



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

SAJÁT FEJLESZTÉSŰ RAKÉTAHAJTÓMŰ GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

TDK dolgozat

Készítette:

Kováts Bence Csaba

Szabó Barnabás

Konzulensek:

Dr. Farkas Balázs

Cseppentő Bence

Budapest, 2023. november 5.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. A téma bemutatása	5
1.2. Biztonsági megfontolások	6
1.3. Dolgozat felépítése	7
2. Alapok	8
2.1. Irodalom- és piackutatás	8
2.2. Szimulációk	10
2.3. Vegyészeti tervezés	12
3. Gyártástechnológia	13
3.1. Alkatrészek és szerszámok gyártástechnológiája	13
3.1.1. Alkatrészek	13
3.1.2. Szerszámok	16
3.2. Hajtóanyag gyártástechnológiája	17
3.2.1. Gyanta alapú technológia	18
3.2.2. Cukor alapú technológia	21
3.2.3. Technológiák összehasonlítása, tapasztalatok	23
4. Statikus hajtóműteszt	25
4.1. Mérőelektronika	25
4.2. Statikus hajtóműteszt eredményei	27
5. Összefoglalás, továbbfejlesztési lehetőségek	28
6. Köszönetnyilvánítás	29
Irodalomjegyzék	29

Összegzés

A BME Suborbitals egy légköri kutatórakétákkal foglalkozó versenycsapat, mely számos sikeres rakéta-projekten és -felbocsátáson van már túl. A csapat tapasztalatainak bővülésével felmerült az igény saját tervezésű és fejlesztésű rakétahajtóművek iránt is. Az előző projektek során szilárd hajtóanyagú rakétamotorokat használtunk, és az ezekkel szerzett tapasztalatok vezettek a "Project Kratos" koncepciójához, melyben egy saját, szilárd hajtóanyagú rakétamotor megtervezése és fejlesztése volt a cél.

Az egyedi rakétamotor lehetővé teszi számunkra, hogy rugalmasabban és pontosabban szabályozzuk a hajtómű, és ezzel együtt a repülés paramétereit, így a rakéta minden küldetéshez az optimális konfigurációban üzemelhet. Emellett az is előnyt jelent, hogy függetlenek lehetünk az európai piacon monopol helyzetben lévő hajtóműgyártó cégektől, és saját fejlesztéseinkkel képesek vagyunk reagálni a versenycsapat egyedi igényeire és kihívásaira is.

Egy rakétahajtómű összetett rendszer, így jelentős tervezést és megfontolást igényel, valamint több mérnöki tudományterületet is érint. A teljesség igénye nélkül ide sorolható a gépészeti tervezés és gyártás, a hajtóanyag vegyszeti szempontból történő megvizsgálása, a megfelelő gyártástechnológia kidolgozása vagy az elkészült motor bevizsgálása. Mindezekhez természetesen elengedhetetlen a szervezett és biztonságos háttér.

A TDK dolgozatunk célja, hogy részletesen bemutassa a Kratos rakétahajtómű alkatrészeinek és hajtóanyag-pogácsáinak gyártási folyamatát, a közben felmerülő nehézségeket, a szerzett tapasztalatokat és a kutatómunka során kifejlesztett megoldásokat. A Kratos-projekt során elért eredmények hozzájárulhatnak a saját tervezésű rakétahajtóművek fejlesztéséhez és a BME Suborbitals versenycsapat, valamint a magyar űripar további sikereihez.

Abstract

BME Suborbitals is an atmospheric rocket research team that has successfully completed several rocket projects and launches. As the team's experience has grown, the need for propulsion systems of its own design and development has arisen. Previous projects have used solid propellant rocket engines, and the experience gained with these led to the concept of "Project Kratos". The goal of the project was to design and develop a solid propellant rocket engine.

The unique rocket engine design allows us to control the properties and the flight parameters more flexibly and precisely, so the rocket can operate in an optimal configuration for each mission. We also have the advantage of being independent of the engine companies that have a monopoly on the European market. We are able to respond to the specific needs and challenges with our own developments as well.

A rocket engine is a complex system, so it requires considerable planning and involves several engineering disciplines. These include, but are not limited to, mechanical design and manufacture, chemical analysis of the propellant, development of the appropriate production technology and testing of the completed engine. All of this requires an organised and safe background.

The aim of the following study is to describe in detail the manufacturing process of the mechanical components and propellant grains for the Kratos rocket engine, the difficulties encountered, the experience gained and the solutions developed during the research work. The results achieved during the Kratos project can contribute to the development of customised rocket engines and to the further success of the BME Suborbitals team and the Hungarian space industry.

1. Bevezetés

1.1. A téma bemutatása

A rakétafejlesztés közel 100 éves múltra tekint vissza. A XX. században a rakétaipar kizárólagosan állami szektor volt, hadi és demonstrációs célokat szolgált. Ennek oka a rakétafejlesztés és -építés hatalmas költsége volt, melyet csakis a nagyhatalmak tudtak megengedni maguknak. A rakéták bonyolultságával együtt a gyártási költségek szintén emelkedtek, ez a tendencia azonban a XXI. században megfordulni látszik. Ennek több oka is van: egyrészt piaci, ipari szereplők is beszálltak az újabb űrversenybe, másrészt megjelent az újrahasonosítás is a rakétaiparban, így az árak csökkenni kezdtek.

Ezen új behatások révén a rakétafejlesztés és hobbirakétázás szélesebb réteg számára is megnyílt. Több egyetemen is rakétafejlesztő csapatok alapultak, ezzel együtt az ipari és állami szereplők is felismerték az oktatás fontosságát az utánpótlás biztosítása érdekében. A BME Suborbitals rakétafejlesztő versenycsapat is ezen környezetnek hatására került életre hívásra. Célunk, hogy egy olyan szervezetté válhassunk, ahol a tagjaink megismerkedhetnek az űripar alapjaival, gyakorlati tudással bővíthetik egyetemi tanulmányaikat, emellett nemzetközi rakétaversenyeken vehetnek részt, láthatják a munkájuk eredményét megvalósulni, és egy támogató közösség részesei lehetnek. A csapatunk 2021-ben alapult, ezzel Magyarország első és legnagyobb rakétafejlesztéssel foglalkozó hallgatói csapata. Több sikeres rakétafelbocsátáson vagyunk már túl, és nemzetközi szinten is sikeresen szerepeltünk.

A rakéta egyik fontos részegysége a hajtómű. Mivel a rakétahajtómű-gyártók viszonylagos monopol helyzetet élveznek Európában, ezért a legtöbb európai csapat saját motorfejlesztésbe kezdett. A BME Suborbitals céljai közt kezdetektől fogva szerepel a saját igényeit kielégítő hajtómű kifejlesztése, mely cél elérése érdekében már több projektet is alapított. 2021 decembere óta a hajtóműfejlesztés a Project Kratos név alatt fut. A fejlesztés során szem előtt tartottuk a költséghatékonyságot, a fenntarthatóságot és a gyárthatóságot, valamint a szabályos és biztonságos munkafolyamatokat. Mindezek tudatában a szilárd ahjtóanyag mellett döntöttünk.

Az alábbi TDK dolgozatban szeretnénk bemutatni a hajtómű fejlesztésének folyamatát, külön hangsúlyt fektetve a rakétahajtóanyag gyártástechnológiájának folyamatára.

1.2. Biztonsági megfontolások

A teljes tervezés és gyártás során fontos, hogy a lehetőségeinkhez mérten biztonságos és szabályos munkakörülmények közt történjen a fejlesztés. Ezt egyrészt gondos és alapos tervezéssel, számításokkal, a megfelelően nagy hibahatárok betartásával, másrészt szakemberek és szervezetek bevonásával lehet elérni.

Fontos volt az elejétől fogva, hogy a megfelelő szabályoknak [9, 10] eleget téve történjen a tervezés és a tevékenységek végrehajtása. A szabályok és engedélyek kapcsán tanácsokat kértünk a Magyar Honvédségtől, valamint robbantástechnikai ipari képviselőktől. A gyártás és tesztelés mind speciálisan ilyen tevékenységekre előkészített és engedélyezett telephelyen történt. A telephely balesetvédelmi szabályait mindenkinek ismernie kellett, a tevékenységek szakmai felügyelet mellett volt végrehajtható.

