

ŠOLSKI CENTER VELENJE  
POKLICNA IN TEHNIŠKA ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA  
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

MAGNETNA FUZIJA KOT VIR  
ENERGIJE

Tematsko področje: ASTRONOMIJA IN FIZIKA

Avtor:  
Matic Knap, 3. letnik

Mentor:  
Sašo Gnilšek, prof.

Somentor:  
Zvone Cencen, dipl. inž. elektrotehnike

Velenje, 2009

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje.

Mentor: Sašo Gnilšek, prof.

Somentor: Zvone Cencen dipl. inž. elektrotehnike

Datum predstavitve:

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠCV-PTERŠ, 2008/2009

KG fuzija / tokamak / devterij / tritij / plazma

AV KNAP, Matic

SA GNILŠEK, Sašo ment. / CENCEN, Zvone soment.

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

ZA Šolski center Velenje, Poklicna in tehniška elektro in računalniška šola

LI 2009

IN MAGNETNA FUZIJA KOT VIR ENERGIJE.

TD RAZISKOVALNA NALOGA

OP VII, 25, 21

IJ sl

JI sl/en

AI Fuzijska energija je energija, ki napaja sonce in ostale zvezde, pri kateri se lahka jedra zlivajo v težja in pri tem se sprostijo ogromne količine energije. Po svetu vse bolj intenzivno potekajo raziskave na tem področju, ker bi s pridobivanjem energije na takšen način bistveno manj onesnaževali ozračje, pridobili pa bi relativno veliko energije. Raziskoval sem, zakaj je tako težko doseči fuzijo, na kakšne načine lahko pridobivamo energijo s fuzijo na zemlji in kakšne zahteve bi morali izpolniti. Raziskovalno delo sem opravljal s pomočjo svetovnega spleta, knjig, ter mnenj in predstavitev strokovnjakov na predstavitvi fuzije v Ljubljani. Raziskal sem, kakšna je reakcija zlivanja jeder Tritija (izotop vodika) in Devterija (izotop vodika), kar nam je sicer že znano več kot 30 let. Glavna tema naloge je bil tokamak – »posoda«, v kateri zadržujemo plazmo s pomočjo magnetnega polja, kakšno vlogo ima diverter (del tokamaka, ki »čisti« plazmo) v tokamaku ter kako segrevamo plazmo poleg ohmskega gretja. Zanimalo me je tudi, kako daleč so s projektom ITER in kdaj približno lahko pričakujemo prvo plazmo, kako Slovenci sodelujemo pri tem projektu in kaj je glavni problem pri pridobivanju energije s fuzijo.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

CX fusion / tokamak / deuterium / tritium / plasma

AU KNAP, Matic

AA GNILŠEK, Sašo supervisor / CENCEN, Zvone co-adviser

PP 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

PB Šolski center Velenje, Poklicna in tehniška elektro in računalniška šola

PY 2008

TI MAGNETIC FUSION CONFIRMED AS SOURCE OF ENERGY.

DT secondary school research work

NO VII, 25, 21

LA sl

AL sl/en

AB Energy of fusion is energy of sun and other stars where the light cores fuse together into heavier ones thus releasing a huge amount of energy. There have been more and more intensive researches throughout the world in this field of interest because it enables us to get energy with minimum emissions and a lot of energy released. In my research work I contemplated upon questions such as why it is so hard to fuse two cores together, what ways there are to get energy with fusion on earth and what requirements should be fulfilled. I researched the material by means of the internet, books, as well as the opinions and presentations of the fusion experts on EXPO held in Ljubljana. I researched the reaction of fusion of Tritium and Deuterium which has been known to us for more than 30 years. The main topic of my research work was tokamak »vessel« where we retain plasma with the help of the magnetic field, the function of a diverter (a part of tokamak which 'cleans' the plasma) in tokamak and some other ways of heating the plasma beside the ohm heating. I was interested in how the ITER project is progressing and when we can expect the first plasma, how the Slovenians are involved in this project and what the general problem with fusion energy on earth is.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA .....	IV
KEY WORDS DOCUMENTATION .....	V
KAZALO SLIK .....	VII
KAZALO GRAFOV .....	VIII
KAZALO TABEL .....	VIII

## MAGNETNA FUZIJA

1. UVOD .....	1
2. PLAZMA .....	3
2.1 Ultra-hladna Plazma .....	3
2.2 Ne-nevtralna plazma .....	3
2.3 Prašna ali zrnata plazma .....	4
2.4 Uporaba plazme .....	4
2.4.2 Flouroscentna svetilka .....	5
2.4.3 Plazemski zaslon .....	6
2.4.4 Čiščenje s plazmo .....	6
2.4.5 Plazemski CNC stroj .....	7
3. FUZIJA .....	8
3.1 Energija fuzije .....	8
3.2 D-T reakcija .....	9
3.2 Energijska poravnava .....	11
3.3 Lawsonov produkt .....	13
4. TOKAMAK .....	16
4.1 Zgradba tokamaka .....	16
4.2 Magnetno polje tokamaka .....	17
4.3 Ohmsko gretje .....	18
4.4 Gretje z nevtralnimi ioni .....	18
4.5 Radio frekvenčno gretje .....	19
4.6 Superprevodni magneti .....	20
4.7 Diverter .....	21
5. TERMONUKLEARNA ELEKTRARNA .....	23
6. RAZPRAVA .....	25
7. ZAKLJUČEK .....	31
8. ZAHVALA .....	31
9. VIRI IN LITERATURA .....	32

## KAZALO SLIK

Slika 1: Kozarec vode, litijska baterija, vagon premoga.....	1
Slika 2: Plin in plazma.....	3
Slika 3: Plazemska kroglja.....	5
Slika 4: Fluorescentna svetilka.....	5
Slika 5 : Plazemski zaslon.....	6
Slika 6: Čiščenje s plazmo.....	6
Slika 7: Plazemski C N C stroj.....	7
Graf 4: Odvisnost integrala $\langle\sigma v\rangle$ od temperature.....	11
Slika 8: Tokamak.....	16
Slika 9: Magnetna polja tokamaka.....	17
Slika 10: Silnice na ion v tokamakovem magnetnem polju v ravnini.....	17
Slika 11: Pospeševalnik nevtralnih ionov.....	19
Slika 12: Radio frekvenčna antena.....	19
Sliki 13,14: Superprevodni magnet, Super prevodni magnet tokamaka.....	20
Slika 15: Oblika plazme.....	21
Slika 16: Diverter.....	22
Slika 17: Premikač diverterja.....	22
Slika 18: Regeneracija tritija.....	23
Slika 19: Fuzijska elektrarna.....	24
Slika 20: Nevtronsko polje.....	26
Slika 21: Pospeševalnik vodikovih atomov.....	26
Slika 22: Naprava za merjenje goriva v stenah reaktorja.....	26
Slika 23: Magnet za ustvarjanje linearnega magnetnega polja.....	27
Slika 24: Tanka plast ogljika.....	27
Slika 25: Keramika z vlakni.....	27
Slika 26: Modul oplodne obloge.....	28
Slika 27: Razvoj reaktorjev.....	30

## KAZALO GRAFOV

Graf 1: Vežalne energije .....	8
Graf 2: Potencialna energija jedra .....	10
Graf 2: Preseki reakcij .....	11
Graf 3: Odvisnost integrala $\langle\sigma v\rangle$ od temperature.....	11
Graf 4: Lawsonov kriterij .....	14

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Odvisnost integrala $\langle\sigma v\rangle$ od temperature .....	11
---	----

## 1. UVOD

Energetske potrebe po električni energiji so iz dneva v dan večje. Termo elektrarne in nuklearne elektrarne pa iz dneva v dan bolj onesnažujejo zemljino atmosfero.

Elektrarne na fosilna goriva vsako uro v ozračje spustijo 3,4 milijone ton ogljikovega dioksida, v letu 2030 bo to število naraslo na 4,6 milijone ton ogljikovega dioksida.

Nuklearne elektrarne so v letu 2007 proizvedle 18500 m<sup>3</sup> srednje in nizko radioaktivnih odpadkov, v najslabšem primeru bi v letu 2030 proizvedli 48000 m<sup>3</sup> srednje in nizko radioaktivnih odpadkov. Primerno skladiščenje radioaktivnih odpadkov ni nevarno za okolje, toda najmanjša kontaminacija z vodo lahko pomeni smrt več milijonskega mesta.

Rešitev problema emisij toplogrednih plinov in relativno velike količine radioaktivnih odpadkov so elektrarne, ki s pridobivanjem energije čimmanj onesnažujejo okolje.

Vetrne elektrarne izkoriščajo energijo vetra, ki je čist način pridobivanja energije in obenem nevaren za ptice.

Sončne elektrarne pretvarjajo energijo sonca v električno energijo s pomočjo sončnih celic. Sončne celice lahko postavimo na strehe objektov ali iz njih zgradimo tako imenovana sončna polja. Hidroelektrarne za proizvodnjo električne energije uporabljajo padec vode. S hidroelektrarnami spremenimo pretok rek in veletokov in s tem močno vplivamo na bližnje ekosisteme. Elektrarne z alternativnimi viri so odlična rešitev za zmanjšanje emisij, vendar pa pri tako veliki porabi električne energije predstavljajo samo 38% proizvedene energije.

Želeni profil elektrarne je torej elektrarna, ki bi proizvajala električno energijo na bolj čist in okolju prijazen način, imela minimalno število radioaktivnih odpadkov ter izpustov toplogrednih plinov v atmosfero in obenem proizvedla veliko količino električne količine.

Elektrarna ki ustreza temu profilu je fuzijska elektrarna, saj bi iz navadne 6-celične Litijske baterije in kozarca vode s fuzijo proizvedli enako količino energije kot jo proizvede 20 ton premoga.



Slika 1: Kozarec vode, litijska baterija, vagon premoga



Fuzija po latinsko Fusio pomeni združevanje npr. podjetij oziroma zlivanje npr. lahkih jeder v težja jedra. Fuzijo poskušajo fiziki doseči že odkar je A. Einstein izpeljal najbolj znamenito in pomembno enačbo  $E = mc^2$ . Doseči so jo uspeli le za kratek čas, kar pa je še daleč od fuzijske elektrarne. Fuzija je proces, napaja Sonce in zvezde, torej z fuzijsko elektrarno naredimo v reaktorju tako imenovano umetno zvezdo oz. Sonce. V središču Sonca se vsako sekundo  $10^9$  kg vodika pretvori v helij. Pri takšni reakciji oz. Zlitju se sprosti ogromna količina energije. Razmere na Soncu so ekstremne, temperature v središču so okoli 15 milijonov °C, tlaki v središču so nekje med  $3,4 \times 10^8$  in  $2,25 \times 10^{11}$  atmosfer.

Vsa snov v središču Sonca je v 4. stanju snovi, to je plazmično stanje pri katerem so jedra ločena od lupin zaradi njihovega termičnega gibanja, ki je tako veliko, da lahko premagajo Coulombovo silo in se zlijejo. Plazmo vzdržuje oz. ohranja gostoto plazme velika gravitacijska sila, ki je 28 krat večja od gravitacije zemlje. Omejevanje plazme na Soncu torej zagotavlja velika gravitacija, ki je na zemlji ne moremo doseči, zato se na Zemlji poslužujemo drugačnih načinov. Najbolj pogosta in uporabna sta magnetno in lasersko omejevanje plazme, ki zagotovita zadostne temperature za zlitje jeder.

