

Kriogén extrúzió: kulcstechnológia a fúziós berendezések folyamatos üzemanyag-utánpótlásában

Longauer Bence

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

BME Gépészmérnöki kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Hidrogénizotópok (prócium, deutérium, trícium) kriogén extrúziója kulcsszerepet játszik a mágneses összetartású fúziós berendezések folyamatos üzemanyag-utánpótlásában. Az elérhető üzemanyag-utánpótlási megoldások közül a pelletbelövés hatásfoka a legmagasabb, köszönhetően a nagy behatolási mélységnek. A pelletbelövő berendezések egyik legfontosabb részegysége a kriogén extruder. Ez a cikk az extruderek fejlődését kívánja bemutatni, a korai egylövetű rendszerektől egészen a fejlett ikercsigás kialakításokig, kiemelve a működési alapelveket, a hőfejlődés okozta nehézségeket és a hidrogénizotópok komplex reológiáját kriogén hőmérsékleten.

Bevezetés

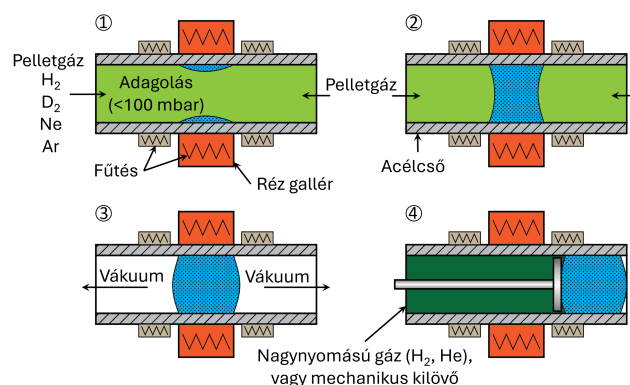
A mágneses összetartású fúziós berendezésekben – tokamakokban és sztellarátorokban – néhány tízmillió fokok hőmérsékletű plazma található, melyben hidrogénizotópok, pl. deutérium (D-D) vagy deutérium és trícium (D-T) egyesülnek energiaszabadulás mellett. A felszabadult energia egy hélium atommag és egy neutron formájában távozik. A kifelé irányuló részecsketranszport-folyamatok és a fúziós reakciók miatt az állandó plazmasűrűség fenntartásához a hidrogénizotópok utánpótlását folyamatosan biztosítani kell. Erre több lehetőség is van, pl. gázbelövés [1], szuperszonikus molekuláris nyalábinjektálás (SMBI) [2], és pelletbelövés [3].

A gázbelövés relatíve egyszerű eljárás, azonban az alacsony belövési sebesség miatt behatolási mélysége kicsi, így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka alacsony. Az SMBI rendszerekkel gyorsított atomokat akár több mint 1000 m/s sebességgel lövik be a plazmába [2], így a szeparátrixon átjutva néhány centiméter mélységig hatolnak be. Így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka jelentősen meghaladja a gázbelövessel elérhető értéket [4]. A pelletbelövés a legbonyolultabb technológia a felsoroltak közül. A fagyasztott hidrogénizotópokat apró pelletek formájában lövik a plazmába, megnövelve a behatolási mélységet. A Leidenfrost-effektusnak köszönhetően pelletek így akár több tíz centiméter mélységig is bejuthatnak a plazmában [5,6], így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka magasabb, mint az SMBI és a gázbelövés esetében. A következőkben a pelletbelövés technológiáját mutatjuk be részletesen, különös tekintettel a kriogén extruderekre.

Korai pelletinjektorok

Az első („pipe gun” típusú) pelletbelövők működése rendkívül egyszerű volt. A lefagyasztandó gázt egy vékonyfalú acélcsőben áramoltatták, miközben a csövet egy bizonyos szakaszon a gáz hármaspontja alá hűtötték. Ehhez a megfelelő szakaszokon réz blokkokat forrasztottak az

acélcső külső felületéhez. A gáz a hideg felületen deszublímál, végül a teljes átmérő befagy, egy pelletet alkotva (1. ábra). A pellet hosszát a gáznyomással, illetve a csövön elhelyezett külső fűtés segítségével lehet szabályozni. Az elkészült pelletet hajtógázzal vagy valamilyen mechanikus egységgel lehet kilőni. [7]



1. ábra: Pelletképződés folyamata egy „pipe gun” típusú injektorban

Ennek az injektortípusnak az a hátránya, hogy egyszerre csak egy pellet kilövésére képes, utána a fagyasztási folyamatot előről kell kezdeni, így folyamatos üzemanyag-utánpótlásra nem alkalmas. Több egység egyidejű használatával korlátozott ideig azonban mégis használható erre a célra. Egy ilyen – 20-cső – berendezést fejlesztettek ki például az LHD sztellarátor üzemanyag-utánpótlására is [8].