A biztonsági intézkedések keretein belül meg kellett ismerkedni a felhasznált alapanyagok úgynevezett MSDS-adatlapjaival (Material Safety Data Sheet, anyagbiztonsági adatlap) [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Itt az adott anyag tulajdonságait, besorolásait és egyéb információit lehet megtalálni. A biztonsági adatlapok mellett ismerni kellett minden munkaállomás baleset- és tűzvédelmi előírásait is.

A tesztek biztonságos lebonyolításához elő lett készítve több menetrendet és ellenőrzőlista is, felkészülve egy esetleges nem várt eseményre is. Ezen ellenőrzőlisták hosszas megfontolások, más csapatokkal és szakemberekkel történt egyeztetések során alakultak ki, valamint a tesztek előtt az egyes forgatókönyvek be lettek gyakorolva. Egy ilyen ellenőrzőlista részlete látható az 1. ábrán is. Az utolsó biztonsági szempont pedig a gondos tervezés volt.

3. Gyújtás előtti biztonsági ellenőrzés és gyújtás, gyújtás utáni biztonsági ellenőrzések

3.1. Első gyújtás

Description: Gyújtás előtti biztonsági áttekintések, szabályozott gyújtási procedúra. Gyújtás utáni biztonsági ellenőrzések.

Team Members: Project Kratos tagjai

Estimated Time: 15 perc

Safe Handling: A hajtómű éles és hamarosan begyújtásra kerül!

Ref. No.	<input checked="" type="checkbox"/>	Task	Signature
0166		Gyújtási kísérlet hangos bejelentése megtörtént	
0167		Meggyőződés a biztonsági zóna teljes kiürítéséről megtörtént	
0168		Fedezék elfoglalva	
0169		Gyújtási kísérlet hangos bejelentése megtörtént #2	
0170		Meggyőződés a biztonsági zóna teljes kiürítéséről megtörtént#2	
0171		A teljes műveleti központ (de legalább három személy) egybehangzóan beleegyezett a gyújtás megkezdéséhez	
0172		Critical: A csapat kész a gyújtási tesztre	

1. ábra. Részlet a statikus hajtóműtesztnél használt ellenőrzőlistából.

1.3. Dolgozat felépítése

A 2. fejezet alatt bemutatásra kerül a rakétahajtómű általános felépítése, a tervezés főbb lépései, az elvégzett szimulációk és vegyeszeti tervezések. A szimulációkról és a tervezésről a projekt egy másik TDK dolgozatban számol be részletesebben. [15]

A 3. fejezetben kerülnek tárgyalásra a hajtóanyaggal kapcsolatos műszaki folyamatok, az alkatrészek és a gyártáshoz szükséges eszközök elkészítése, a felmerült nehézségek és az alkalmazott megoldások, valamint a gyártás eredményei. Összehasonlításra kerül a két letesztelt gyártási eljárás, a műgyanta és a cukor alapú technológia.

Végül a 4. fejezetben részletezésre kerülnek a validáló teszt, mellyel leellenőriztük az egyes alkatrészek, illetve az elkészült motor működését.

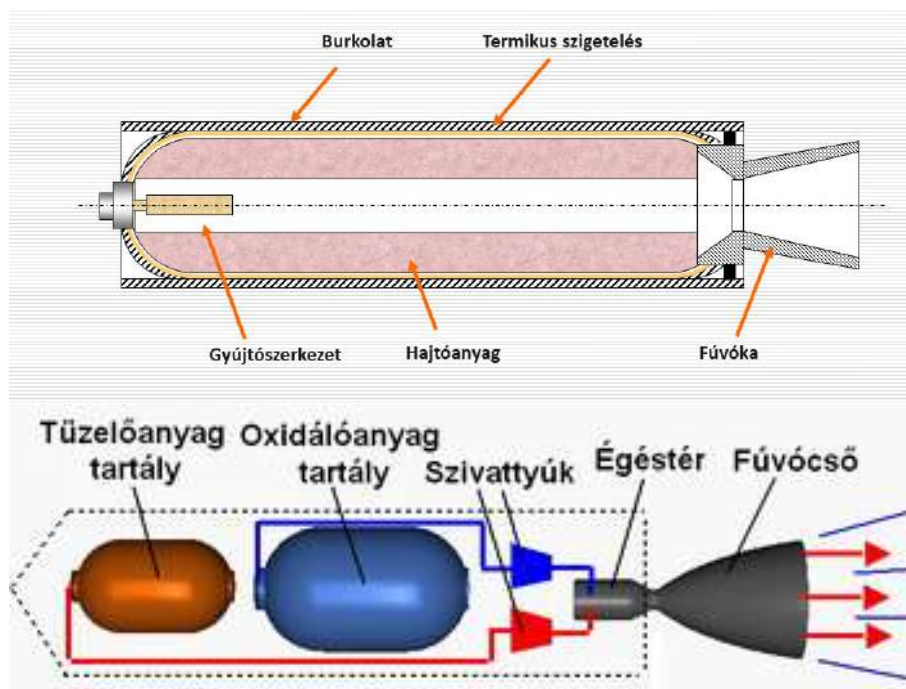
2. Alapok

Az alábbi fejezetben a rakétamotor tervezéséről írunk. Bár a dolgozat fő témája a gyártás köré szerveződik, elhanyagolhatatlan a teljes kép megértéséhez a szimulációs, gépészeti és vegyészeti alapok áttekintése. Ezen felül a piaci alternatívákkal is összehasonlításra kerül a saját fejlesztés.

2.1. Irodalom- és piackutatás

A rakétahajtómű egy olyan speciális hőerőgép, amely nem használ levegőt a működéséhez, azaz a reakciótérben egyesülő két komponenst (az oxidálószeret és az üzemanyagot) kezdetől fogva hordozza magával. Ezen tulajdonsága miatt lehet vele a légkörön kívül is hatékonyan használni. A rakétamotorok általános szerepe a légkörön belüli alkalmazásban, hogy egy fúvókán kiáramló gáz segítségével a magasba emeljenek egy tömeget. [8]

Az üzemanyag típusa szerint kettő csoportra oszthatjuk a motorokat: szilárdra és folyékony komponensűekre. A szilárd hajtóanyagú rendszerekben a hajtóanyag az oxidálószerrel keverve szilárd halmazállapotban van jelen, míg folyékony esetben az oxidálószer és az üzemanyag folyadékként, általában külön tartályokban található. (lásd.: 2. ábra) Ezen két modell vegyesen is használható, ekkor az egyik komponens foladékként, a másik szilárd anyagként van jelen a motorban. Az ilyen rendszereket hibrid rakétahajtóműnek nevezik. [8, 12]



2. ábra. A szilárd (fent) és a folyékony rakétahajtómű modellje.

Az oxidálószer szolgáltatja az oxigént a reakció számára, az égéstérben kerül elégetésre a hajtóanyag. Ez a folyamat nagy hő és gáztermeléssel jár, a keletkezett gázok a fúvókán keresztül

távoznak. A kiáramló gázok Newton III. törvénye (1. képlet) alapján erőt fejt ki a rakétára, ezt nevezzük tolóerőnek. A rakétamotor teljes működése során leadott tolóereje alapján több osztályba lehet sorolni. A rakéta működése során nem elhanyagolható a mozgó tömeg megváltozása sem, így Newton III. törvényét nem lehet leegyszerűsíteni.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} + \frac{\Delta m}{\Delta t} + v \quad (1)$$

A hajtómű másik fontos szempontja, hogy mekkora sebességre tudja felgyorsítani azt általa mozgatott tömeget. A rakéta végsebességének és a hajtóműből kiáramló gáz közti összefüggést K. E. Ciolkovszkij írta le először, és az ő tiszteletére ezt mai napig Ciolkovszkij-egyenletnek (2. képlet) hívjuk. A képletben $v(t)$ a t időpillanatban vett sebessége a rakétának, a v_g a kiáramló gáz sebessége a rakétához viszonyítva, a m_0 a kezdeti tömege a rakétának, a $m(t)$ pedig a t időpillanatban vett tömege a rakétának.