Pri laserskem zadrževanju majhno gorivno celico obsevamo z laserskimi žarki iz vseh strani da se gorivo v njej vžge in zlije; nastane tako imenovana mikrofuzijska eksplozija. Raziskave na laserskem omejevanju so zelo uporabne za vojaške namene in zaradi tega se raje odločamo za magnetno omejevanje. Magnetno omejevanje plazme s pomočjo magnetnega polja omejuje plazmo in se segreva, da se le ta vžge in se jedra zlijejo.

## 2. PLAZMA

Beseda plazma lahko poimenuje več stvari, v medicini in biologiji s tem izrazom označimo krvno tekočino, v fiziki in kemiji pa je plazma eno izmed osnovnih stanj snovi. V fiziki je torej plazma osnovno stanje snovi, v katerem so jedra ločena od elektronskih lupin zaradi njihovega termičnega gibanja.



Slika 2: Plin in plazma

Plazma je prevladujoče stanje snovi v vesolju, saj tvori vse zvezde in sonca, odkril pa jo je sir Williams Crookes leta 1879, ko je opazoval razelektritev v razredčenih plinih. Opazil je, da se je temen prostor okoli elektrode povečal, če se je povečala atenuacija plina, katodni žarki pa so še vedno izhajali iz elektrode. Proučeval je naravo teh žarkov in ugotovil, da potujejo premo, povzročajo fluorescenco na telesih, ob katere trčijo, hkrati pa se ob njihovem trku sprošča toplota. Verjel je, da je odkril novo agregatno stanje snovi, ki ga je poimenoval sevajoča snov. Prvi je leta 1879 pravilno pojasnil njegova opažanja britanski fizik sir Joseph John Thomson, ki je dokazal, da so katodni žarki sestavljeni iz negativnih elektronov. Izraz plazma je za ioniziran plin prvi uporabil Irving Langmuir, ker ga je snov spominjala na krvno tekočino, in ga je prvič objavil v svojem delu Nihanja v ioniziranih plinih (Oscillations in Ionized Gases) leta 1928.

Plazmo ločimo na naravne in umetne, naravne potem še delimo na tiste ki so nastale v Zemljinem ozračju in tiste ki so nastale v Vesolju.

### 2.1 Ultra-hladna Plazma

Proizvajamo jo s pomočjo laserske pasti, pri kateri so nevtralni atomi ohlajeni na temperaturo manj kot 1 mK. Z drugim laserjem nato ioniziramo atom tako, da zunanemu elektronu dovedemo ravno dovolj energije, da lahko pobegne električnemu privlaku atoma. Na ta način lahko nadziramo kinetično energijo pobeglega elektrona. S pulznim laserjem lahko dosežemo, da energija elektrona ustreza temperaturi 100 mK, medtem ko ioni ostanejo shlajeni na temperaturi nekaj mK, vendar je obstojnost takšne plazme le  $10^{-12}$  s.

### 2.2 Ne-nevtralna plazma

Ko se elektroni odcepijo od jedra ali molekul, dobimo nevtralno plazmo. Gostota takšne plazme je po vsem prostoru enaka zaradi električnih sil in dobre prevodnosti plazme. Takšen pojav imenujemo kvazinevtralnost. Plazmi, ki ima na nekem področju višek pozitivnega ali negativnega naboja, pravimo ne-nevtralna plazma. V ekstremnih primerih je lahko sestavljena samo iz ene vrste nabitih delcev, npr. iz elektronov. Primeri ne-nevtralne plazme so nabiti žarki delcev, elektronski oblak, Penningova past in pozitronske plazme.

## 2.3 Prašna ali zrnata plazma

Prašnata plazma poleg elektronov in nevtralnih ionov vsebuje tudi mikroskopske nabite delce prahu. Najdemo jo v medplanetarnih oblakih, kometih, planetarnih obročih, aerosolih in atmosferah.

V vesolju na prašne delce poleg gravitacije vpliva še sevalni tlak, če se nahajajo v bližini objektov z večjimi masami. Prašni delci v plazmi lahko postanejo nabiti zaradi fotoionizacije, ultravijoličnega sevanja, sekundarne elektronske emisije, trkov s termičnimi ioni in elektroni ter zaradi absorpcije nabitih delcev. Zaradi naboja poleg gravitacijskega polja nanje vplivata tudi električno in magnetno polje. Plazma vpliva na prašne delce, ki jih prenaša. Obratno pa lahko tudi prašni delci vplivajo na plazmo, v kateri se nahajajo. Zaradi prašnih delcev lahko v plazmi nastanejo nove nestabilnosti, ki spremenijo obnašanje plazme. Prašna zrna imajo negativen naboj, ker zbirajo elektrone iz okoliške plazme. Fotoemisija zaradi ultravijoličnega sevanja in termična emisija zrn, segrelih zaradi radioaktivnih izvorov, lahko povzročita, da se prašna zrna pozitivno nabijejo. Če je energija fotonov večja od fotoelektričnega dela prašnih zrn in manjša od ionizacijskega potenciala nevtralnih atomov, prašna zrna predstavljajo izvore ionizacije, če v bližini ni drugih virov. Pozitivno nabiti prašni delci obstajajo v zemljini mezosferi, v repih kometov in v medzvezdnih prašnih oblakih blizu svetlih zvezd.

## 2.4 Uporaba plazme

Plazma se dandanes uporablja na številnih področjih tehnologije. Najpomembnejše področje razvoja plazme je gradnja in uporaba fuzijskih reaktorjev za pridobivanje električne energije.

V industriji jo uporabljamo za obdelavo različnih materialov, v namen domače uporabe jo srečamo v plazemskih TV zaslonih, v neonskih lučeh na avtomobilih, fluorescentnih sijalkah, uporabljamo jo pa tudi za razgradnjo različnih odpadkov in procesiranje hrane.

### 2.4.1 Plazemska krogla

Plazemska krogla deluje podobno kot kondenzator, ki ga polnimo oziroma praznimo z izmeničnim tokom. V plazemski luči določa razdaljo med ploščama kondenzatorja napetost izvira in hitrost oscilacije toka. Namesto ene plošče uporabimo majhno elektrodo kroglaste oblike, namesto druge pa elektrodo, ki se nahaja v notranjosti izvira napetosti. Izolator predstavljajo zrak v krogli, steklena krogla in zrak zunaj krogle. Plin ionizira, ko je električno polje med elektrodama dovolj visoko in tako nastane ioniziran plin, ki je dober prevodnik električnega toka. Elektroni, ki se med tem procesom vrnejo v osnovno ali nižje vzbujeno stanje sevajo foton.

Kakšne barve je svetloba, je odvisno od plina, s katerim je napolnjena steklena posoda.

Če tlak v posodi zmanjšamo, postane plin bolj prevoden in razdalja med elektrodama se lahko poveča, tako tudi lažje opazimo svetlobo med njima. Ker sta napetost in električno polje med elektrodama dovolj velika, kondenzator konstantno prevaja tok.

Plin med obema elektrodama je dovolj prevoden, da skozenj konstantno teče tok, če imamo v posodi napetost približno 2000 V, tlak približno 1,5 kPa, frekvenca 10000 Hz in plošči razmaknjeni za nekaj centimetrov. Ker skozi kroglo teče približno ves čas enak tok, bi morala biti intenziteta svetlobe približno konstantna, vendar je zaradi majhnih variacij v temperaturi plina, v nekaterih odsekih bolj prevoden. Tok teče skozi območja z manjšo upornostjo, zaradi tega teče skozi toplejša območja, katera se še bolj segrejejo. Več toka skozi

določeno območje pomeni, da se bo izsevalo več fotonov in zaradi tega so takšna območja svetlejša.

Plini v krogli določajo barvo svetlobe, saj vsak izmed njih sveti s svojo lastno barvo. Najbolj uporabljeni plini v plazemskih kroglah so argon (sveti v modri barvi), neon (sveti v rdeči barvi), dušik (sveti v beli barvi).

Ko skozi del zraka steče električni tok, se zrak v tej točki segreje in zaradi dviganja toplega zraka se tokovnice v plazemskih kroglah začno gibati proti vrhu sfere.

Pojav, ko se tokovnice odebelijo, kadar se dotaknemo krogle z roko, je vzrok kapacitivne sklopitve.

Kapacitivna sklopitev pomeni, da se s pomočjo električnega polja med sabo sklenejo dve strani tokokroga skozi plošči kondenzatorja. Naboj na kondenzatorju se spremeni in ko se z roko dotaknemo krogle, se poveča sposobnost prevajanja električnega toka in je zaradi tega okoli točke, kjer se dotaknemo, močnejše električno polje. To pomeni da tam lažje teče tok in tokovnice močnejše žarijo.



Slika 3: Plazemska krogla

#### 2.4.2 Fluorescentna svetilka

Fluorescentna svetilka je cev, napolnjena s plinom, skozi katero potem teče električni tok. Tok elektronov zadeva ob atome plina. Elektroni plina absorbirajo kinetično energijo elektrona in preidejo v nestabilno višje vzbujeno stanje. V takšnem stanju ne ostanejo dolgo in se vrnejo v stabilno nižje vzbujeno stanje, pri čemer pa izsevajo foton z valovno dolžino ultravijolične svetlobe.

Ker bi pa želeli imeti foton z valovno dolžino vidnega spektra svetlobe, prevlečemo stene cevi z fosforjem. Ob interakciji ultravijolične svetlobe s steno, fotoni vzbudijo elektrone fosforja v višje nestabilno vzbujeno stanje. Ob vrnitvi elektrona v stabilno nižje vzbujeno stanje ti izsevajo foton vidne svetlobe.



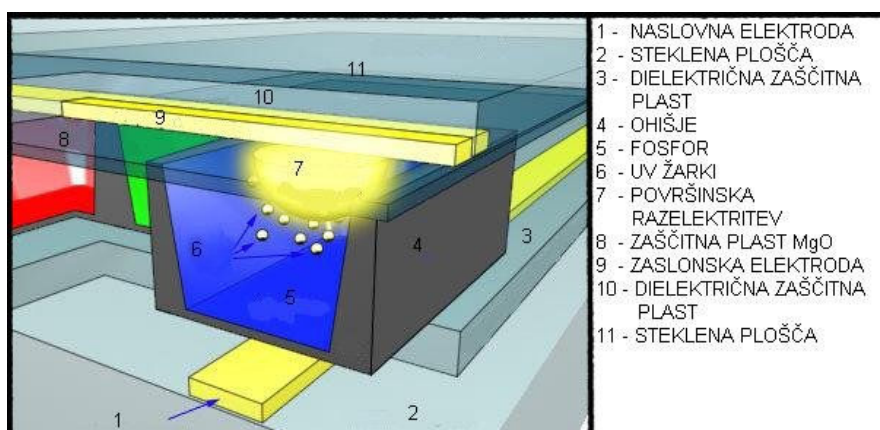
Slika 4: Fluorescentna svetilka

### 2.4.3 Plazemski zaslon

Plazemski zaslon sestavljajo milijoni celic, napolnjenih z plinom neon in ksenon, postavljenih med dvema steklenima ploščama in elektrodama. Naslovne elektrode so za celicami vzdolž zadnje steklene plošče. Zaslonske elektrode so na vrhnji strani celic in jih na spodnji strani obdaja magnezijev oksid, na zgornji pa

dielektrična plast in steklo. Naslovne elektrode so postavljene vodoravno, zaslonske elektrode pa navpično in skupaj tvorijo mrežo. Kjer se elektrodi pod napetostjo križata, teče skozi celico električni tok. Tok elektronov zadane elektrone atomov plina, ti pa absorbirajo kinetično energijo in preidejo v nestabilno višje vzbujeno stanje.