Modern pelletinjektorok

A modern pelletinjektor-rendszerek alapvetően három fő egységből állnak: jégforrás, pelletvágó és gyorsító.

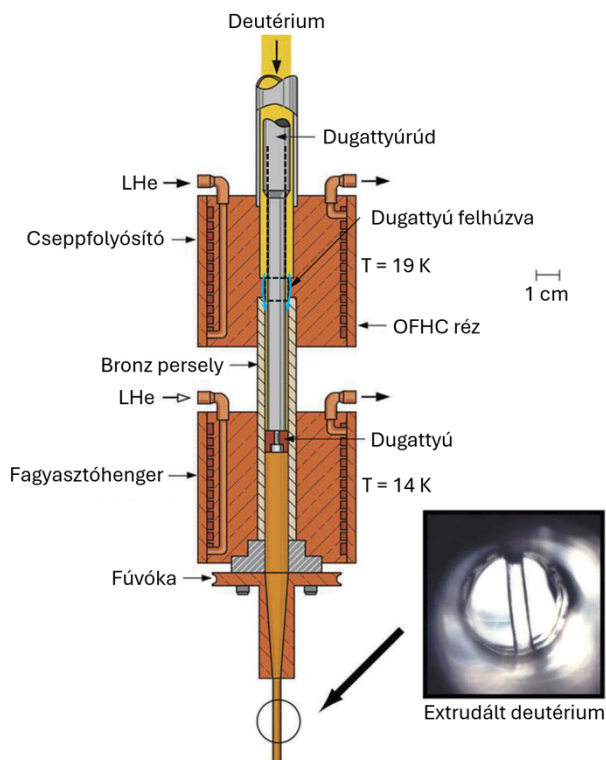
A jégforrás feladata, hogy szilárd halmazállapotú hidrogénizotópot állítson elő, rúd formájában, megfelelően szabályozott térfogatárammal. Erre a feladatra kriogén

extrudereket használnak. Az extruderből kiáramló jég rudat ezután pontos méretre kell darabolni, erre különböző pelletvágó („*pellet puncher*”) mechanizmusokat fejlesztettek ki. A pelleteket a vágás után néhány 100 m/s sebességre kell felgyorsítani, melyre több lehetőség is rendelkezésre áll, pl. gyorsítógáz vagy pelletcentrifuga [9]. A következő alfejezetekben a különböző extruder kialakítások kerülnek bemutatásra.

Dugattyús extruderek

A legegyszerűbb extruder típus a dugattyús extruder, ami korlátozott mennyiségű szilárd hidrogén előállítására képes. Az extruder kialakítása hasonló egy egyszerű munkahengeréhez, alapvetően egy hűtött hengerből és egy dugattyúból áll. A gázt a hűtött hengerben lefagyasztják, majd a dugattyú lenyomásával egy szűkületen keresztül kipereselik.

A gáz lefagyasztására kétféle módszer terjedt el: közvetlen deszublimáció a henger falán, vagy fagyasztás folyékony halmazállapotból. Utóbbihoz egy külön cseppfolyósító egységre is szükség van, ami pontos hőmérséklet-szabályozással folyékony halmazállapotban tartja az adott hidrogénizotópot. A 2. ábrán egy ilyen, cseppfolyósítóval ellátott dugattyús extruder ábrája látható, melyet az *Oak Ridge National Laboratory*-ban (Oak Ridge, TN, USA) fejlesztettek ki. A lefagyasztandó gáz felülről áramlik be a cseppfolyósító kamrába, ahol kondenzálódik. A cseppfolyósítót folyékony héliummal hűtik, valamint fűtőszálak is találhatók rajta, hogy a hőmérséklet pontosan szabályozható legyen. A dugattyú felhúzásával a folyadék lefolyik – a bronz persely tetején kialakított hornyokon keresztül – a cseppfolyósító alatt található fagyasztóhengerbe, ahol a térfogatot teljesen kitöltve megfagy. Ezután a dugattyú lenyomásával a szilárd hidrogénizotópot az alsó fúvókán extrudálják ki.



2. ábra: ORNL dugattyús extruder [7]

A másik lehetőség a gáz direkt deszublimálásán alapul. Ebben az esetben nincs szükség cseppfolyósítóra; az előhűtött gázt közvetlenül a fagyasztóhengerbe eresztik, ahol az a palástfelületen kifagy. Mivel a hengertérfogat ez esetben nem tud teljesen befagyni, ezért az extrudálás előtt egy tömörítési lépést is be kell iktatni. A kiáramló jég útját ilyenkor elzárják pl. egy csap segítségével, majd a dugattyút lenyomják. Ekkor a jég leválik a falról és összetömörödik. A csapot ezt követően kinyitják és jeget a dugattyú lenyomásával extrudálják.