$$v(t) = v_g \cdot \ln \left(\frac{m_0}{m(t)} \right) \quad (2)$$

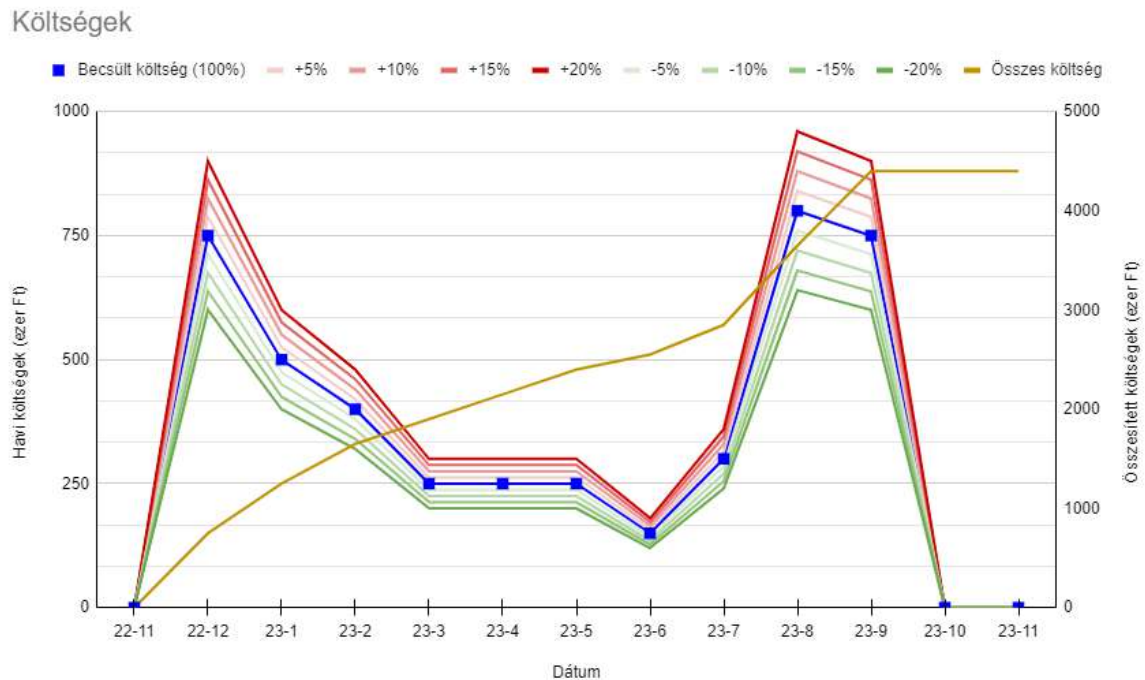
A szilárd hajtóművek kisebb teljesítményre képesek, mint folyékony társaik, valamint a tolóerő nem szabályozható, azonban a tervezésük és kivitelezésük egyszerűbb, a kész hajtómű tárolása is sokkal könnyebb, illetve a korlátozott lehetőségei ellenére a csapat igényeit végletekig kielégíti. Mindezen tények miatt döntöttünk a szilárd hajtómű fejlesztése mellett.

A szilárd rakétamotor fő elemei közé tartozik a motor háza vagy burkolata (casing), a fűvőka (nozle) és a gyújtószerkezet (igniter). A motor házában található hajtóanyag (propellant), amely begyújtás után nagy mennyiségű gázt termel, így a háznak fontos nyomástartó szerepe is van. A szilárd hajtóanyagban összekeverve megtalálható az oxidálószer és az üzemanyag is. A hajtóanyag-pogácsák (grain) motorba töltésével az égéshez szükséges minden összetevő a hajtóműbe kerül. Ez után az indításhoz már csak a gyújtás szükséges. Az eddigi tesztek során elektromos izzógyújtóval (E-match) történt az indítás. Ezek áram hatására felmelegednek és elégnek, így begyújtva az oxidációs reakciót. [1]

Van lehetőség szilárd hajtóanyaggal működő rakétamotorok vásárlására is, azonban ezek csak kevés gyártótól és forgalmazótól érhetőek el Európában. Tapasztalataink szerint ezen motorok teljesítménye és paraméterei rendkívül ingadozóak, akár 20%-os teljesítménykülönbség is tapasztalható ugyanazon típuson belül. Ezeket a motorokat az Egyesült Államokban gyártják és szállítják Európába. Többek között ennek is tudható be, hogy az áruk nem túl kedvezők. Ez a piaci helyzet is hozzájárult ahhoz, hogy saját hajtómű fejlesztése mellett döntöttünk. Egy saját gyártású hajtómű alacsonyabb költségekkel állítható elő, mely akár 50 – 60%-kal olcsóbb is lehet a referenciának tekinthető Cezaroni motorokkal szemben. [14] Azonban fontos megje-

gyezni, hogy a fejlesztés jelentős többletköltséget jelent, azonban hosszú távon szakmailag és anyagilag is megtérül. A fejlesztési költségek időbeni eloszlását ábrázolja a 3. ábra.

A tervezés és fejlesztés során nagy segítséget nyújtott többek között a Rocket Propulsion Elements [13], valamint Richard Nakka weboldala is. [11]



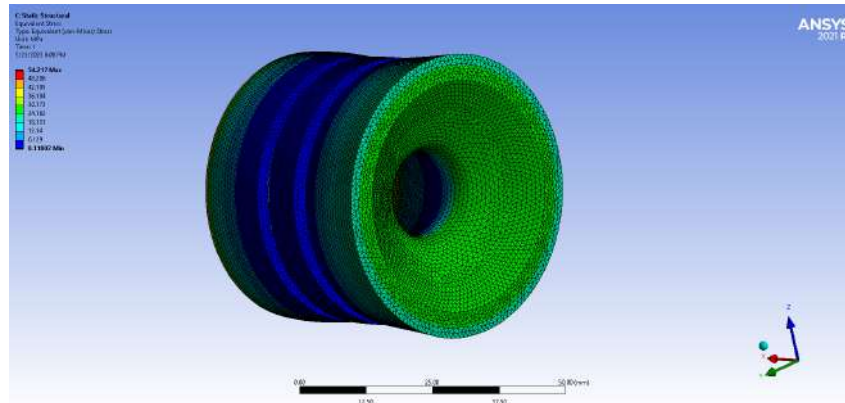
3. ábra. A Project Kratos költségvetési tervezetének időbeli lefolyása nominális (kék) és pár százalékos eltérések (zöld és piros) esetén, valamint a teljes kumulált költségek.

2.2. Szimulációk

A rakétahajtóművek tervezése azért nehéz feladat, mert rengeteg, külön-külön változó tulajdonságuk van, ami befolyással van a működésükre, és ezeket a változókat előre definiálni kell, vagy ki kell számolni. Bár létezik egy optimum, mely esetében az adott rakétamotor a lehető legkevesebb erőforrás felhasználásával teljesíti a számára kitűzött célt, azonban az űriparban ez a cél nagyon sokféle lehet. Ezért fontos, hogy rendelkezünk megfelelő szimulációs képességekkel, melyek segítségével kicsit közelebb tudunk jutni az adott célt szolgáló optimumhoz.

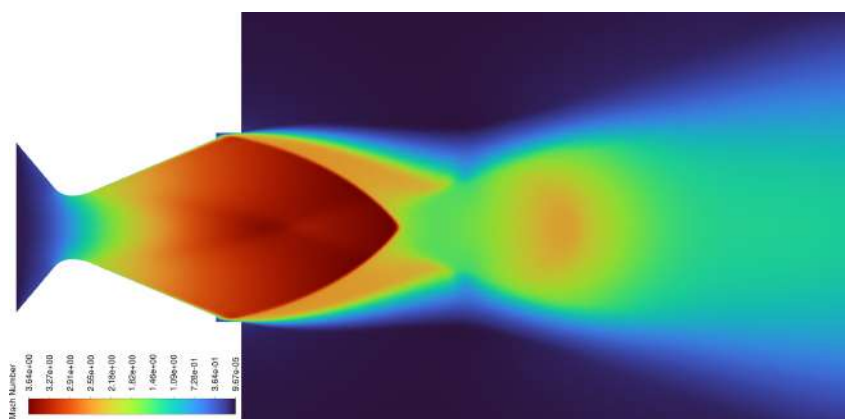
A hajtóműfejlesztő projekt ezen problémakörre is kitért, ennek eredményei részletesebben a *Szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű fejlesztés modern szimulációs és mérési módszerekkel* című 2023-as TDK dolgozatban [15] kerül összefoglalásra. Ebben az alfejezetben egy rövid, a megértést segítő kivonat található.