Pri prehodu v stabilno nižje vzbujeno stanje izseva ultravijolični foton, ta pa zadane stene celice iz fosforja in celica zasveti. S spreminjanjem toka tako določimo intenzivnost celice, ki lahko sveti v rdeči, zeleni in modri svetlobi. Vsak piksel sestavljajo tri celice vsake barve in pri mešanju le-teh nastanejo skoraj vse vidne barve. Prednost takšnih zaslonov je, da debelina zaslona ni odvisna od njegove širine kot pri katodnem zaslonu, slika je vidna iz večih zornih kotov in je relativno svetla. Šibkost takšnih zaslonov se pokaže v širini barv, saj ne moremo doseči vseh barvnih odtenkov, vendar te razlike opazijo le redki.



Slika 5 : Plazemski zaslon

### 2.4.4 Čiščenje s plazmo

Plazemsko čiščenje uporabljamo predvsem za čiščenje tankih filmov, ki jih z navadnimi metodami ne moremo odstraniti. Primerno je za čiščenje organskih ostankov iz površine, vendar je izbira plazmatskega plina ključnega pomena, saj se vsaka površina ob interakciji s plazmo drugače obnaša. Ob interakciji plazme s površino se ioni "smeti" vežejo z ioni plazme, tako nastanejo nove nevtralne molekule, ki se odcepijo s površine in je tako spet čista.



Slika 6: Čiščenje s plazmo

### 2.4.5 Plazemski CNC stroj

CNC stroji so postali nuja v proizvodnji, saj s svojo hitrostjo in natančnostjo nadomestijo človeka.

Plazemski CNC je sposoben narediti ostre reze na 0,254 mm natančno v relativno kratkem času, rezalna hitrost je približno 6 m/s. Rezilo pri plazemskem CNC stroju je curek plazme, debeline 5-160 mm in temperature 30000 K. Curek plazme vsebuje pline, največkrat so to argon, kisik in dušik. Curek omejujemo z zaščitnimi plini, ki prihajajo iz stranskih kanalov šobe. Takšne stroje uporabljajo v aeronavtiki, avtomobilski industriji, uporabni so pa tudi za izdelave skulptur.



*Slika 7: Plazemski C N C stroj*

### 3. FUZIJA

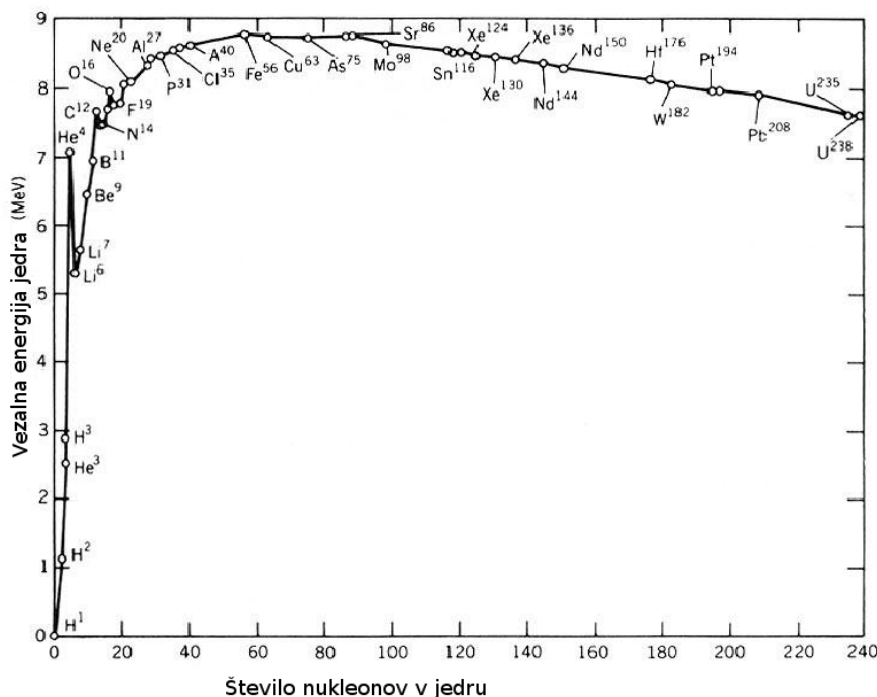
#### 3.1 Energija fuzije

Dalj časa je že znano, da masa elementov ni enaka seštevku protonov in nevtronov v njej in da se določena masa spremeni v energijo. Energija je vezalna energija, ki veže skupaj jedro, tako imenovana jedrska sila. Masi, ki se spremeni v energijo, pravimo masni defekt in ga lahko zapišemo z enačbo

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_z,$$

pri kateri je  $Z$  število protonov v jedru,  $A$  relativna atomska masa,  $m_p$  je masa protonov  $m_n$  masa nevtrona in  $m_z$  dejanska masa jedra. Masni defekt se potem pretvori v vezalno energijo jedra po Einsteinovi formuli  $E_v = \Delta mc^2$ . Vezalna energija je energija, ki veže nukleone v jedru in jo moramo dovesti, če želimo jedro razbiti.

Vezalna energija elementov narašča do Železa (60), kjer doseže svoj maksimum in prične padati.

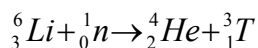


Graf 1: Vezalne energije

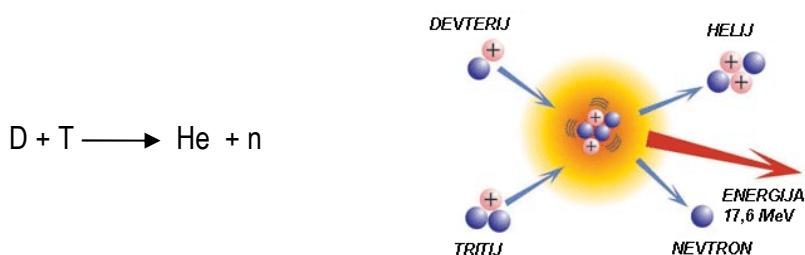
Iz grafa lahko razberemo, da je najmanj energije potrebno vložiti za zlitje vodika in njegovih izotopov. V fuzijskem reaktorju bomo torej zivali jedra vodika oz. njegovih izotopov, ker jih je najlažje »prisiliti« v zlitje.

### 3.2 D-T reakcija

V reakciji sodelujeta tritij in devterij. Devterij je izotop vodika in ga najdemo v težki (morski) vodi, njegov delež je 1 atom devterija na 6400 atomov vodika. Pridobivamo ga z elektrolizo vode. Tritij je radioaktiven vodikov izotop z razpolovno dobo 12,32 let, na Zemlji ga ni v naravni obliki, zato ga pridobivamo z obstreljevanjem litija-6 z nevtroni.



Devterij in tritij se zlivata po naslednji enačbi



Torej je vsota masa devterija in tritija enaka vsoti mas helija in nevtrona ter masi ki se je pretvorila v energijo.

$$m_D + m_T = m_{He} + m_n + \Delta m$$

Vse mase so nam znane, le masa, ki se pretvori v energijo, ne:

$$\Delta m = (m_D + m_T) - (m_{He} + m_n) ,$$

kjer je masa devterija  $m_D = 3,343537 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , masa tritija  $m_T = 5,007349 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , masa helija  $m_{He} = 6,64464 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  in masa nevtrona  $m_n = 1,674927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Masa, ki se je pretvorila v energijo, je

$$\Delta m = 0,031319 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Energija reakcij je

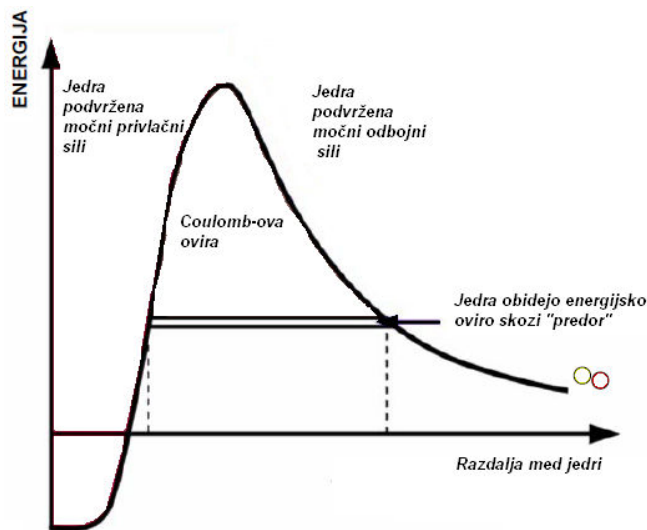
$$E_{DT} = \Delta m \cdot c^2 = 2,8187 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$E_{DT} = 17,59 \text{ MeV}$$

Pri zlitju jedra tritija in devterija se bo sprostila energija 17,6 MeV.



Jedri se bosta zlili, ko bo močna jedrska sila premagala coloumbovsko odbojno silo med jedri, ki pada s kvadratom oddaljenosti od jedra in narašča z velikostjo naboja jedra.



Graf 2: Potencialna energija jedra

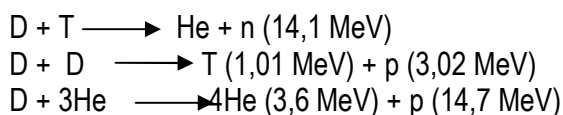
Jedra morajo torej imeti relativno veliko kinetično energijo, da premagajo odbojno silo. Energije, ki ustrezajo tem hitrostim, so od 10 keV do 100 keV. Z enačbi za gibanje plinov lahko izračunamo, kakšna temperatura ustreza tej energiji, če ti dve energiji delimo z Boltzmanovo konstanto in pomnožimo z 2/3.

$$W_k = \frac{3}{2} kT$$

$$T = \frac{2W_k}{3k} = \frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}} \approx 10^8 \text{ K}$$

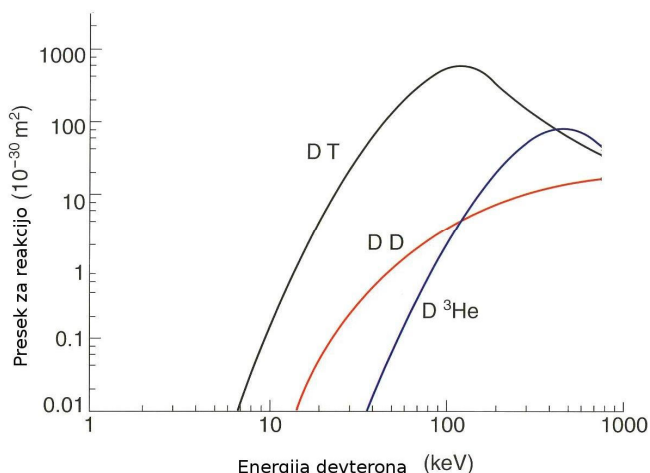
Tako dobimo temperature od  $10^8$  do  $10^9$  Kelvina. Pri takšnih temperaturah so vse snovi v obliki plazme.