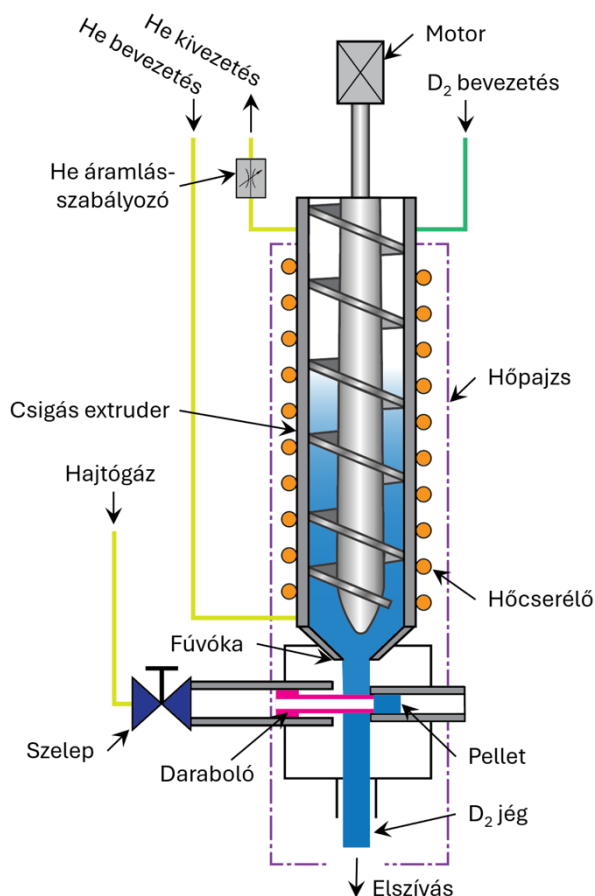
Egycsigás extruderek

A dugattyús extruderek legnagyobb hátránya, hogy csak szakaszos üzemben alkalmazhatók, viszont a legtöbb új fúziós berendezés esetében a folyamatos üzem alapkövetelmény. Erre megoldást nyújthatna, ha több dugattyús extrudert használnánk párhuzamosan, viszont megbízhatóbb és költségkímélőbb a csigás extruderek alkalmazása. Az egycsigás extrúzió jól ismert és elterjedten alkalmazott technológia a polimerek gyártástechnológiájában. Az első egycsigás kriogén extrudert az 1990-es évek végén fejlesztették ki [10].

A kriogén csigás extruderek sok hasonlóságot mutatnak a polimerek extrúziója során használatos berendezésekkel, különösen, ami a geometriát illeti. Van azonban egy jelentős eltérés: míg a polimerextrudereket fűteni kell, hogy a granulátum ömledékállapotba kerüljön, valamint az ömledék intenzív keveredését is biztosítani kell, addig a kriogén extrudereket folyamatosan hűteni kell, a használt izotóptól függően kb. 10-20 K közötti hőmérsékletre, ami jelentős tervezési kihívást jelent.

A 3. ábrán az EAST és KSTAR tokamakokra kifejlesztett egycsigás extruder sematikus ábrája látható [11]. Az extruder csiga egy réz hengerben helyezkedik el és egy vákuumátvezetőn keresztül egy villanymotor forgatja, miközben a henger külsőjét hélium gázzal hűtik egy hőcserélőn keresztül. A hélium gáz alkalmazásának legnagyobb előnye, hogy a hűtőkör így teljesen zárt, emellett pedig folyamatos üzemre is képes [12]. A deutériumot a henger tetejénél engedik be, ahol lehűl és kondenzálódik, majd megfagy. Az anyagáramot mindeközben a csiga lefelé mozgatja, a nyomás pedig a csiga mentén lefelé folyamatosan növekszik. A jég az extruder alján egy fúvókán keresztül távozik, ahol egy darabolóegység megfelelő időközönként kivág egy darabot a folytonos jég rudból, amit hajtógáz és egy szelep segítségével lőnek ki. Az extrudert és a darabolóegységet a hőveszteségek minimalizálása érdekében egy hőpajzs is borítja.

Az egycsigás extruderek hátránya, hogy az anyagtovábbítás gyakorlatilag a jég-csiga és jég-hengerfal súrlódási viszonytól függ. Ez jelentős korlát az extrudált térfogatáram tekintetében (max. ~100 mm³/s [11]). Ennek a kiküszöbölésére olyan berendezéseket kell használni, amelyek az anyagot folyamatosan mozgó, zárt, állandó térfogatokban továbbítják, függetlenül a súrlódási viszonyoktól. Az ilyen berendezéseket volumetrikus áramlástechnikai gépeknek nevezzük.