Ahhoz, hogy rendesen megértsük egy olyan bonyolult és összetett szerkezet, mint a rakétahajtómű működését, és továbbá, hogy szimulálhat legyen a különböző folyamatai, először meg kellett ismerni a különböző aleggységeinek a működését és el kell sajátítani a hozzájuk tartozó elméleti tudást. Ez azért is érdekes és bonyolult feladatnak, mert ez a terület egy erősen multi-diszciplináris tudományág. Megtalálható benne ugyanúgy a vegyészet és az elektronika, mint a termodinamika, szuperszonikus gázdinamika vagy az anyagtechnológia.



4. ábra. Példa a szimulációkhoz: a fűvóka végeelem módszerrel történő feszültség-szimulációja ANSYS környezetben.

A fejlesztés során több mechanikai és áramlási szimulációt is végeztünk, mint például a 4. ábrán látható végelem szimuláció, vagy a 5 ábrán látható nyomásszimuláció. A analitikus tervezés eredményeit az általunk készített MATLAB és ANSYS szimulációk segítségével validáltuk, továbbá a reakciókinetikai becslésekhez a PROPeP3 szoftvert alkalmaztuk. Fontos szempont volt a fejlesztés során, hogy a megvalósított és bemért hajtóművet vessük össze a szimuláció által prediktálttal.



5. ábra. Példa a szimulációkhoz: dinamikus nyomáseloszlás a fűvókában és a fűvóka utáni térrészben.

2.3. Vegyészeti tervezés

Versenyrakéták hajtóanyagaként leggyakrabban szilárd hajtóanyagot alkalmaznak, amelynek az alapja hogy az üzemanyag, az oxidálószer és az adalékok szilárd formában vannak összekeverve és valamilyen kötőanyag (binder) segítségével vannak egyben tartva. Az alkotórészekről bővebben a 1. táblázatban lehet olvasni, ami bemutatja a legelterjedtebb komponenseket. A saját hajtóanyagunk tervezése során figyelembe lett véve, hogy mely anyagok rendelkeznek a legoptimálisabb tulajdonságokkal fizikai, kémiai és elérhetőségi szempontból. Emiatt először egy KNO₃-Szorbitol-Alumínium-Poliészter összetételű hajtóanyag megvalósítása lett célul tűzve.

Üzemanyag	Cukrok Cukoralkoholok Poliészter gyanta Poliuretán gyanta
Oxidálószer	Kálium-nitrát Kálium-klorát Ammónium-nitrát Ammónium-klorát
Adalékok	Alumínium (égéshő emelése) Nátrium-dodecil-szulfát (granulálhatóság)
Kötőanyag	Cukorszirup (50 n/n%-os) Poliészter gyanta Poliuretán gyanta

1. táblázat. Irodalomban leggyakrabban alkalmazott szilárd hajtóanyag-komponensek

A kálium-nitrátot azért lett kiválasztva, mivel magas oxigéntartalma mellett egyszerűen beszerezhető és nem kíván különleges tárolási körülményeket. A szorbitolt oxidációja során nagymennyiségű hő és gáz kelezkezik, valamint a beszerezhetőség egyszerűsége és alacsony ára mind kedvező paraméter, így üzemanyagnak ez lett alkalmazva. Adalékok közül alumíniumot került felhasználásra, mivel ezzel emelhető az égéshő, így növelve a hajtómű teljesítményét. Binderként pedig poliészter gyanta lett kiválasztva, mivel ezzel már volt a versenycsapatnak korábbi tapasztalata.

3. Gyártástechnológia

Az alábbi fejezetben a gyártástechnológiával kapcsolatos problémák és megoldások kerülnek bemutatásra. A 3.1. alfejezetben a motor alkatrészei és szerszámai vannak részletezve, míg a 3.2. alfejezetben a hajtóanyag-pogácsák gyártása kerül tárgyalásra.

3.1. Alkatrészek és szerszámok gyártástechnológiája

3.1.1. Alkatrészek

A saját tervezésű hajtómű négy fő alkatrészből áll (6. ábra). Ezek pedig az égéskamra, az égéskamra burkolata, a fúvóka és annak rögzítőgyűrűje. Megjegyzendő, hogy a tervezésre került motor jelen összeállításában nem repüléshez, hanem statikus hajtóműteszthez és a gyártási technológia kifejlesztéséhez készült. Az alkatrészek tervezése után anyagot kellett választani az alkatrészeknek. Itt szilárdságtani számítások és szimulációk után a C45-ös szilárdságú acélra esett választás.



6. ábra. A rakétamotor alkatrészei. Fentről lefelé: az égéskamra, a fúvóka, a nyomás-méréshez szükséges adapter és a fúvóka rögzítőgyűrűje

A rakétamotorunk összes alkatrésze egyedi tervezésű, ezért az alkatrészek gyártását vagy gyártatását is magunknak kellett megoldani. Az alkatrészek többsége hengerszimmetrikus, így esztergával könnyen gyárthatóak voltak (lásd.: 7. ábra).



7. ábra. Az égéskamra burkolata esztergálás közben.



8. ábra. A hajtómű 3d-s CAD modellje. Bal oldalon egy erőátvitelre szolgáló speciális alkatrész található, mellyel tolóerőmérést és nyomásmérést is egyszerre meg lehet valósítani.

Az égéskamra egy varratmentes csőből készült mivel kardinális volt, hogy kellően nagy szilárdságú anyagból készüljön és ne legyenek rajta a szilárdságot negatívan befolyásoló képződmények. Az égéskamra zárófedele is C45-ös köracélból készült a többi alkatrészhez hasonlóan. Fontosabb tervezési részletek közé tartozik továbbá az O-gyűrűs tömítésnek kialakított peremek méretezése és egy nyomásmérő adapter számára kialakított G1/4-es menet, hogy a nyomásmérő könnyen csatlakoztatható legyen. Abban az esetben, ha nem lenne rá szükség, egy vakdugóval lezárható az égéstér. A fűvókán is hasonló peremek kerültek kialakításra a tömítőgyűrűk számára (6. és 8. ábra).

A hajtóművek kulcsfontosságú alkatrészei közé tartozik a hajtómű belső borítása (thermal liner), amely számos kritikus feladatot lát el, beleértve a hővédelmet és az égéstermékek kezelését. Az ilyen anyagoknak rendkívül ellenállónak kell lenniük a magas hőmérséklettel szemben. Ezért esett a választás a kevlar erősítésű kompozitra.

Először egy lemezt lett legyártva a kevlar kompozitból, mivel az anyag teszteléséhez szükséges volt rá, és közben megismerhettük az anyag tulajdonságait. Az alkatrészeket öt rétegben kézi laminálással készülték. A cső laminálásához először egy megfelelő méretű alumínium cső lett előkészítve, bevonva sütőpapírral és két réteg PET fóliával. A második réteg lazábban került feltekerésre, így könnyebben le lehetett húzni a kész eszközt a formáról. Ezt követően megtörtént a próbaminálás.

A cső laminálása hasonlóan történik a lemez lamináláshoz. Az egyetlen különbség a hogy a csövet forgatni kell és a gyantával átítaltás közben kell feltekerni a szövetet. A munka eredménye a 9. ábrán látható.



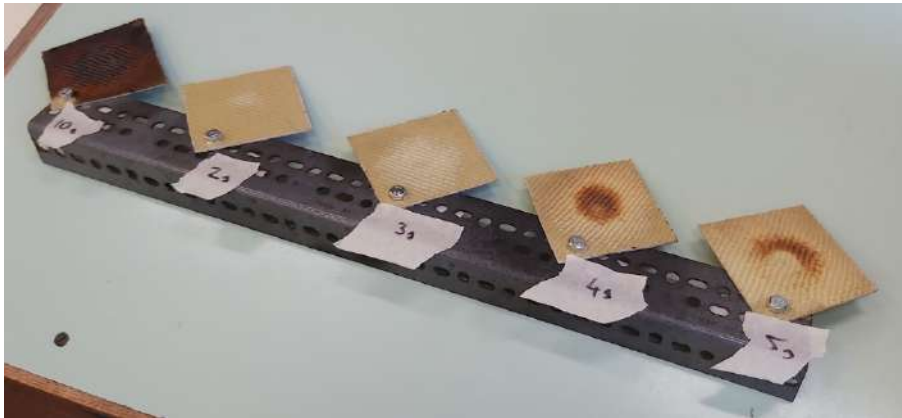
9. ábra. A hajtómű belső borítása gyártás közben.