Reakcije, ki bi lahko prišle v upoštevanje:



Presek reakcije nam pove, kakšna je verjetnost, da se bo zgodil mikrofizikalni pojav. Preseki reakcij v odvisnosti od temperature naraščajo s temperaturo do vrednosti, ko je kinetična energija atomov oz. molekul tako velika, da z veliko verjetnostjo uidejo in ne pride do reakcije ter pričnejo padati.

Preseki reakcij za te tri reakcije, glede na energijo devetrona, v odvisnosti od temperature vidimo na Grafu 2.



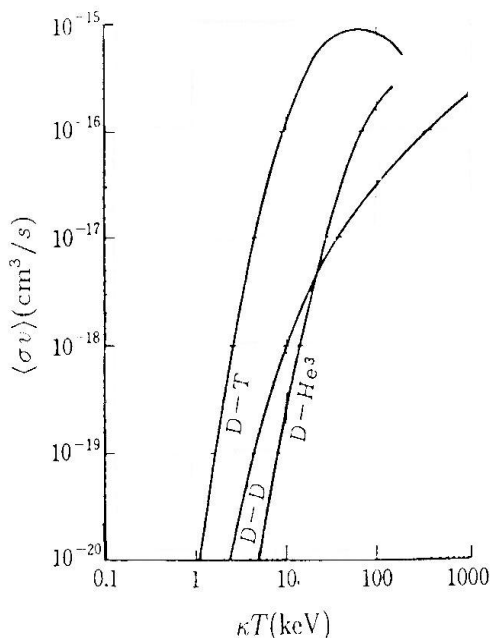
Iz grafa vidimo, da ima najnižjo temperaturo za največji presek D-T reakcija in zaradi tega jo je najlažje doseči. Reaktivnost D-T nam pove, koliko fuzijskih reakcij se lahko zgodi na enoto časa in prostornine, katera je povprečje preseka reakcije in relativne hitrosti devterona in tritona.

Graf 3: Preseki reakcij

### 3.2 Energijska poravnava

Za vžig plazme je potrebna neka gostota moči, odvisna od energije, ki jo dobimo iz fuzije,  $\langle\sigma v\rangle$  integrala ter gostote ionov ki sodelujejo pri fuziji.

$\langle\sigma v\rangle$  integrala nam pove, koliko jeder devterija in tritija se bo zlilo v kubičnem metru plazme v eni sekundi. Na grafih prikazujemo odvisnost  $\langle\sigma v\rangle$  integrala od temperature.



Reakcija	Optimalna temperatura $\kappa T$ [keV]	Vrednost $\langle\sigma v\rangle$ integrala deljenega z temperaturo $[\text{m}^3/\text{s}/(\text{keV})^2]$
D - T	13.6	$1,24 \cdot 10^{-24}$
D - D	15	$1,28 \cdot 10^{-26}$
D - He <sup>3</sup>	58	$2,26 \cdot 10^{-26}$

Tabela 1: Odvisnost integrala  $\langle\sigma v\rangle$  od temperature

Graf 4: Odvisnost integrala  $\langle\sigma v\rangle$  od temperature

Fuzijsko gostoto moči ( $P_f$ ) ene reakcije izračunamo s produktom devterijevih ( $n_D$ ) in tritijevih ( $n_T$ ) ionov,  $\langle\sigma v\rangle$  integrala, ter energije sproščene ob fuziji ( $E_{DT}$ )

$$P_f = n_D n_T \langle\sigma v\rangle E_{DT} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (\text{enačba iz knjige John Wesson, Tokamaks})$$

vsota gostot vseh ionov ( $n$ ) v reakciji enaka seštevku devterijevih ( $n_D$ ) in tritijevih ( $n_T$ ) ionov je potem fuzijska moč :

$$n_T + n_D = n$$

$$p_f = n_D (n - n_D) \langle\sigma v\rangle E_{DT} \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

Gostota moči je največja takrat, kadar je gostota ionov devterija enaka vsoti gostot tritija

$$n_T = n_D = \frac{n}{2}$$

$$P_f = \frac{n^2 \langle\sigma v\rangle E_{DT}}{4} \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

Energija ( $W_i$ ) ki je potrebna za ohranjanje temperature  $T$  za posamezni ion v reakciji je

$$W_i = \frac{3kT}{2} ,$$

ker v eni reakciji sodelujeta ion devterija in ion tritija, je energija za ohranjanje energije  $n$ -tih reakcij

$$W_i = 3nkT$$

Moč izgub ( $P_{izg}$ ) v času zadrževanja fuzijske energije ( $t_{vzd}$ ) je enaka

$$P_{izg} = \frac{W_i}{t_{vzd}}$$

Plazmo moramo torej dodatno greti, da izenačimo izgube, ki so nastale zaradi različnih razlogov, kot je na primer neurejeno gibanje plazme.

Izgube lahko nadomestimo z dodatnim gretjem ( $P_g$ ) ki je ekvivalentno izgubam  $P_{izg} = P_g$ .

$$t_{vzd} = \frac{W_i}{P_{izg}}$$

### 3.3 Lawsonov produkt

Ob fuziji devterija in tritija nastane Helij (alfa delec) in nevtron. Nevtrona magnetno polje ne more zadržati, zaradi tega se v magnetnem zadrževanju njegova energija uporabi za pridobivanje električne energije, alfa delec pa lahko zadrži za nekaj časa in ker ima relativno visoko energijo, lahko greje plazmo. Dovolj velika gostota alfa delcev na enoto prostornine in časa bi omogočila, da dodatno greetje ne bi bilo več potrebno oz. bi se plazma sama vzdrževala.

Gostota moči alfa delcev je

$$P_\alpha = \frac{n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha}{4} \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

Kjer je  $n$  število delcev alfa,  $\langle \sigma v \rangle$  vrednost integrala  $\langle \sigma v \rangle$ ,  $E_\alpha$  energija delca alfa.

Gostota moči delcev alfa bo torej kompenzirala vse izgube, ko bo enaka gostoti moči izgub

$$P_{izg} = P_\alpha$$

Vstavimo enačbo za gostoto moči delcev alfa in izgub

$$\frac{W_i}{t_{vzd}} = \frac{n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha}{4}$$

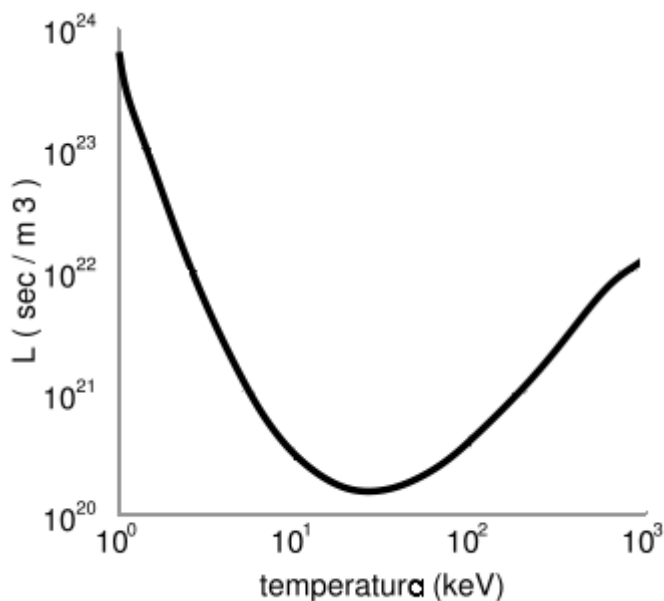
Sedaj vstavimo še energijo, ki jo izgubijo ioni

$$\frac{3nkT}{t_{vzd}} = \frac{n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha}{4}$$

Izrazimo gostoto ionov in čas vzdrževanja reakcije

$$nt_{vzd} = \frac{12kT}{\langle\sigma v\rangle E_{\alpha}} \left[ \frac{s}{m^3} \right]$$

Produkt gostote ionov oz. plazme ter časa vzdrževanja energije imenujemo Lawsonov produkt, ki določa kako dolgo in pri kakšni temperaturi moramo vzdrževati gostoto plazme, da lahko segreva samo sebe.



Graf 5: Lawsonov kriterij

Izračunajmo sedaj potrebno gostoto plazme in čas omejevanja za vžig plazme:

Pri temperaturi  $kT = 10 \text{ keV}$  ima integral vrednost  $1,1 \times 10^{-22}$ , ko delimo to z  $(kT)^2$

$$\langle\sigma v\rangle / (kT)^2 = 1,1 \times 10^{-24} \frac{\langle\sigma v\rangle}{(kT)^2}$$

$$E_{\alpha} = 3500 \text{ keV}$$

Sedaj zapišemo enačbo za Lawsonov produkt:

$$nt_{vzd} kT = \frac{12(kT)^2}{\langle\sigma v\rangle E_{\alpha}}$$

$$nt_{vzd} kT = \frac{12 (kT)^2}{E_{\alpha} \langle\sigma v\rangle}$$

Ker imamo vrednost integrala  $\langle \sigma v \rangle$  pri temperaturi  $(kT)^2$  je ta vrednost obratna od drugega dela na desni strani enačbe, zato sledi

$$nt_{vzd}kT = \frac{12}{3500 \text{ keV}} \cdot \left( 1,1 \cdot 10^{-24} \frac{\langle \sigma v \rangle}{(kT)^2} \right)^{-1}$$

je približno večji od

$$nt_{vzd}kT \geq 3 \cdot 10^{21} \frac{\text{keVs}}{\text{m}^3}$$

Vžig plazme se bo torej zgodil, ko bomo zagotovili gostoto plazme  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ , temperaturo  $10 \text{ keV}$ , ki ustreza približno  $7 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C}$ , ter jo pri takšnih pogojih vzdrževali več kot 3 sekunde.

Sedaj izračunajmo še približni tlak pri katerem moramo vzdrževati plazmo:

$$pV = NkT$$

$p$  je tlak,  $V$  je volumen,  $N$  je število delcev,  $kT$  je temperatura za idealni plin in zaradi tega je to približek.

Podano imamo gostoto delcev na prostornino  $n$  in zato sledi,

$$n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$kT = 10 \text{ keV} = 10000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

$$p = nkT$$

$$p = 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

$$p = 1,602 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Tlak v komori, kjer vzdržujemo plazmo, je torej približno 1,6 bara.

Najpogostejše naprave oz. posode, ki so sposobne oz. izdelane za vzdrževanje plazme, so tokamaki in stelaratorji. V teh posodah grejemo plazmo s pomočjo inducirane električne napetosti, plazmo pa omejujemo z toroidalnim in poloidalnim magnetnim poljem v tokamaku, ter z helikoidalnim in poloidalnim magnetnim poljem v stelaratorjih. Stelaratorji imajo prednost, da zaradi zahtevne izdelave magnetov lahko vzdržujemo plazmo brez omejitve časa. Dandanes se uporabljajo samo za raziskave plazme in magnetne dinamike tekočin in niso predvideni za uporabo v fuzijski elektrarni.