3. ábra: PELIN egycsígas extruder [11]

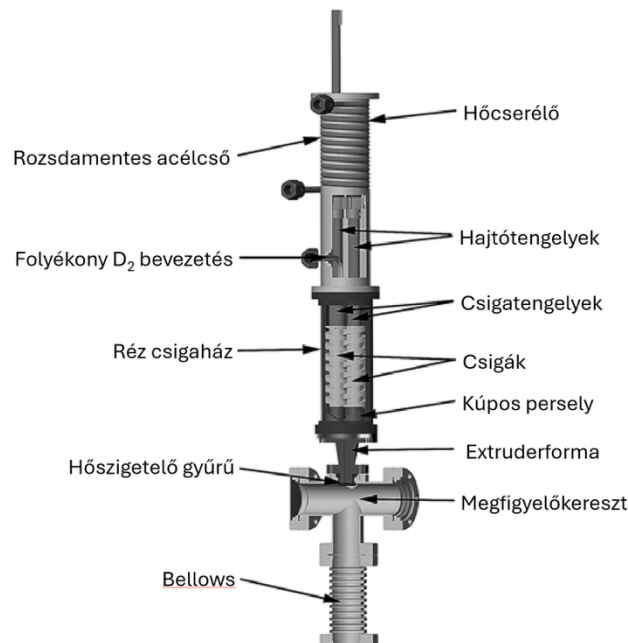
Ikercsígas extruderek

Az ikercsígas extruderek a potenciálisan magasabb, és pontosabban szabályozható térfogatáram érdekében kerültek előtérbe a legmodernebb pelletinjektorok fejlesztése során. Az ilyen típusú extrudereket széles körben alkalmazzák a polimerek feldolgozásában is, mivel az anyagáramlás a csigák közötti zárt térfogatokban (C-chamber), precízen szabályozható módon történik. Ezt a technológiát adaptálták a kriogén körülmények között működő hidrogénizotóp extruderekre is.

Az ikercsígas extruderek két, egymással ellentétes vagy megegyező irányban forgó, szorosan illeszkedő csigából állnak. A csigák geometriája biztosítja, hogy a köztük lévő anyagterefogat állandó maradjon, így a továbbított anyagmennyiség – amennyiben eltekintünk a résvesztésektől – kizárólag a forgási sebességtől és a csigák profiljától függ. Ez volumetrikus anyagszállítást eredményez, szemben az egycsígas rendszerek sűrűdésen alapuló anyagmozgatásával. Ennek köszönhetően az ikercsígas rendszerek stabilabb és nagyobb térfogatáramú extrudálást tehetnek lehetővé (max. $\sim 600 \text{ mm}^3/\text{s}$ [13]), ami különösen fontos a hosszú, folyamatos működésű fúziós berendezések esetében.

A potenciális előnyök vizsgálatára egy ikercsígas extruder prototípust fejlesztettek ki az Oak Ridge National Laboratory-ban, hogy deutériummal végzett kísérletekkel vizsgálják az ikercsígas extrudálási koncepciót. Az ikercsígas extruder (4. ábra) két darab, 27 mm átmérőjű, ellentétes forgásirányú, egymásba metsző csigából áll. A csigák egy nagy hővezetőképességű oxigénmentes (OFHC) réz házban helyezkednek

el. A csigák és a henger fala között 0,5 mm hézag található. A csigatengelyek vége bordázott, a hajtótengelyekhez bordás tengelykötéssel kapcsolódnak. A csigatengelyek alsó részét egy bronz persely támasztja meg, minimalizálva a sűrűdést és a hőfejlődést. A persely lejjebb egy $3 \times 7 \text{ mm}$ -es téglalap keresztmetszetre szűkül, ami egy OFHC rézből készült extruderformához csatlakozik. A réz csigaház és az extruderforma között egy indium o-gyűrű biztosítja a megfelelő tömítést. Az extruderforma tovább szűkíti a keresztmetszetet a végső $3 \times 4 \text{ mm}$ -es méretre. Az extruderforma és a megfigyelőkereszt között egy poliimid gyűrű is található, melynek célja a hőszigetelés. [14]



4. ábra: ORNL ikercsígas extruder [14]

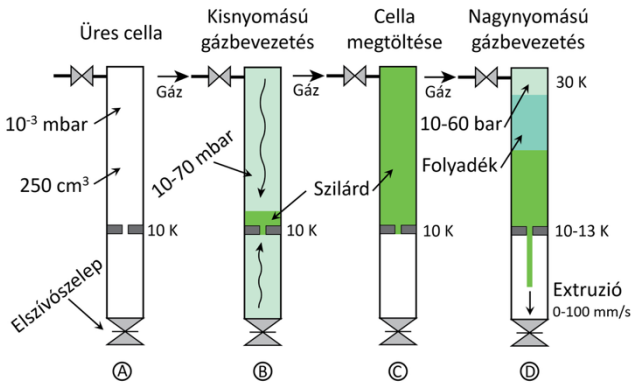
Gázdinamikus extruderek

A gázdinamikus extruderek egy új, ígéretes megoldást képviselnek, amit a CEA (Grenoble, Franciaország) fejlesztett ki a meglévő mechanikus csígas és dugattyús extruderekkel szembeni alternatívaként. A koncepció lényege, hogy az extrudáláshoz szükséges nyomást nem mozgó mechanikus elemek – például csiga vagy dugattyú – hozzák létre, hanem az előhűtött, nagynyomású hajtógáz közvetlenül fejt ki a szükséges nyomást a szilárd hidrogéndugóra. Ez a megközelítés különösen előnyös trícium alkalmazása esetén, mivel a mozgó alkatrészek elhagyása növeli a rendszer biztonságát és csökkenti a karbantartási igényt.