Az alkatrészek a céljainknak megfelelő minőségben készültek el. A 10x10 cm-es lemezek alkalmasak voltak a tesztelésre, azonban a cső mérete túl vastagnak bizonyult. Így az alumínium cső átmérőjének csökkentése mellett a rétegek számát is csökkentettük 5 helyett 3-ra.

Fontos volt meggyőződünk a feltevéseink valóságtartalmáról, ezért az elkészült minták tesztelésre is kerültek. Mivel a motor belső borításának elsődleges célja a termikus hatások elnyelése, ezért égetési teszteknek lett alávetve. A kevlar tesztmintákat megfelelő méretre vágtuk, a méretre vágott mintákat biztonságosan rögzítettük. Összesen öt mintát használtunk, és különböző hosszúságú égetéseket végeztünk rajtuk: 2, 3, 4, 5 és 10 másodpercig. A tesztek eredményét a 10. ábrán lehet látni.

A teszt a következő módon került végrehajtásra: a gázlángot begyűjtve a lángot megfelelő ideig tartottuk a kevlar mintához. A Kratos hajtóművek által előírt időnél (3-5 másodperc) hosszabb égetéseket is elvégeztünk, hogy megvizsgáljuk a kompozit anyag viselkedését hosszabb expozíció során is. A 2 és 3 másodperces tesztek során nem tapasztaltunk szenesedést, csak a gyanta kis mennyiségű kiszivárgását, ami fehéredéshez vezetett a láng érintett felületén. A minta hátoldalán semmilyen nyoma nem volt a tesztnek. A 4 másodperces tesztnél már láthatóak voltak égési nyomok, és a minta hátoldalán gyantakiszivárgás volt megfigyelhető. Az eredmények azt mutatják, hogy 4 másodpercnél hosszabb expozíció esetén sem keletkezne végzetes kár a liner-ként használt kompozit anyagon. Az 5 másodperces teszt hibásnak bizonyult, mivel rossz lángpozíció miatt nem adott releváns adatokat. A 10 másodperces teszt során már észrevehető elszenesedés volt tapasztalható a kevláron, de a minta hátoldalán kis barnulás kivételével komolyabb sérülés nem mutatkozott. Ez azt bizonyította, hogy a kevlar erősítésű epoxigyanta akár 10 másodpercig is képes ellátni a termikus szigetelési feladatát. Az elvégzett égetési tesztek

alapján megállapítható, hogy a kevlar erősítésű epoxigyanta meglepően jó ellenállást mutatott a magas hőmérsékletnek. Ez alapján kijelenthető, hogy a kevlar kompozit alkalmas a hajtómű borításának.



10. ábra. A hajtómű belső borításánk mintadarabjai égetési tesztek után. Balról jobbra: 10, 2, 3, 4 és 5 másodperces égetési tesztek

3.1.2. Szerszámok

A gyártási folyamathoz szükség volt pár szerszám legyártásához. Ezek a hajtóanyag és az alkatrészek gyártási folyamatait segítették.

A hajtóanyag-pogácsák gyártásának egyik eszköze az öntőforma volt. Ebbe kerül beleöntésre a még folyékony állagú hajtóanyag, és benne szilárdul meg. Ez a szerszám két fő részből áll. Az alsó része egy talp, amelyből kiáll egy kúpos túske (11. ábra), mely elősegíti a hajtóműtöltet belső geometriájának kialakítását. A belső geometria az égési sebesség alakulásában játszik szerepet, ezáltal közvetetten a tolóerő időbeni eloszlását is befolyásolja. A legegyszerűbb kialakítás a sima, hengeres megoldás. Annak, hogy a saját hajtóművünkben hengeres alkatrész helyett enyhén kúposat alkalmaztunk, két oka is van: egyrészt a kúpus lerendezés időbeni eloszlása valamivel kiegyensúlyozottabb, mint a hengeres társáé, másrészt a megszilárdult pogácsa is könnyebben leszedhető az öntőmintáról. Fontos megjegyezni, hogy a kúp csak pár fokkal térhet el a hengertől, hogy ne menjen a hajtómű karakterisztikájának kárára. Az alsó része a szerszámnak alumíniumból készült, mivel az széles méretválasztékban könnyen beszerezhető, és könnyen megmunkálható. Ezeket az alaktrészeket esztergán készítettük el.

Az öntőforma másik része pedig egy kevlar kompozit cső volt, ami a külső geometriát adta meg, ez a hajtómű belső borítása is. Ennek gyártásáról és teszteléséről fentebb részletesen írtunk.



11. ábra. A hajtóanyag-pogácsák gyártását elősegítő kúpos szerszám.

3.2. Hajtóanyag gyártástechnológiája

Az alábbi fejezetben a hajtóanyag-pogácsák gyártástechnológiája kerül bemutatásra. Alapvetően két megoldást próbáltunk ki: az egyik egy műgyanta alapú, a másik cukor alapú technológia volt. A fejezetben mindkét gyártástechnológia bemutatásra, a végén pedig az eredmények fényében összehasonlításra kerülnek.

Bármilyen technológiát is alkalmazunk egy szilárd hajtóanyagú rakétamotorhoz, kulcsfontosságú a szilárd komponensek megfelelő szemcseméretű porrá őrlése. A komponensek szemcsemérete az égési reakció hatásfokát befolyásolja. A finomabb szemcseméret hatékonyabb égést eredményez. Az alapanyagok egy része teljesítette már az általunk előírt 100 mikronos határt, a többi egy elektromos kávédaráló segítségével megőröltük. A leőrölt komponenseket egy szitatorony segítségével szűrésre, majd mikroszkópos vizsgálat alapján validálásra kerültek. Ezen folyamatok láthatóak a 12. ábrán. Az őrlés időtartama és minősége erősen anyagfüggő volt: a kálium-nitrát esetében 50 g anyag 1 percen keresztül történő őrlése után az őrölt mennyiség fele fent maradt a szitán, azaz az egy perces őrlés körülbelül 50 %-os hatásfokú volt. A szorbitol esetében ez a hatásfok 70 % volt. Megjegyzendő, hogy a szorbitol páraelnyelő képessége kimondottan magas, így a légmenetsen zárt tárolása indokolt, különben a szemcsefinomítási eljárás feleslegessé válhat.



12. ábra. Az alapanyagok őrlési munkafolyamata (balra) és a leszitált por szemcseméretének ellenőrzése mikroszkóp segítségével.

A következőekben a műgyanta és a cukor alapú technológia kerül bemutatásra. Mindkét esetben hasonló lépésekkel történt a gyártás és a fejlesztés. Kezdeti lépésként a gyártástechnológia megismerése végett kis méretű próbatestek készültek. Ezeken a különféle vizsgálatok kerültek végrehajtásra második lépésként, melyekből következtetni lehetett a gyártástechnológia és az ötlet minőségére. Szükség esetén ez a két lépéses iteráció többször is elvégezhető. A gyártástechnológia tökéletesítése után pedig sor került a teljes hajtóanyag-pogácsa gyártására.

3.2.1. Gyanta alapú technológia

A gyanta alapú szilárd rakétahajtóanyagok olyan anyagok keveréke, amikből égés után sok gáz szabadul fel, valamint az oxidálószer és az üzemanyaga mellett kötőanyagként valamilyen gyan-tát is tartalmaz. A gyanta egyes esetekben akár az üzemanyag szerepét is betöltheti. Ezen kívül fontos szerepet játszanak az adalékok is, amelyek többek között növelehtik az égéshőt, vagy segíthetik az öntési folyamatot. Ez a mi esetünkben alumíniumpor volt az égéshő növelésének érdekében.

Az irodalomkutatás alapján a kálium-nitrát oxidálószer mellett döntöttünk, a hajtóanyagok közül a szorbitolra esett a választás. A kötőanyagnak a poliészter gyanta tűnt ideálisnak, ezen belül is olyan fajta, amely nem tartalmaz iniciátort, mivel gyorsító utólagos hozzáadásával könnyebben befolyásolható a polimerizációs idő.