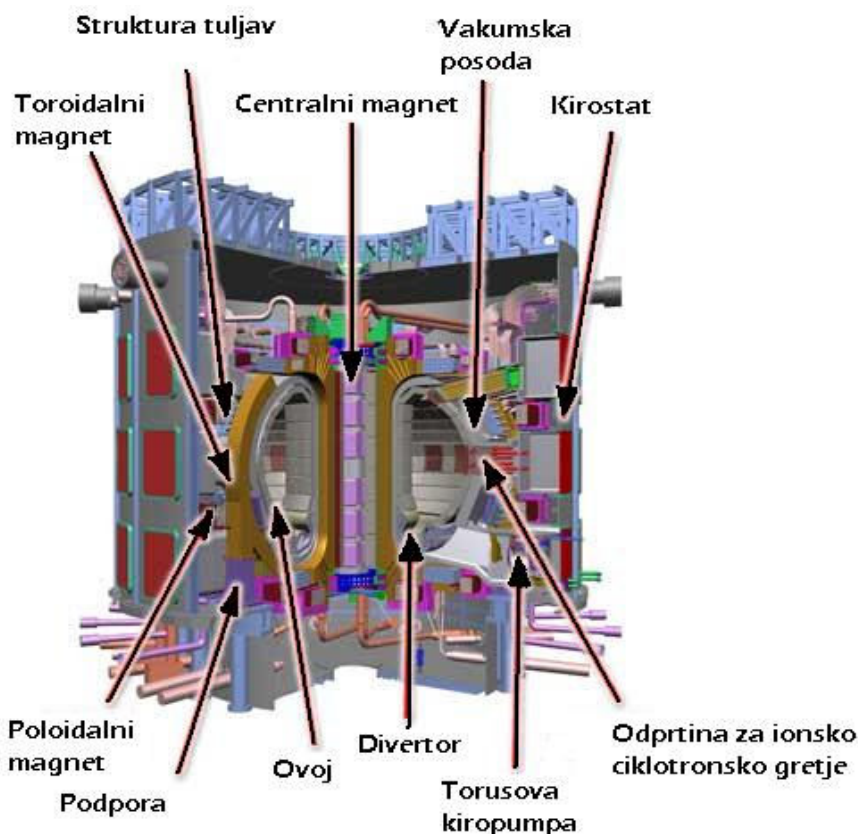
## 4. TOKAMAK

Okoli leta petdeset 19. stoletja sta se ruska znanstvenika Igor Jevgenjevič Tamm in Andrej Dimitrijevič Saharov domislila, da bi z magnetnim poljem v obliki torusa omejevali zelo vročo plazmo in tako kontrolirano nadzorovali jedrsko zlivanje. Leta 1951 sta zasnovala tako imenovano napravo tokamak, katere temelj je bil na toroidalnem magnetnem polju. Tokamak je transkripcija ruske besede Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) in v slovenskem prevodu pomeni toroidna komora z magnetnimi ovoji. Na inštitutu Kurčatova so zgradili tokamak imenovan T-15 in v njem dosegli temperaturo elektrona več kot 1 keV; to je preseglo vsa pričakovanja. Leta 1968 so na mednarodni konferenci o fiziki plazme in raziskovanju nadzorovanega zlivanja jeder v ruskem mestu Novosibirsk objavili to novico. Britanske in Ameriške znanstvenike je to zelo presenetilo in so pohiteli pogledati eksperiment, da bi preverili, če je to res. V jedrskem zlivanju se je tako rodila nova naprava za vzdrževanje plazme pri visokih temperaturah z magnetnim poljem in je še danes osnova za večino civilnih raziskovanj na področju jedrske fuzije. Tokamak je povzročil majhno revolucijo na področju jedrskega zlivanja in nam ponudil možnost uresničitve »umetnega sonca na zemlji«. Po svetu je kar nekaj takšnih naprav, ki so namenjene raziskovanju plazme, največji izmed njih je mednarodni projekt ITER ter še nekaj ostalih večjih projektov na področju fuzije s tokamaki.

### 4.1 Zgradba tokamaka

Tokamak je naprava, ki jo sestavlja na milijone delcev, omenil bom le najbolj pomembne.

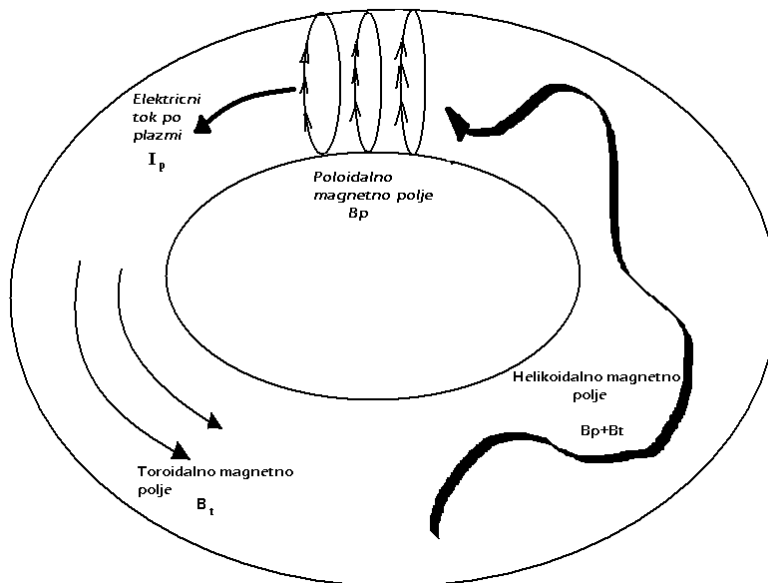
Glavni del tokamaka so superprevodni magneti, ki tvorijo magnetno polje v obliki torusa in zunanji poloidalni superprevodni magneti. Na sliki ni narisanih naprav za dodatna gretja, ki so opisane v naslednjih točkah. Zgradba tokamaka je takšna, da je čim manj nepravilnosti v njegovem magnetnem polju.



Slika 8: Tokamak

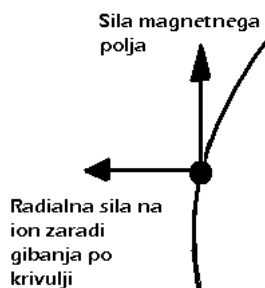
## 4.2 Magnetno polje tokamaka

Tokamakovo magnetno polje je sestavljeno iz toroidalnega in poloidalnega magnetnega polja, ki skupaj tvorita helikoidalno magnetno polje. Skupno helikoidalno magnetno polje je vektorski seštevek toroidalnega in poloidalnega magnetnega polja.



Slika 9: Magnetna polja tokamaka

Toroidalno magnetno polje je osnovno magnetno polje tokamaka. Ima obliko zračnice in navitja okoli nje. Plazma je ionizirana snov in zaradi tega dober električni prevodnik. Magnetno polje povzroči indukcijo napetosti v plazmi, zaradi tega po plazmi steče tok in se obnaša kot vodnik v magnetnem polju. Sedaj, ko po plazmi teče tok, se devterijeji in tritijeji ioni gibljejo pospešeno, saj na njih deluje sila magnetnega polja. Gibljejo se okoli nekega središča in zaradi tega na njih deluje centrifugalna sila. Centrifugalna sila je odvisna od hitrosti in mase delca ter polmera tirnice, po kateri se delec giblje. Delec se giblje pospešeno, zaradi tega mu hitrost s časom narašča, naraščanje hitrosti pa pomeni, da bo delec slej ko prej trčil v steno tokamaka.



Slika 10: Silnice na ion v tokamakovem magnetnem polju v ravnini

Trka takšne vroče plazme ne preživi noben material. Toroidalnemu polju dodamo poloidalno magnetno polje in tako preprečimo, da bi plazma prišla v stik s steno pred njenim vžigom. Magnetno polje je sedaj zvito v spiralo, plazma pa počasi leze okoli centra spirale, kar povzroča inducirani električni tok.



Plazma mora imeti dovolj veliko magnetno polje, da delci ne pobegnejo iz njega in da zagotovimo dovolj velik tok plazme. Gostote magnetnih polj v tokamakih znašajo do 10 T, kar je do 140 tisočkrat večje magnetno polje kot zemljino. Tolikšno gostoto magnetnega polja dosežemo lahko le z superprevodnimi elektromagneti. Takšnim gostotam magnetnih polj ustrezajo tokovi do 7 MA, kar pomeni, da bi lahko s tokom iz plazme napajali 30 milijonov 50 W žarnic.

Žarnice se segrevajo, ko čez njih teče tok, prav tako se tudi plazma, ko čez njo teče tok, in to je osnovna vrsta segrevanja plazme v tokamaku. Gostota gretja mora biti na enoto časa dovolj velika, da se plazma lahko vžge in zato samo ohmsko gretje ni dovolj.

### 4.3 Ohmsko gretje

Pri nižjih temperaturah je ohmsko gretje zelo učinkovito. Ker pa se upornost spreminja z naraščanjem temperature, je le-to manj učinkovito pri visokih temperaturah. Gostoto moči ohmskega gretja določa električna upornost plazme, ki je funkcija od temperature in kvadrat gostote električnega toka v plazmi. Ohmsko gretje bo torej plazmo segrelo le do določene temperature. Ko bo upornost blizu nič ohmov, se plazma ne bo več segrevala, in verjetnost, da bomo dosegli zlitje, se zniža. Gostoto ohmskega gretja, da pokrije izgube, nam določa enačba:

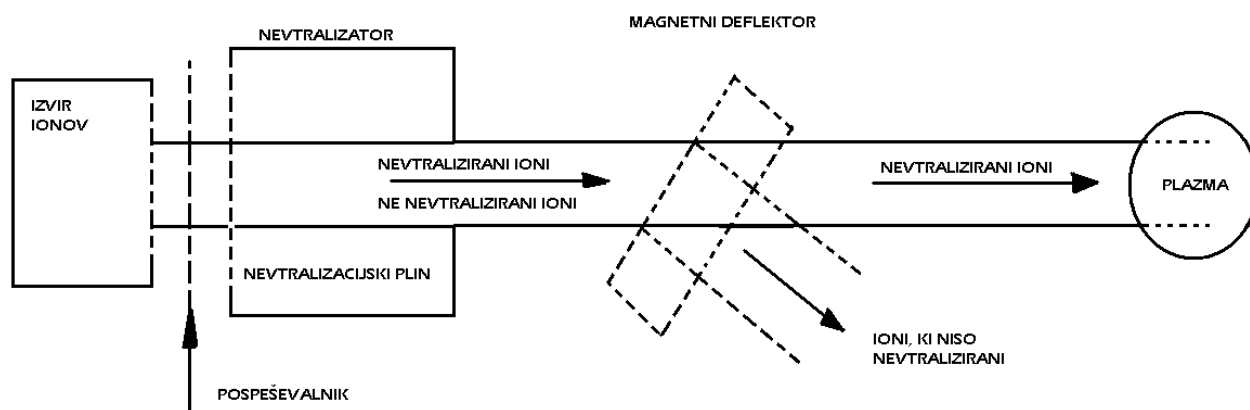
$$P_{\Omega} = \frac{0.10}{T^{3/2}} MWm^{-3} \quad (\text{Izpeljava enačbe iz knjige Tokamaks, John Wesson, 2004}),$$

to pomeni, da nam bo pri temperaturi plazme 10 keV in volumnom 1 m<sup>3</sup> ohmsko gretje grelo približno z močjo 3 MW. To pa vseeno ni dovolj vroča in gosta plazma za vžig. Zaradi tega so potrebna dodatna gretja. Dodatno gretje se izvaja na dva načina: prvi način je z visoko energijskimi elektromagnetnimi valovi, ki jih pošiljamo v plazmo, drugi pa vbrizgavanje nevtralnih ionov, ki oddajo svojo energijo plazmi.