A rendszer központi eleme egy kondenzációs/extrudáló cella, amelyet kezdetben 10 K hőmérsékletre hűtenek és $\sim 10^{-3} \text{ mbar}$ vákuumra szívják le (5. ábra, A), majd próciummal vagy deutériummal töltik fel $\sim 10\text{--}70 \text{ mbar}$ nyomásra. Ezzel az extruder fúvókájában kialakul egy jégdugó, amely lezárja a cellát (5. ábra, B). Ezt követően a cella felső részében a prócium/deutérium folyamatosan deszublimalódik, miközben az alsó részből elszívják a maradék gázt (5. ábra, C). Az extrudálás indításához a cella felső részét kb. 30 K -re melegítik, miközben a hajtógáz nyomását ($20\text{--}40 \text{ bar}$) ráengedik a jégdugóra. Ez a nyomás a fúvókán keresztül kitér a jégdugóról (5. ábra, D), amely a CEA extruder esetében 2 mm átmérőjű.

A kinyomott jégrúd sebességét a fúvóka hőmérsékletének finomhangolásával lehet szabályozni: a hőmérséklet emelése az extrudálási sebesség növekedését okozza, míg a csökkentése lassítja vagy teljesen leállítja a folyamatot.

A gázdinamikus extrúzió előnye, hogy a berendezés nem tartalmaz mozgó alkatrészeket, így a tríciumkompatibilis kialakítás egyszerűbb, valamint a megbízhatóság is magasabb. Hátránya, hogy nagynyomású tríciumhálózatra van szükség az üzemeltetéshez, valamint, hogy a hőmérsékleteloszlás és a fúvóka kialakítása erősen befolyásolja az extrúziós folyamat stabilitását, továbbá, hogy a jelenlegi CEA extruder csak szakaszos működésre képes. Nagy extrudálási sebességeknél instabilitásokat is tapasztaltak a tesztelés során, melynek okai még nem tisztázottak. [15]



5. ábra: CEA gázdinamikus extruder működése [15]

Hidrogénizotópok viselkedése kriogén hőmérsékleten

A használt hidrogénizotópok csak egy igen szűk hőmérséklettartományon belül extrudálhatók, mivel szilárdságtani tulajdonságaik jelentős hőmérsékletfüggést mutatnak. Az extrudáláshoz szükséges nyomás és a nyírás során kezdődő belső hőfejlődés is széles tartományok között változik a beállított hőmérséklettől függően. Ezen paraméterek megváltozására az extrúziós folyamat rendkívül érzékeny, ezért mindenképpen ismernünk kell a szilárd hidrogénizotópok reológiai viselkedését. A szilárd prócium viselkedése például $10-13 \text{ K}$ hőmérséklettartományon a viszkoplasztikus Bingham-modellel írható le [10]. A modell szerint a folyadék egy adott kritikus nyírófeszültség alatt szilárd anyagként viselkedik, míg afelett viszkózus folyadékként. Ez a jelenség az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}, \quad (1)$$

ahol τ a nyírófeszültség, τ_0 a kritikus nyírófeszültség, μ a dinamikai viszkozitás, $\dot{\gamma}$ pedig a nyírósebesség. A Newtoni és a Bingham folyadékmodellek összehasonlítása a 6. ábrán látható. Prócium esetében ezt a modellt annyival kell kiegészíteni, hogy a kritikus nyírófeszültség és a dinamikai viszkozitás is jelentős hőmérsékletfüggést mutat. I. V. Vinyar és A. Ya. Lukin mérései alapján [10] a hőmérsékletfüggés a következőképp írható le:

$$\tau_0(T) = 0.026 \cdot e^{0.28(T_s - T)} \text{ MPa} \quad (2)$$

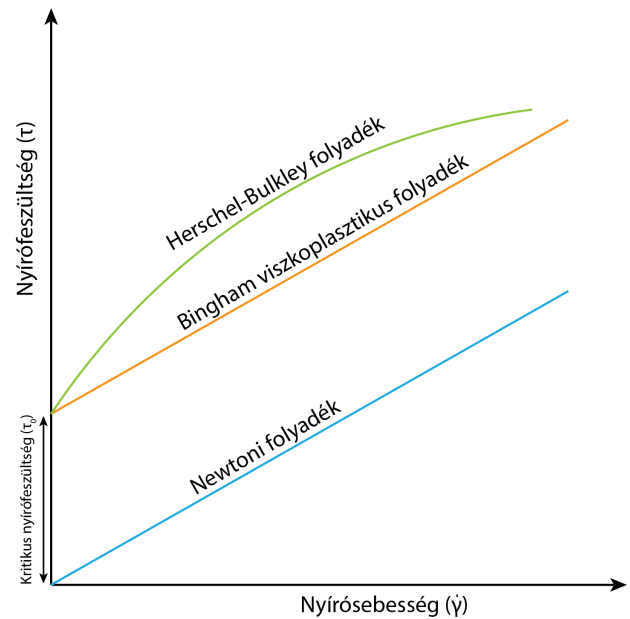
és

$$\mu(T) = 0.0027 \cdot e^{0.44(T_s - T)} \text{ MPa} \cdot \text{s}, \quad (3)$$

ahol T_s a hármasponti hőmérséklet. Újabb mérések a szilárd hidrogén az előzőektől kissé eltérő viselkedését írják le, és egy ún. Herschel-Bulkley modellt használnak a viselkedés jellemzésére [16]. A modell szerint a folyadék egy adott kritikus nyírófeszültség alatt szilárd anyagként viselkedik, míg afelett nemlineáris viselkedést mutat (6. ábra).

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

ahol τ a nyírófeszültség, τ_0 a kritikus nyírófeszültség, k a konzisztenciaindex, $\dot{\gamma}$ a nyírósebesség, n pedig az áramlásindex.



6. ábra: Anyagmodellek összehasonlítása

Hőterhelések az extrúziós folyamat során

Az alapvető hőterhelések az extruderek esetében a hőszugárzás és a hővezetés (a konvekció a nagy vákuum miatt elhanyagolható). Ezek a terhelések statikus állapotban is terhelik a berendezést. A hőszugárzással bevitt teljesítmény csökkentésére hőpajzsokat és Mylar fóliát használnak. Ezen kívül természetesen a sugárzó felületek nagyságának csökkentésével is minimalizálható a hőterhelés. A hővezetéssel bevitt hőteljesítmény csökkentésére kis keresztmetszeteket, megnövelt anyaghosszokat, polimer megszakításokat, és ahol szilárdsági szempontból indokolt, ausztenites korrózióálló acél elemeket használnak.

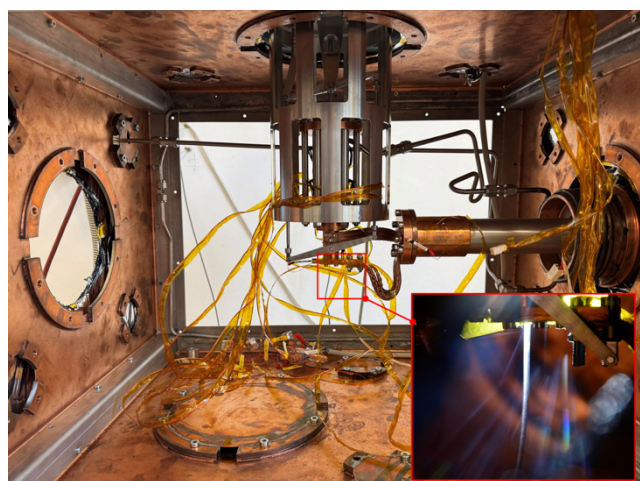
A berendezések üzemelése során egyéb hőterhelések is fellépnek. Ilyen például a gáz hűtéséből és halmazállapot-változásából származó hő. Ennél azonban sokkal jelentősebb a szilárd hidrogén nyírása során képződő hő (*viscous heat*). Ez gyakorlatilag a mechanikai energia hővé való átalakulását jelenti, melyet a nyírás okozta deformációból származó viszkózus súrlódás okoz. Ez a

folyamat megváltoztatja a szilárd hidrogén hőmérsékletét, ami hatással van annak viszkozitására és hőátadási tulajdonságaira, végső soron pedig befolyásolja az extrudálási folyamat stabilitását és hatékonyságát.

A képződő és bevezetett hő elvonására több megoldás is létezik, ahogyan azt a korábban bemutatott extruderek esetében is láthattuk. Az egyik lehetőség a kriohűtők használata. Ezek a berendezések egy zárt hélium hűtőkörfolyamat (pl. Gifford-McMahon ciklus [17]) segítségével vonják el a hőt, villamos energia befektetésével. Ezek a kriohűtők néhány watt teljesítményre képesek 4 K hőmérséklet mellett. Egy másik lehetőség a folyékony hélium használata. Ezzel a módszerrel sokkal nagyobb teljesítmény (~10-20 watt) is elérhető 4 K hőmérsékleten, hátránya azonban, hogy a cseppfolyósított hélium meglehetősen költséges, sokkal bonyolultabb infrastruktúrát igényel, körülményes a kezelése, és általában nem nyújt lehetőséget a folyamatos üzemre (dewart kell cserélni). Egy harmadik lehetőség a szuperkritikus vagy gáz halmazállapotú hélium használata. Ezek hűtőteljesítménye alacsonyabb, mint a folyékony hélium esetében, mivel ez esetben nincs halmazállapotváltozással elvont hő. Alkalmasabbak viszont folyamatos üzemeltetésre, mivel a hűtőkörfolyamat teljesen zárt, tehát csak villamos energia befektetésére van szükség.