A gyártási eljárás során több összetételi arány is kipróbálásra került. Elsődleges szempont a hajtóanyag összetételével kapcsolatban a hajtómű céljainak minél jobban történő megfelelés volt, azonban a gyárthatósági szempontok figyelembevételével elég hamar kialakult a használható arány: $\frac{1}{3}$ rész műgyanta és $\frac{2}{3}$ rész szárazanyag összetétellel lehetett elérni a legnagyobb szárazanyag részarányú, de még önthető elegyet. Minthogy a műgyanta nem generál releváns tolóerőt, az összetétel optimalizálása során törekedni kell a műgyanta arányának csökkentésre.

Az egyes komponensek arányához ugyan az alapanyagok leírásai támpontot adtak, de a jelen felhasználás némileg különbözik a gyártó ajánlásaitól, ezért kísérletekre volt szükség. Az oxidá-

lószer és cukor gyantába keverése megváltoztathatja a viszkozitást, és a feldolgozhatóságot negatív irányba befolyásolhatja. Ennek ellensúlyozására viszkozitáscsökkentő adalék hozzáadása ajánlott lehet. Ezen tulajdonságok vizsgálása végett sima, gyantás próbatesteket is gyártottunk, ami a 13. ábrán láthatóak.



13. ábra. A műgyanta öntését (inert anyagokkal) a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában gyakoroltuk be. Az első öntések eredményei láthatóak az ábrán.

A tesztgyártások alatt kiderült, hogy külön érdemes a folyékony és szilárd komponenseket összekeverni. Ezzel a módszerrel lehetséges tizedgramm pontossággal kimérni az összetevőket. A folyékony komponensek a legpontosabb eredmény érdekében fecskendővel mérendőek. Három szempontnak kell eleget tennie a keveréknek: az első, hogy elég kicsi legyen a gyantakeveréknek a viszkozitása a könnyű önthetőség érdekében, a második szempont, hogy ne maradjon túl sokáig kis viszkozitású, mivel akkor a szilárd részecskék leülepedhetnek, a harmadik pedig, hogy ne kezdődjön el a térhálósodás túl hamar, mivel akkor a keveréskor belekerült buborékok nem tudnak időben távozni. A tesztgyártások eredményeit a 14. ábrán lehet látni.

Az alapanyagokat és gyártási technológiák ellenőrzésre kerültek tesztek formájában. A tesztek során megvizsgálásra kerültek a komponensek megfelelő elkeveredése és eloszlása, illetve az elkészült próbatestek mechanika strapabírósága, valamint a légbuborékmentessége is.

A keveréket érdemes egy vákuumkamrába helyezni. Erre azért van szükség mert csak ilyen módon lehetséges a levegőbuborékok eltávolítása. Ilyenkor az ideális munkafolyamatok a következők:

- Vákuumozás előkészítése
- A komponens hozzáadása
- Szilárd, por állagú anyagok hozzáadása
- Viskozitáscsökkentő adalék hozzáadása
- B komponens hozzáadása
- Gyorsító hozzáadása
- Gyors vákuumozás

Ezzel a sorrendel lehet a legtöbb időt nyerni a térhálósodás elkezdődése előtt a vákuumozáshoz és a buborékok eltávolításához. Sajnos a saját munkafolyamataink során vákuumkamra nem állt a rendelkezésünkre.

A gyanták térhálósodása közben hő szabadul fel, nagyobb mennyiség esetben, ha oxidálószer is kerül a keverékbe rendkívül fontos a hőmérséklet kordában tartása.



14. ábra. A gyanta alapú hajtóanyag-próbatetek. Balra az öntés utáni állapotban, jobbra pedig a már megszilárdult próbatetek láthatóak.

3.2.2. Cukor alapú technológia

A cukor alapú hajtóanyagok kiindulóelegye az úgynevezett "Rocket-Candy" összetétel. Ez az anyag nem más, mint cukor és kálium-nitrát összeolvasztott keveréke. Fontos különbség a műgyantás megoldáshoz képest, hogy itt a kötőanyag szerepét az üzemanyag, azaz a cukor tölti be. Ezzel együtt a gyártási hőmérséklet is eltér: míg a műgyanta szobahőmérsékleten önthető, és a térhálósodása során sem lépi át az 50 - 70 °C-os hőmérsékletet, addig a cukros esetben meg kell olvasztani az üzemanyagot, ez pedig valamivel magasabb hőmérsékletet (szorbitol esetén legalább 95 °C-os hőmérsékletet) kíván meg.

A Rocket-Candy egy egyszerű hajtóanyag, ami rendkívül népszerűvé teszi a szilárd hajtóanyagú rakéták körében. Ebből a hajtóanyagból indultunk ki mi is, egy pár változtatást eszközölve, a nagyobb hatásfok reményében. A sima kristálycukor helyett szorbitol került felhasználásra, mivel megolvasztva jobb viszkozitási tulajdonságokkal rendelkezik. Emellett adalékanyagként újfent alumíniumpor került az összetételhez hozzáadásra, mivel ezzel emelni lehet a hajtómű égéshőjét.

A gyártás során oxidálószer hevítésére van szükség, ezért különös óvatossággal kell eljárni. A folyamat a cukor megolvasztásával kezdődik. Erre a rendelkezésre álló eszközök közül legmegfelelőbb egy elektromos főzőlap és egy lábos volt. Gázfűző és nyílt láng használatát érdemes kerülni a folyamat tűzveszélyessége miatt. Amikor a cukor megolvad, hozzáadható az oxidálószer, jelen esetben kálium-nitrát. A cukor olvadása után nagy figyelmet kell fordítani a keverésre, hiszen a cukor könnyen karamellizálódhat, vagy megéghet. Ez kerülendő, hiszen ekkor a cukor oxidációja megindul, így csökken az üzemanyag energiatartalma. Az elegyedés után hozzáadhatóak az adalékok, az első hajtóanyagcsártás során kizárólag alumíniumpor került a keverékbe.

Az elkészült keveréket hamar az öntőformákba kell önteni, mivel ha a cukor kihülésével a keverék megszilárdul, és az öntés lehetetlenné válik. Ennek a gyártási folyamatnak a nehézsége hogy sűrűnfolyós, forró folyadékot kell önteni. Az öntőformákba való öntés után, a lehető legjobban el kell távolítani a keverékben maradt légbuborékokat. Ezt akár vákuum kamrában is lehetne végezni, de mivel nem okozott túl nagy problémát a buborékosodás, felesleges lépés lenne. Az öntőformák megtöltése után maradt mennyiség kiönthető egy lemezre, és szilárdulás után olvasztható egy újabb adagba, ami szintén a cukros módszer egyik előnye. Mindazonáltal megjegyezendő, hogy a túlzott újramelegítés során a cukor oxidációja (karamellizálódása) egyre jelentősebbé válik, tehát a maradékanyag újrahasznosítása csak limitált alkalommal történhet meg. A technológia kidolgozása során szintén próbatestek gyártásával kezdtük, egy ilyen próbálkozás látható a 15. ábrán. A végső összetétel, ami mellett a legjobb gyárthatósági paramétereket értük el, 55 m/m% kálium-nitrátot, 40 m/m% szorbitolt és 5 m/m% alumíniumot tartalmazott.

A hűlési idő után nem okozott gondot a szerszámbontás. Az öntőforma tuskójének kúpos kialakításának köszönhetően könnyedén elvált a hajtóanyag a szerszámtól. A kúpos kialakítás azért hasznos a hengeressel szemben, mivel a szerszám kihúzásakor nem nyírófeszültségek keletkeznek egy hatalmas palástfelületen, hanem normálfeszültség, amely segít elválasztani a két felületet egymástól.



15. ábra. A cukros technológia kikísérletezése során szintén kerültek próbatestek legyártásra.

3.2.3. Technológiák összehasonlítása, tapasztalatok

A gyanta alapú technológia előnye az alacsonyabb hőmérséklet és a könnyebb gyárthatóság, azonban a megmaradó, de már bekevert hajtóanyag nem használható újra. A cukros technológia ezzel szemben nagyobb odafigyelést igényel, viszont kevesebb komponenst igényel.