### 4.4 Gretje z nevtralnimi ioni

Gretje z nevtralnimi ioni dobimo z vbrizgavanjem pospešenih nevtralnih delcev v plazmo. Potrebujemo torej pospeševalnik delcev, ki bo pospeševal negativne ione, in nevtralizator, ki jih bo nevtraliziral. Želena energija pospešenih delcev je okoli 500 do 1000 keV. Ioni morajo biti nevtralni, ker v primeru, da niso, ne morejo vstopiti v plazmo zaradi močnega magnetnega polja.

S pospeševalnikom pospešimo izvor ionov, kateri se v nevtralizatorju nevtralizirajo. Nevtralizirani atomi so težji od ionov in zaradi tega imajo manjše hitrosti. Njihove energije so manjše za polovico in več in zaradi tega bolje ogrejejo robove plazme. Ione, ki se niso nevtralizirali, odstranimo z magnetnim deflektorjem, s katerim usmerjamo pot ionov.



Slika 11: Pospeševalnik nevtralnih ionov

Z ionskim gretjem povečamo plazmi temperaturo tudi za dvakratno vrednost in je zelo pomembno za vzdrževanje plazme. Najtežje pri izdelavi naprav za tovrstno gretje je dolžina pulza vbrizga, ki mora biti kar se da dolg.

#### 4.5 Radio frekvenčno gretje

Antene so nameščene neposredno znotraj tokamaka in so najbolj učinkovito gretje plazme v tokamaku. V plazmo pošiljamo elektromagnetne valove z visokimi energijami z RF antenami. Gretje plazme z visoko energijskimi elektromagnetnimi valovi poteka preko resonančne absorpcije in ga razdelimo na tri dele:

- ionsko ciklotronsko resonančno radio frekvenčno gretje s frekvencami od 22 MHz do 60 MHz na ionski ciklotronski frekvenci;
- elektronsko ciklotronsko resonančno gretje s frekvencami od 20 GHz do 250 GHz na elektronski ciklotronski frekvenci;
- radio frekvenčno gretje pri spodnji hibridni frekvenci od 1 GHz do 8 GHz.



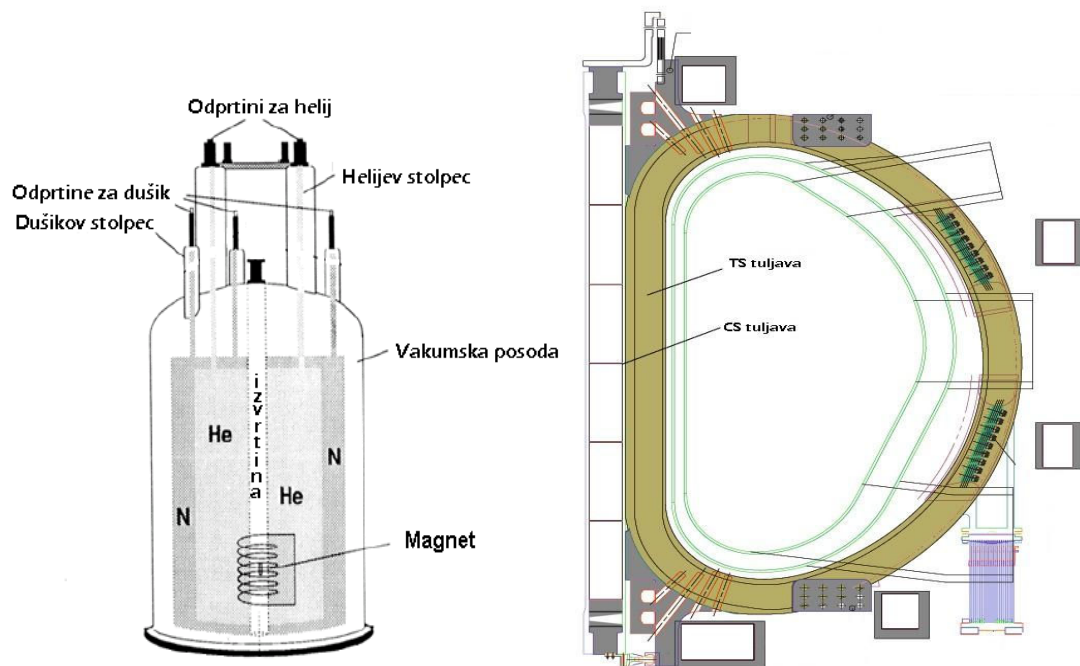
Slika 12: Radio frekvenčna antena

## 4.6 Superprevodni magneti

Zagotavljanje dovolj gostega in močnega magnetnega polja za zadrževanje plazme lahko omogočamo le s super prevodnimi elektromagneti. Ker so vodniki magnetov ohlajeni na temperature blizu absolutne ničle se skoraj vsa električna pretvori v magnetno saj so izgube zaradi nizke ohmske upornosti vodnikov zanemarljive. Ohmska upornost vodnikov pri nizkih temperaturah je nizka, ker se elektroni gibljejo brez energijskih izgub. Magnetu tako povečamo izkoristek ter s tem njegovo učinkovitost in dosežemo relativno velike gostote magnetnih polj z malo vložene električne energije, glede na navadne elektromagnete.

Magneti so hlajeni s tekočim helijem, ki ima temperaturo pod 10 K. Tekoči vodik in magnet sta skupaj v posodi ki je termično izolirana, da ohranja helijevo temperaturo. Da preprečimo, da bi helij zavrel, ima ponavadi posoda še en ovoj, ki je napolnjen s tekočim dušikom in ima temperaturo okoli 77 K in je dokaj poceni. Velikost magnetnega polja je omejena z dvema faktorjema, eden je velikost magnetnega polja pri katerem superprevodni material ni več super prevoden, imenujemo ga kritično polje, drugi pa je kritični tok, pri katerem preneha biti superprevoden. Superprevodni magneti z boljšim materialom lahko dosežejo večjo gostoto lastnega magnetnega polja. Material, ki je najbolj pogosto uporabljen za superprevodne magnetne, je nobij-titan. Ta material ima kritično temperaturo pri približno 10 K in gostoto magnetnega polja 15 T, za dosego večjih magnetnih polj se uporablja nobij-kositer. Nobij-kositer ima kritično temperaturo pri 18 K, vendar se uporablja pri 4.3 K, zaradi temperature vrelega helija. Pri takšni temperaturi lahko ima magnetno polje gostoto do 30 T.

Za fuzijski reaktor so superprevodni magneti ključnega pomena, ker je od njih posredno odvisen tudi Lawsonov kriterij. Premalo posvečene pozornosti razvijanja superprevodnih magnetov lahko ob zagonu reaktorja povzroči nedelovanje le-tega. V največjem projektu na področju fuzijskega reaktorja ITER in največjem pospeševalniku v CERN-u se dobro zavedajo tega. Znanstveniki iz obeh projektov sodelujejo in si izmenjujejo izkušnje.



Sliki 13,14: Superprevodni magnet, Super prevodni magnet tokamaka

## 4.7 Diverter

Diverter je edini del tokamaka, ki prihaja v stik z vročo plazmo segreto na 100 milijonov stopinj celzija. Nameščen je v spodnjem delu tokamaka in njegova namestitvev je konstruirana za menjavo v določenem časovnem obdobju. Diverterjeva površina je prekrita z volframom ki se je po eksperimentih pokazal za najbolj vzdržljivega in zadostil kriterije po toplotnem toku na enoto površine 20 MW/m<sup>2</sup>.

Namen diverterja je da ohranja plazmo čisto in odstranjuje helijev pepel ki nastaja ob zlivanju jeder devterija in tritija. Odstranjuje alfa delce, ki so oddali del svoje kinetične energije plazmi in se nadalje njihova energija uporabi za proizvodnjo električne energije. Zmanjša in preprečuje vstop nečistoč v glavno plazmo ki jo zadržujemo.

Diverter spremeni idealno obliko plazme in s tem povzroči majhne izgube v gretju plazme.

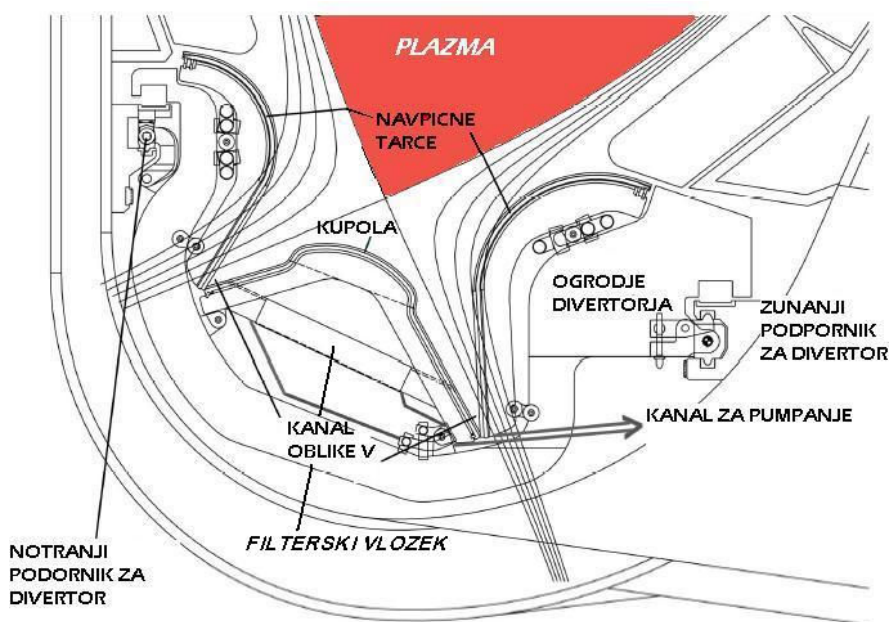


*Levo je prikazan presek plazme z diverterjem, desno brez njega. Iz slike je razvidno da diverter spremeni obliko plazmi in nima več popolne oblike.*

Slika 15: Oblika plazme

Sestavljajo ga kasete ( kasete diverterja), katere glavni deli so :

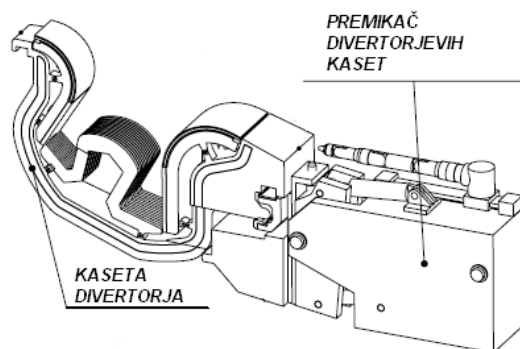
- ogrodje diverterja, ki služi kot ščit pred visokoenergijskimi nevtroni in je nosilec ostalih delov diverterja;
- zunanja in notranja navpična tarča, zgornja zmede hitre nevtrone, spodnja pa preusmeri tok plazme. Ta elementa sta edina ki sta v neposrednem stiku z glavno plazmo;
- kupola, ki je pod x-ločitveno točko, katera loči glavno plazmo od »umazane« plazme. Ščiti tudi vložek za črpanje »pepela« in nečistoč ;
- vložek za črpanje pepela in nečistoč, ki omogoča, da črpamo pepel in nečistoče iz tokamaka;
- notranji in zunanji podpornik, ki omogočata pritrditev diverterja znotraj tokamaka;
- kanal za črpanje, po katerem potujejo nečistoče in helijev pepel;
- kanal oblike V, v katerem so nečistoče in helijev pepel.