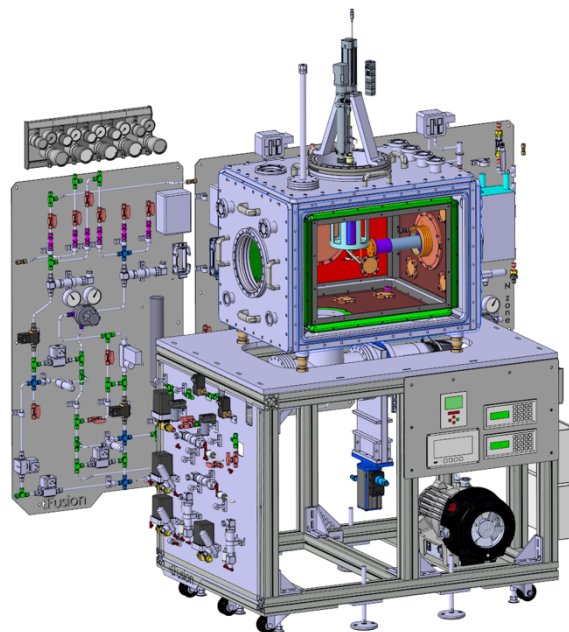
A kutatások magyar vonatkozásai

A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kaptak a kriogén technikákhoz kapcsolódó kutatások. Ezek részeként laboratóriumunk részt vesz a jövőbeli európai demonstrációs erőmű (EU DEMO) üzemanyagutánpótlási rendszereinek fejlesztésében, beleértve az extruder, pelletvágó és centrifugaegységeket is. A DEMO pelletvágó prototípusának teszteléséhez megbízást kaptunk egy dugattyús extruder kifejlesztésére is. A megtervezett extruder (7. ábra) elméleti kapacitása ~5000 mm³, ami a pelletvágó több mint 10 másodperces üzemeltetéséhez elegendő. Az extruder gyártása és összeállítása 2025 elején elkészült, tesztelése és továbbfejlesztése folyamatos.



7. ábra: Dugattyús extruder a Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában

A kriogén kutatások szükségessé tették egy új infrastruktúra kifejlesztését is, mely univerzálisan többféle méréshez is használható. Ez a CryPT-ON rendszer, ami egy nagyméretű modulárisan átalakítható vákuumkamrával, hőpajzzsal, többféle hűtőrendszerrel (kriohűtő, folyékony nitrogén, folyékony hélium), valamint gázrendszerrel van felszerelve. Ez az alpinfrastruktúra kiváló környezetet biztosít az üzemanyagutánpótlással kapcsolatos mérések és tesztek elvégzésére is. A 8. ábrán a CryPT-ON rendszer CAD modellje, valamint a beépített dugattyús extruder látható.