Elsőnek a próbatesteket mechanikai vizsgálatnak vetettük alá. Kettéfűrészeltük őket, valamint megnéztük a buborékosságukat. A cukros próbatestek jobban teljesítettek: a gyantás társaik már a mintából kivéve lekezdték töredezni és repedezni. Ez azért probléma, mert így az új utat ad az égésnek, így a reakció lefolyása eltérhet a tervezettől. Emellett a gyantás technológia során a szárazanyag jobban leülepedett (16. ábra).

A gyanta alapú keverékek égetési tesztjei nem a váralozásokank megfelelően sikerültek. Nem gyulladt be egyik tesztkeverék sem. Akár több minden is okozhatta a teszt sikertelenségét, ezért megpróbáltunk lehetőleg minden lehetséges okot megvizsgálni. A teszt során többféle gyújtószerkezettel is (elektromos izzógyújtó, vihargyufa) próbálkoztunk, a gyulladáshoz szükséges hőmennyiséget biztosan megkapta a minta. Okozhatott problémát a vegyszerek nem megfelelő tisztasága, azonban rendelkezésünkre álló módszerek segítségével meggyőződünk róla, hogy nem ez okozta a problémát. A vegytiszta minták (oxidálószer + üzemanyag) begyulladt.



16. ábra. A cukros technológiával készült próbatest. A képen láthatóak apró kis buborékok az anyagban. A felszínen megjelenő fehér foltok a hajtómű anyagának kikristályosodása, ez a mintán több hónapos állás után jelent meg.

Az többszörös öntési kísérletek után számos próbatest állt rendelkezésünkre. Ezek a hajtóanyag összetétel alapján voltak csoportosítva. Mindegyik összetételből több próbatest is készült, így csökkenthető az egyetlen hibásan készült próbatest előfordulásának esélye. A tesztelést biz-

tonsági eligazítással és a terep felméréseivel kezdtük. A tesztelés helyszínét a CerTrust Kft. biztosította. Ezt a tesztelési összeállítást követte. Az összeállítás tartalmazta a hajtóanyagmintát, az ennek begyűjtésére szolgáló elektromos izzógyűjtőt. A távolról vezérelhetőséget továbbá robbantózsín és egy robbantógép biztosította. A gyutacsot a robbantózsín segítségével összeköttöttük a robbantógéppel. A készülék kondenzátorának feltöltése után begyűjthető volt a gyutacs. Az egész folyamat alatt felügyelt és segítségünkre volt egy robbantási szakember.

A begyűjtés megörtént azonban nem a várt eredményeket kaptuk. Az első összetétellel nem gyulladt be a mintadarab. A gyűjtési hőmérséklet növelésével próbáltuk (pirotechnikai segédanyagokat helyeztünk a gyutacs köré) begyulladásra bírni az anyagot. A gyűjtés láthatóan hevesebben, magasabb hőmérsékleten történt, de így se gyulladt be a minta. Ezt megismételtük a többi meglévő hajtóanyaggal is, de az eredmény hasonló volt az összes esetben. Minthogy a műgyanta nélküli minta begyulladt, de a műgyantával készütek nem, megállapítható, hogy a műgyanta hibás választásnak bizonyult.

A cukros hatóanyagmintáknak a gyűjtési tesztjei ugyanúgy zajlottak, mint a gyantás tesztje azal a különbséggel, hogy itt be is gyulladt a minta (17. ábra), és a várakozásoknak megfelelő tulajdonságokat hozta. Így hát a teszt alapján egy statikus teszthez is az a technológia került alkalmazásra.



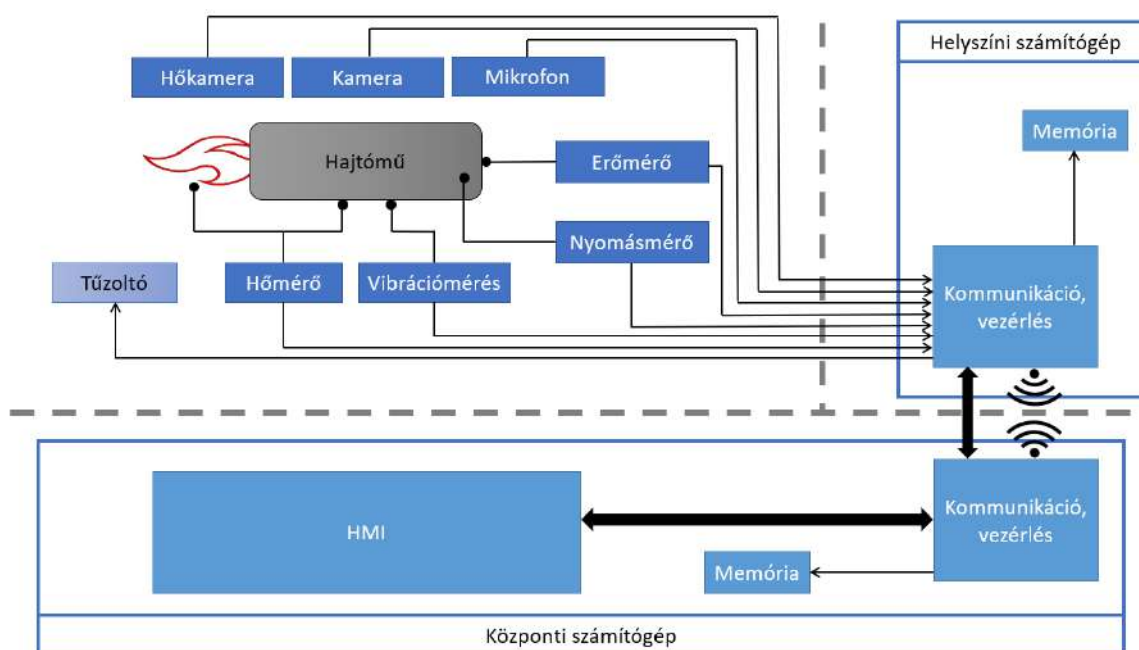
17. ábra. A begyulladt, cukros technológiával készült mintadarab.

4. Statikus hajtóműteszt

Az elkészült hajtóműveket az osztályozásához és validálásához az úgynevezett statikus hajtóműtesztnek (SFT, static fire teszt) szokták alávetni. Ennek lényege, hogy az elkészült hajtóanyagpogácsák a motorba beletéve, a teljes hajtómű összeszerelve befogásra kerül egy mérőállványba, majd a begyújtás során mérjük a paramétereit. Itt egy földi, de teljes értékű működést lehet megvizsgálni. Ehhez általában (ahogy a mi esetünkben is) röpképtelen kialakítást szoktak alkalmazni. Ez súlyában és kialakításában tér csak el a röpképes kialakítástól azért, hogy az állványhoz és a mérőműszerekhez csatlakozni tudjon. Az alábbi fejezetben ezen tesztet szeretnénk bemutatni.

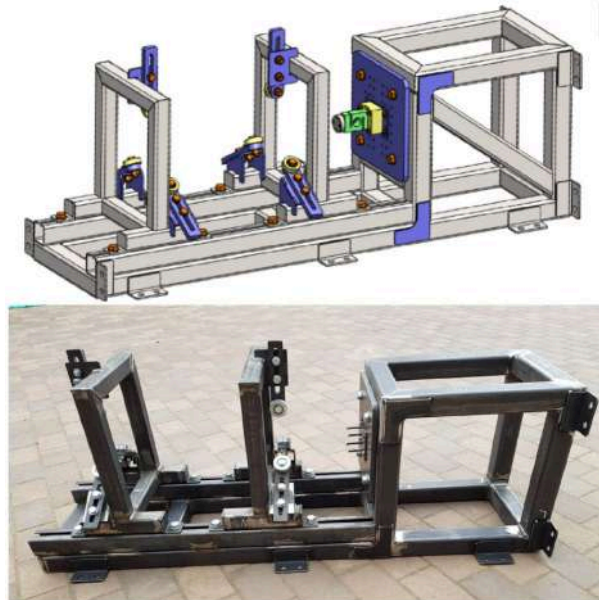
4.1. Mérőelektronika

Az SFT során több mérést is be volt tervezve. A mérés vázlatát a 18. ábrán látható. A legfontosabb paraméter, amit feltétlenül szükséges mérni, a hajtómű tolóereje. Ehhez egy S alakú erőmérő cella került alkalmazásra. Mellette a belső nyomásviszonyok mérése is tervben volt, azonban a nyomá szenzort nem sikerült feléleszteni a teszt időpontjáig, így ez az első SFT-ből kimaradt. A belső hőmérsékletviszonyok is fontos információval bírnak, mérések értékes lehet, mindazonáltal a szimulált belső hőmérsékletviszonyok magas (akár 1300 °C) értéket prediktáltak, így a mérése nehéz. Ehhez egy speciális, K-típusú hőelemet került felhasználásra. A mérési elrendezés kialakítása során több olyan egyéb alegység (hőkamera, tűzoltókészülék, vibrációmérés, aktív kommunikáció a központi számítógéppel) is betervezésre került, amik az első teszt során erőforrás vagy idő hiányában nem kerültek kialakításra.