Slika 16: Diverter

Kot edini del, ki prihaja v stik z vročo plazmo, je diverter najbolj pomemben del tokamaka in zaradi spremembe magnetnega polja ki jo povzroča mora biti njegova izdelava brezhibna. Diverter se zaradi gostote energije, ki jo prejema, zelo segreva in ga je zaradi tega potrebno hladiti s tekočim helijem, kot magnetne.

Diverterjeve kasete je treba zamenjati, ko prestanejo določeno število ciklov. V ta namen ima tokamak posebne odprtine, skozi katere posebna naprava namesti kasete v tokamak. Naprava je premikač diverterjevih kaset (Cassette mover), ki kaseto zagradi, odstrani skozi odprtino za diverter in pripelje novo.

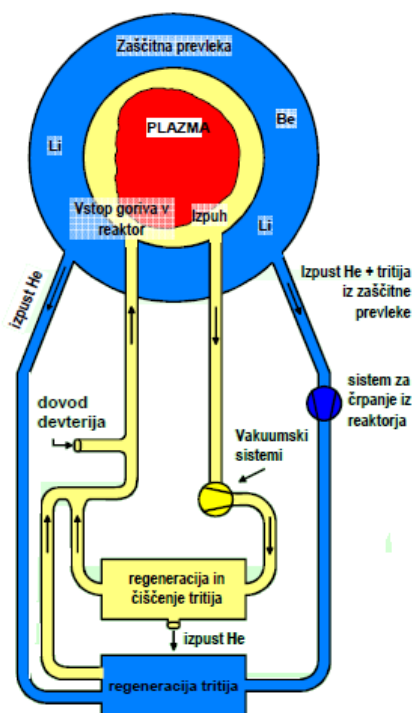


Slika 17: Premikač diverterja

## 5. TERMONUKLEARNA ELEKTRARNA

Komercialne fuzijske elektrarne morajo imeti razmerje med sproščeno energijo in vloženo energijo za gretje plazme večje od 30. Nekateri reaktorji so sedaj dosegli poravnavo, razmerje 1, to sta JET in JT60U. Princip delovanja takšne elektrarne je, od trenutka ko proizvedemo toplotno energijo, enak kot navadne termo elektrarne.

Toplota se iz reaktorja odvaja po ceveh z vodo, katero greje helijev pepel, ta pa preko izmenjevalnika toplote poganja turbino, ki poganja generator in ta potem pretvarja mehansko energijo v električno energijo. Potem ko helij in tritij oddata svojo energijo izmenjevalniku toplote, se tritij vrne v reaktor kot gorivo.



*Diverter odstranjuje nečistoče, ki jih črpa črpalka in potem po ceveh potujejo in oddajo svojo energijo toplotnemu izmenjevalniku (katerega ni na sliki). Potem se tritij regenerira in očisti, nato ga skupaj z devterijem pošljemo v reaktor. Pri fuzijski elektrarni je ta proces zelo pomemben, saj posredno z njim proizvajamo električno energijo. Toplotne izgube helija in tritija na poti do izmenjevalnika lahko znižajo izkoristek in takšna elektrarna ni več ekonomična.*

Slika 18: Regeneracija tritija

Fuzijska elektrarna ima naslednje pomembnejše stavbe:

A - tokamakova zgradba kjer je reaktor in kiostat

B - stavba za reciklažo tritija, vakumski sistemi, gorivo in servis

C - stavba v kateri je pospeševalnik nevtralniki ionov in napajalni sistemi za dodatna gretja

D - turbinska zgradba

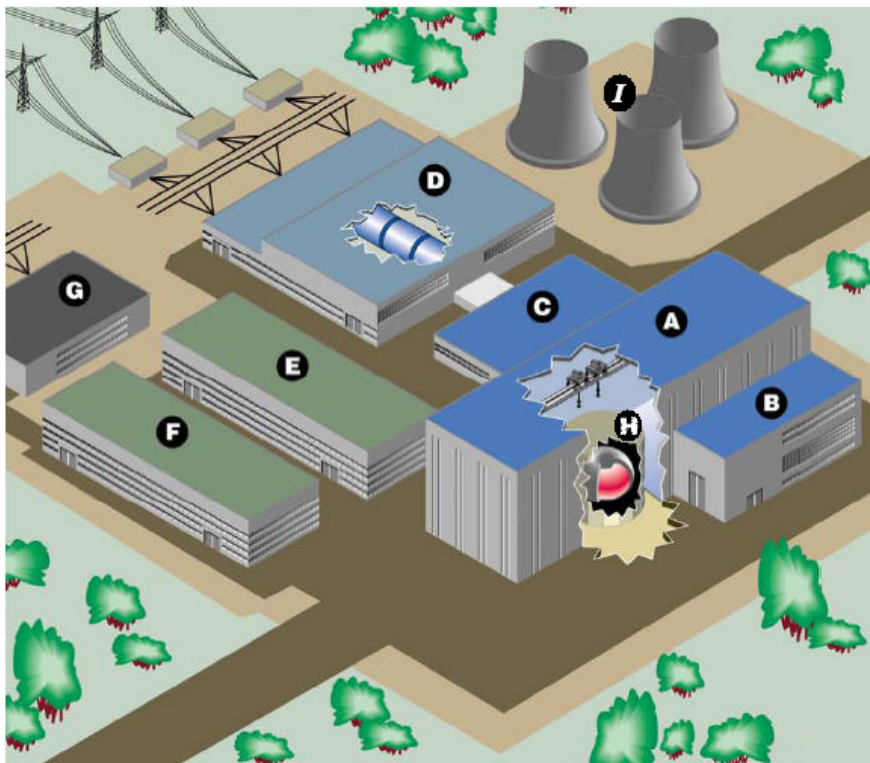
E - stavba za pretvorbo magnetne energije

F - kiro zgradba, kjer je vse v povezavi z hladilnimi sistemi magnetov in diverterja

G - pomožno napajanje

H - reaktor

I - hladilni stolpi



Slika 19: Fuzijska elektrarna

## 6. RAZPRAVA

Zlivanje jeder vodika v tokamakih je torej naravi prijazno in brez nevarnosti večjih nesreč, saj v reaktorju naenkrat gori le nekaj gramov goriva in se ob okvari plazma takoj ugasne. Radioaktivni deli so le obloge znotraj reaktorja, ki pa niso visoko radioaktivne in se razgradijo v nekaj deset letih. Njihovo skladiščenje je znotraj elektrarne, saj jih je količinsko malo. Ko bi dosegli energijsko poravnavo in nam ne bi bilo potrebno dovajati dodatne energija bi bila energija takšne elektrarne relativno poceni.

Fuzija je na papirjih znana že vrsto let, nam pa še vseeno ni uspelo doseči kontinuiranega zlivanja. Znanstvenikom so posebej neznanka ogromne koncentrirane energije, ki se sproščajo ob fuziji in ne moremo povsem trditi, kaj se zgodi z materiali, ki jih zadane tok visoko energijskih nevtronov.

Plazma nima povsem urejenega gibanja in zaradi tega ima izgube ki pa preprečujejo vžig plazme in zaradi tega so potrebna dodatna gretja plazme. Problem je predvsem pri dovajanju energije plazmi z nevtralnimi devterijevimi atomi, jih pospešiti do dovolj velikih energij in v pravem trenutku vbrizgati v plazmo.

Magneti znotraj kirostata so ohlajeni na temperature pod 80 K, znotraj reaktorja so pa temperature nad 100 milijonov Kelvina. Stene reaktorja morajo biti zelo dobri prevodniki, saj se stene segrevajo, četudi se plazma ne dotika sten, saj nekateri delci ( predvsem nevtroni ) uidejo magnetnemu polju.

Diverter je izpostavljen visokim energijam in zaradi tega se uporabljajo posebna navarjenja keramik, ki zdržijo takšne energije. Varjenje keramik na takšen način je zelo zahtevno in obenem mora ta navar prenesti tudi energije nevtronskega toka. Problematično je predvsem tudi odstranjevanje nečistoč, ki nastanejo zaradi interakcij delcev s stenami reaktorja.

ITER je projekt, v katerem sodelujejo Kitajska, Evropska Unija, Indija, Japonska, Koreja, Rusija ter ZDA. Trenutno je največji, najbolj perspektiven ter najdražji projekt na področju fuzije na svetu.

Zanj se razvijajo novi materiali, izdelujejo novi superprevodni magneti, izumljajo novi načini varjenja....

Tehnologije, ki se razvijajo, bodo uporabljene tudi v prvem polkomercialnem fuzijskem reaktorju DEMO.

Reaktor ITER bo zadrževal 840 m<sup>3</sup> plazme, po kateri bo tekel tok 15 MA, s pomočjo glavnega toroidalnega magnetnega polja 5.3 T na glavnem obsegu plazme. Trajanje pulza bo 400s moč, ki jo bo proizvajal, pa je enaka 500 MW, ionska temperatura plazme bo 8.9 keV. Plazma bo dodatno greta z ionskim nevtralnimi gretjem z močjo 16,5 MW, ter 60 MW radio frekvenčnih gretij skupaj 76,5 MW moči. Diverter za ITER je trenutno najbolj pomembna komponenta, ki je bila izdelana v zadnjem letu.

ITER je še eksperimentalni reaktor, s katerim želimo dokazati, da je kontinuirano fuzijo mogoče doseči.

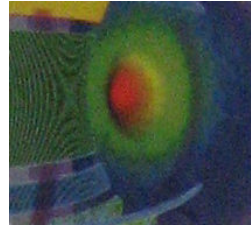
Večina komponent za ITER je razvitih in preizkušenih, sedaj delajo še izboljšave na materialih in poizkušajo prikazati obnašanje plazme z računalniškimi simulacijami. Pri projektih sodelujemo tudi Slovenci, saj na Inštitutu Jože Štefan, Univerzi v Novi Gorici, ter Fakulteti za strojništvo v Univerzi v Ljubljani potekajo raziskave za ITER.



Raziskave ITER v Sloveniji potekajo na naslednjih področjih:

- *Preračun porazdelitve toka nevtronov*

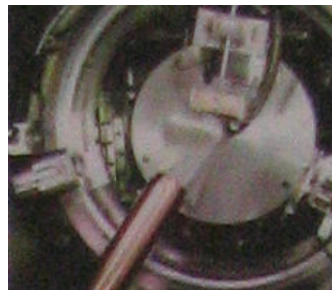
Smer in jakost nevtronskega toka je zelo pomembna, saj ga magnetno polje tokamaka ne more zadržati in moramo vedeti, kako se obnaša ter kakšna je njegova jakost in smer.



