wood Products Branch-Wood gas as engine fuel,1986; (2-6. oldal)
- ⁹ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (12.- 19. oldal)
- ¹⁰ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (12.- 16. oldal)
- ¹¹Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (17.-19. oldal)
- ¹²Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (71.-82. oldal)
- ¹³Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (19. oldal)
- ¹⁴Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (2.-4. oldal)
- ¹⁵ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (18. oldal)
- ¹⁶ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (24-32. oldal)
- ¹⁷ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (42-55. oldal)
- ¹⁸ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (50. oldal)
- ¹⁹ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (56.-58. oldal)
- ²⁰ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (62. oldal)
- ²¹ Dieter Viebach- Der Stirling-motor (1998) (74.-82. oldal)
- ²² Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagázgenerátorhoz (2012) (18. oldal)
- ²³Csitári Csaba: Kátránytalanító és gáztisztító berendezés fejlesztése fagázgenerátorhoz (2012) (30.-36. oldal)