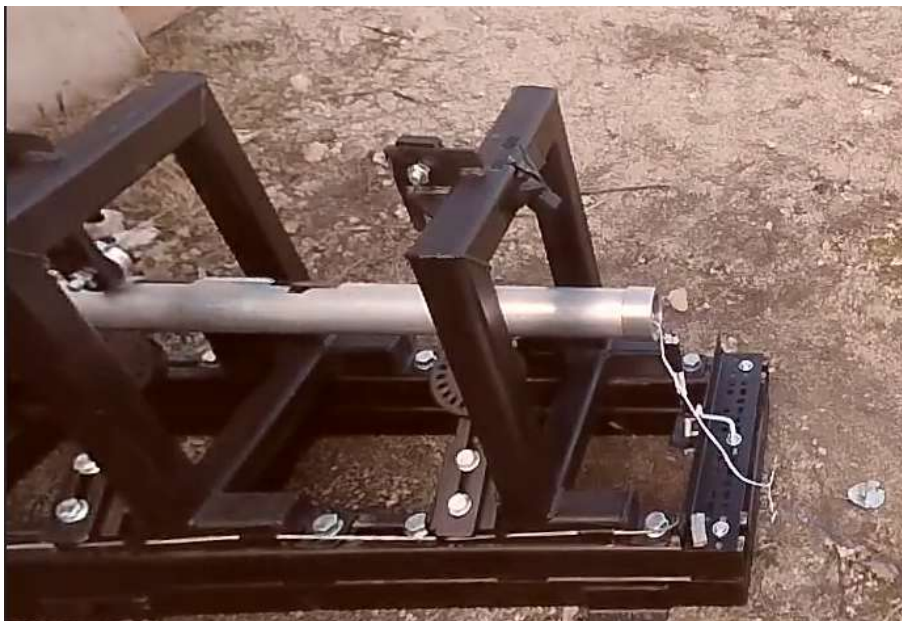


18. ábra. A mérési elrendezés vázlatát

Az indítás a már fentebb is említett indítódobozzal (robbantógéppel), az adatrögzítés helyszínen, SD kártyával történt. Hőmérsékletmérés két helyen történt, a rakétamotor oldalán és a kiáramló gázok csóvjában. A rakétamotort rácsavaroztuk az erőmérő cellára, a cella pedig az állványra volt erősítve. A mérőállvány a 19. ábrán, a behelyezett hajtómű a 20. ábrán látható.



19. ábra. A mérőállvány



20. ábra. A hajtómű befogva az állványba a statikus hajtóműteszthez.

4.2. Statikus hajtóműteszt eredményei

A hajtóműteszt a méréstől eltekintve teljes sikerrel zárult. A hajtóanyag szépen begyulladt, a teszt komplikációmentesen, a terveknek megfelelően végbement (21. ábra).



21. ábra. A hajtómű működés közben

A teszt után megvizsgáltuk a hajtómű alkatrészeit is. Ezeket a 22. ábrán lehet megtekinteni. A motor belső, kevlar borítása kibírta a motor üzemszerű működését, azonban látszik, hogy nem használható újra. A fűvóka tömítései is kiállták a próbát, csak a belső részét érte a gáz. Apróbb karbantartási munkálatok után a teljes hajtómű (a a motor belső borítását és a hajtóanyagot leszámítva) újra felhasználható. Egy újbóli felhasználás előtt javasolt az egyes alkatrészek bevizsgálása, hogy teljesítik-e a velük szemben támasztott követelményeket.



22. ábra. A motor belső borítása (balra) és a fűvóka a teszt után.

Sajnos a mérések nem a várakozásaink szerint alakultak. Bár remek videós felvételeink lettek, a hőmérséklet és nyomá szenzorok a teszt első felében nem rögzítettek értelmezhető adatokat. Érvényes adatok kiértékelése a dolgozat megírásáig nem készült el.

5. Összefoglalás, továbbfejlesztési lehetőségek

Mi jelen dolgozatunkat a szilárd rakétahajtóművek gyártástechnológiai problémáira hegyeztük ki.

A fejlesztés során két módszerrel is megpróbálkoztunk, egy gyanta alapú és egy cukor alapú technológiát is megvizsgáltunk. Az irodalomkutatás, tervezés és szimulációk után szerszámkészítésre és próbagyártásra került sor. Legyártásra kerültek a motor részei, valamint a hajtóanyag-pogácsák gyártásához szükséges speciális szerszámok is elkészültek. A próbagyártásokat köztes vizsgálatokkal validáltuk. Ezek tapasztalatai és eredményei alapján folyamatosan, iteratíván tökéletesítésre került a hajtóanyag-pogácsák gyártástechnológiája. Miután egy elfogadható összetétel és gyártási módszer kialakult, elkészült a teljes motorhoz skálázott hajtóanyag-pogácsa. Végezetül pedig elvégzésre került a statikus hajtóműteszt, mely során saját mérőelektronikával vizsgáltuk a hajtómű teljesítményét. Mindezen tevékenységek során az elejétől a végéig hangsúlyt fektettünk a biztonságra és a szabályosságra.

Bár a műgyanta alapú gyártástechnológia nem a várt eredményeket hozta, az irányvonal nem elvetendő. A jelenlegi megközelítés hibásnak bizonyult, azonban ez azt is jelenti, hogy ilyen irányba még bőven lehet fejlődni.

A cukros technológia működőképes, azonban itt is rengeteg fejlesztési lehetőség rejlik: az összetétel változtatása, a hajtóanyag-pogácsák geometriájának módosítása és a hatékonyabb gyártási eljárások kifejlesztése mind olyan terület, amit érdemes lehet körbejárni.

Emellett továbbfejlesztési lehetőség a jelenlegi koncepcióhoz még, hogy egy röpképes példány is kifejlesztésre kerüljön. Ehhez a tervek módosítására is szükség van, de számolni kell a hajtómű és a rakéta csatlakozásának problémájával is.

A felemás sikerekkel rendelkező mérőelektronikában is sok potenciál rejlik még, azok kiaknázása is adott.

Végezetül pedig a távoli jövőben akár a hibrid vagy folyékony motorok fejlesztése is esedékessé válhat.

6. Köszönetnyilvánítás

A rakétahajtómű-fejlesztés egy bonyolult, de rendkívül érdekes feladat, ezért általában sok tudományterület mérnökei dolgoznak rajta közösen. Szeretnénk megköszönni minden közreműködőnek, akik akár csak egy jó gondolattal, észrevétellel, megjegyzéssel vagy építő kritikával hozzájárult a közös sikerhez!

Szeretnénk külön megköszönni a CerTrust Kft.-nek, hogy rendelkezésre bocsátotta a telephelyüket, valamint köszönjük a szakmai tanácsaikat! Köszönet illeti a Polimertechnika Tanszékét is, amiért a gyantaöntésben segítettek, illetve beengedtek minket a laboratóriumukba.

Köszönjük a BME Suborbitals tagjainak, név szerint kiemelendően Ábrók Lászlónak, Balázs Artúrnak, Hegedűs Andrásnak, Kóth Jánosnak, Mohácsi Zsombornak és Tölgyesi Gergelynek az egyes munkafolyamatoknál nyújtott segítségüket.

Szeretnénk megköszönni Dr. Farkas Balásznak és Cseppentő Bencének, hogy konzulensként egyengették utunkat a dolgozat megírása során.