8. ábra: CryPT-ON rendszer, összeszerelve a dugattyús extruderrel

Összefoglalás

A mágneses összetartású fúziós berendezések hosszú távú üzemeltetéséhez elengedhetetlen a folyamatos és hatékony üzemanyag-utánpótlás. A bemutatott technológiák közül a pelletbelövés bizonyult a leghatékonyabb megoldásnak, különösen a nagyobb behatolási mélység és a kedvezőbb üzemanyag-hasznosulás miatt. A hidrogénizotópok kriogén extrúziója kulcsfontosságú ebben a folyamatban. A cikk részletesen tárgyalta a dugattyús, egycsigás, iker-csigás és gázdinamikus extruderek működését, azok előnyeit és korlátait, valamint a kriogén körülmények között fellépő hőterhelések és az izotópok reológiai sajátosságainak hatását az extrudálási folyamatra. A jelenlegi extruderfejlesztések célja egy nagy térfogatú, precízen szabályozható, hosszú távon is stabil működésű berendezés létrehozása, amely kulcsfontosságú a jövő fúziós reaktorai számára. Az Energiatudományi Kutatóközpontban folyó kriogén kutatások jelentősen hozzájárulnak a folyamatos üzemanyagutánpótlási rendszerek részegységeinek fejlesztéséhez, valamint üzemi paramétereik feltérképezéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] C. Sang, Z. Wang, M. Xu, Q. Wang, D. Wang, Simulation of the gas puffing fueling on the HL-2A tokamak using SOLPS, *Fusion Engineering and Design* 136 (2018) 1041–1046. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.064>.
- [2] X. Yuan, J. Li, J. Wu, J. Li, Y. Chen, H. Zhuang, Y. Zhou, X.W. Zheng, J. Hu, Development and implementation of Supersonic Molecular Beam Injection for EAST tokamak, *Fusion Engineering and Design* 134 (2018) 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.06.018>.
- [3] I. Vinyar, J. Hu, A. Lukin, J. Li, X. Yao, C. Li, Y. Chen, P. Reznichenko, 50 Hz deuterium pellet injector for EAST tokamak, *Fusion Engineering and Design* 98–99 (2015) 1898–1901. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.11.008>.
- [4] Y.L. Zhou, Z.H. Wang, X.Q. Xu, H.D. Li, H. Feng, W.G. Sun, Comparisons between tokamak fueling of gas puffing and supersonic molecular beam injection in 2D simulations, *Physics of Plasmas* 22 (2015) 012503. <https://doi.org/10.1063/1.4905641>.
- [5] E. Belonohy, O.J.W.F. Kardaun, T. Fehér, K. Gál, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Lackner, P.T. Lang, J. Neuhauser, the A.U. Team, A high field side pellet penetration depth scaling derived for ASDEX Upgrade, *Nucl. Fusion* 48 (2008) 065009. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/6/065009>.
- [6] L.R. Baylor, T.C. Jernigan, C.J. Lasnier, R. Maingi, M.A. Mahdavi, Fueling efficiency of pellet injection on DIII-D, *Journal of Nuclear Materials* 266–269 (1999) 457–461. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00585-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00585-6).
- [7] S.K. Combs, L.R. Baylor, Pellet-Injector Technology – Brief History and Key Developments in the Last 25 Years, *Fusion Science and Technology* 73 (2018) 493–518. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1421367>.
- [8] R. Sakamoto, G. Motojima, H. Hayashi, T. Inoue, Y. Ito, H. Ogawa, S. Takami, M. Yokota, H. Yamada, Twenty barrel *in situ* pipe gun type solid hydrogen pellet injector for the Large Helical Device, *Review of Scientific Instruments* 84 (2013) 083504. <https://doi.org/10.1063/1.4816823>.
- [9] I. Vinyar, A. Géraud, H. Yamada, A. Lukin, R. Sakamoto, S. Skoblikov, A. Umov, Y. Oda, G. Gros, I. Krasilnikov, P. Reznichenko, V. Panchenko, Pellet injectors for steady state plasma fuelling, *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 685–689. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.206>.
- [10] I.V. Vinyar, A.Ya. Lukin, Screw extruder for solid hydrogen, *Tech. Phys.* 45 (2000) 106–111. <https://doi.org/10.1134/1.1259579>.
- [11] I. Vinyar, J. Hu, S.-H. Park, A. Lukin, X. Yao, C. Li, Y. Chen, P. Reznichenko, H.-T. Kim, Pellet injectors for EAST and KSTAR tokamaks, *Fusion Engineering and Design* 124 (2017) 779–782. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.026>.
- [12] Closed Loop Helium Cooling System, Stirling Cryogenics (n.d.). <https://stirlingcryogenics.com/products/closed-loop-helium-cooling-systems-for-science-and-industry/> (accessed September 5, 2025).
- [13] S.J. Meitner, L.R. Baylor, W.D. McGinnis, R&D Extruder Developments for the Wendelstein 7-X Continuous Pellet Fueling System, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 50 (2022) 1957–1961. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3170718>.
- [14] S.J. Meitner, L.R. Baylor, J.J. Carbajo, S.K. Combs, D.T. Fehling, C.R. Foust, M.T. McFee, J.M. McGill, D.A. Rasmussen, R.G. Sitterson, D.W. Sparks, A.L. Qualls, Development of a Twin-Screw D₂ Extruder for the ITER Pellet Injection System, *Fusion Science and Technology* 56 (2009) 52–56. <https://doi.org/10.13182/FST09-20>.
- [15] J. Manzagol, N. Luchier, F. Millet, A new pellet extrusion concept for nowadays tokamak plasma fuelling and control system, *Fusion Engineering and Design* 215 (2025) 114971. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114971>.
- [16] P.S. Ravi Kumar, S.K. Arumugam, Non-Newtonian and non-isothermal numerical modelling of a twin screw hydrogen extruder with slip imposed boundary condition on the screw surface, *Fusion Engineering and Design* 161 (2020) 111896. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111896>.
- [17] M. Thirumaleshwar, S.V. Subramanyam, Gifford-McMahon cycle – a theoretical analysis, *Cryogenics* 26 (1986) 177–188. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(86\)90217-1](https://doi.org/10.1016/0011-2275(86)90217-1).