Slika 20: Nevtronsko polje

- *Interakcije vodika s stenami fuzijskega reaktorja*

Raziskave so pomembne za razumevanje pojavov v diverterju. Vzorce za materiale reaktorja izpostavljajo curku vodikovih atomov z visokimi energijami, zraven merijo količino vodika nad površino in pod njo.



Slika 21: Pospeševalnik vodikovih atomov

- *Študija procesov v stenah fuzijskega reaktorja*

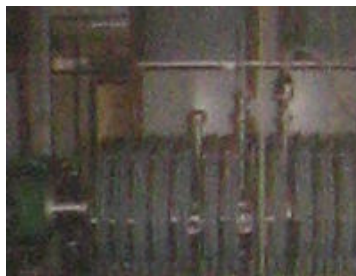
Ko vzdržujemo plazmo v tokamaku, so njegove stene zelo obremenjene, saj jih lahko med delovanjem zadane vroča plazma. Ves čas so izpostavljeni interakcijam z ioni in zaradi tega prihaja do erozije, odnašanja materiala in shranjevanja goriva v stenah. Za merjenje nabranega goriva v stenah reaktorja se uporabljajo analizne metode s hitrimi ioni sfokusiranimi na velikost mikro metra.



Slika 22: Naprava za merjenje goriva v stenah reaktorja

*- Interakcija plazme s stenami tokamaka*

Plazma se ne sme dotikati sten in zaradi tega se preočuje njena nestabilnost ob stenah reaktorja. Slovenci sodelujemo pri raziskavah in razvoju posebnih diagnostičnih metod z elektrostatskimi sondami, ki jih preizkušamo v plazemski napravi z linearnim magnetnim poljem .



*Slika 23: Magnet za ustvarjanje linearnega magnetnega polja*

*- Zadrževanje izotopov vodika v materialih za tokamak*

Napoved zajetja tritija je zelo pomembna, saj ga pridobivamo z razpadom litija znotraj reaktorja.

*- Nanos tankih plasti ogljika*

Med delovanjem sčasoma nastanejo obloge ogljika, ki jih je potrebno sčasoma odstraniti. Očistiti jih poizkušamo z ogljikovo dioksidno, vodikovo in oksidovo plazmo.



*Slika 24: Tanka plast ogljika*

*- Razvoj materiala za prvo steno reaktorja*

Obloga prve stene reaktorja je izpostavljena ekstremnim pogojem, zato je potrebno za gospodarno in varno delovanje reaktorja razviti posebne materiale. Razvoj poteka v smer keramičnih kompozitnih materialov z vlakni, ki jih lahko uporabljamo do visokih temperatur in po razgradnji reaktorja ne obremenjujejo okolja.



*Slika 25: Keramika z vlakni*

*- Pritrjevanje oblog*

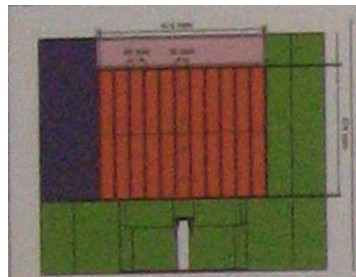
Pritrjevanje oblog in izvrtine za pritrjevanje morajo biti pri fuzijskem reaktorju izdelane zelo precizno. V ta namen smo razvili posebno orodje za vrtanje izvrtin.

*- Razvoj diverterja*

Diverter prejema velike količine energije in se zaradi tega segreva. Slovenci sodelujemo pri razvijanju hlajenja za diverter s helijem. Pri razvijanju hlajenja si pomagajo z računalniškimi simulacijami.

*- Razvoj oplodne obloge*

Proizvodnja tritija znotraj reaktorja zahteva dodaten razvoj oplodnih oblog, preko katerih bomo z razpadom jeder litija pridobivali tritij. Njihov razvoj je torej zelo pomemben pri napovedi za proizvodnjo tritija.



*Slika 26: Modul oplodne obloge*

Slovenci smo tako pomemben del v projektu »umetnega sonca« na zemlji in aktivno ter uspešno sodelujemo pri raziskavah.

Fuzijska elektrarna bo povzročila energijsko revolucijo, saj se bodo lahko elektrarne gradile neodvisno od okolice. Cena energije bo padla za nekaj odstotkov in lahko jo bomo imeli v neizmernih količinah. Dandanes se mogoče zdi še nemogoče, vendar si tudi še pred 30 leti nihče ni mislil, da bo lahko telefoniral z uro, poslušal glasbo na MP3 predvajalniku ipd. Razvoj fuzije, materialov za tokamak in raziskovanje visoko energijskih delcev, nam omogočajo napredek v razvoju komercialne fuzijske elektrarne. Z vsakim zagonom kateregakoli raziskovalnega reaktorja na zemlji smo bližje kontinuiranemu zlivanju jeder in bolje spoznavamo kvantno mehaniko delcev z visokimi energijami.

Gospodarstvo Evropske unije je odvisno od zanesljive in zadostne dobave energije. Sedanje potrebe po energiji večinoma zagotavljajo fosilna goriva (nafta, premog, naravni plini), ki dajejo 80% energije. Skoraj 67% fosilnih goriv je uvoženih. Ta goriva sedaj zadovoljijo 50% energijskih potreb EU.

Zanesljivi in trajnostni viri energije so potrebni za ohranitev življenjskega standarda v Evropi. Potrebujemo okolju sprejemljive, varne in trajnostne energetske tehnologije. Fuzija je ena izmed takih tehnologij.

Fuzija bo v prihodnosti dala možnost za varno in okoljsko sprejemljivo proizvodnjo velikih količin energije z bogatimi in porazdeljenimi viri goriva. Fuzijske elektrarne bodo primerne predvsem za osnovno pokrivanje velikih energetskih potreb gosto naseljenih in industrijskih področij. Primerne bodo tudi za pridobivanje vodika za potrebe energetskih sistemov, ki bodo temeljili na vodiku kot viru energije.

Poraba goriva fuzijske elektrarne bo izredno majhna. Elektrarna z električno močjo enega gigavata (1GW) bo potrebovala približno 100 kg devterija in 3 tone naravnega litija za celotno delovanje za proizvodnjo približno 7 milijard kilovat-ur električne energije. Enakovredna termoelektrarna bi potrebovala 1,5 milijona ton premoga za enako količino energije. Ker tritij nastaja iz litija v potrebnih količinah kar v reaktorju, ni potrebe po rednem transportu radioaktivnega goriva v elektrarno.

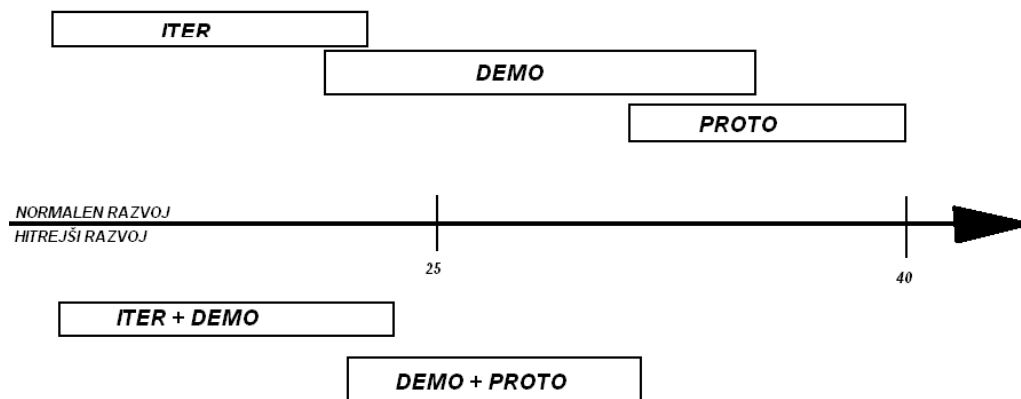
Fuzijski reaktorji ne povzročajo nastanka toplogrednih plinov in drugih snovi, ki škodljivo vplivajo na okolje in povzročajo klimatske spremembe. Fuzijsko gorivo, devterij in litij, kot tudi helij niso radioaktivni. Tritij, ki je v bistvu vmesno gradivo, je sicer radioaktiven, a razpade relativno hitro, z razpolovno dobo 12,6 let. Ob razpadu se tvori elektron (sevanje beta) z zelo nizko energijo. Tak elektron na zraku lahko potuje le nekaj milimetrov in ga zaustavi že navaden list papirja. Vseeno je tritij nevaren, če pride v človeško telo, zato so varnostni sistemi v reaktorju prilagojeni tako, da ne pride do njegovega izpusta ne pride.

Nevtroni, ki se sproščajo med fuzijsko reakcijo, obsevajo in aktivirajo snovi v neposredni bližini. S pazljivo izbiro teh materialov bomo lahko dosegli, da se izvzamejo iz nadzora in reciklirajo približno sto let po prenehanju delovanja elektrarne. Odpadki iz fuzijskih elektrarn tako ne bodo v breme prihodnjim generacijam.

Države članice EU in države, združene v okvirnem programu Euratoma, so si kot dolgoročni cilj raziskovalno – razvojnega dela zastavile izgradnjo prototipnega reaktorja za proizvodnjo električne energije, ki bi zadoščal potrebam družbe: varno delovanje, skladnost z okoljem in ekonomska upravičenost. Ključna značilnost v Evropskem fuzijskem programu je edinstven sistem koordinacije vseh pomembnih raziskovalno-razvojnih virov, ki so na voljo v Evropi. Posebej pomembno je sodelovanje pri skupni uporabi podatkov pridobljenih v reaktorju JET, in v tehnološkem programu v okviru Evropskega sporazuma o razvoju fuzije ( EFDA ). Program je usmerjen v gradnjo reaktorja ITER, vsebuje pa raziskave tudi za DEMO.

Za izgradnjo reaktorjev ITER in DEMO bo potrebna velika udeležba evropske industrije in ogromno raziskovalno-razvojnega dela številnih fuzijskih laboratorijev in univerz. Pri tem pa je pomemben del programa usposabljanje in izobraževanje mladih raziskovalcev (v raziskave v laboratorijih je vključenih približno od 200 do 250 dodiplomskih in podiplomskih študentov).

Podatki so pokazali, da prvo plazmo v reaktorju ITER lahko pričakujemo okoli leta 2016. Prvi poizkusi bodo potekali z navadno vodikovo plazmo, da ne bi prišlo takoj do kontaminacije sten reaktorja. Okoli leta 2019 se bodo pričeli poizkusi z devterijevo plazmo, 2020 pa z D-T plazmo. Vzporedno se že razvija projekt DEMO, ki je pol komercialna elektrarna in zadnja stopnja pred komercialno fuzijsko elektrarno. PROTO bo prva komercialna fuzijska elektrarna, za katero še ni znana lokacija in niso dodelani načrti.



Slika 27: Razvoj reaktorjev

## 7. ZAKLJUČEK

Raziskovalne naloge sem se lotil z namenom, da bi odkril kakšen je način pridobivanja energije z zlivanjem vodikovih jeder na zemlji. Ugotovil sem, da je najboljši način za pridobivanje energije s fuzijo, zadrževanje plazme v magnetnem polju. Med raziskovanjem sem naletel na kar nekaj problemov, ker so v večini primerov enačbe in razlage presegle moje srednješolsko znanje in sem se moral poglobiti v določene stvari, da sem jih razumel. Med raziskovanjem sem prebral štiri knjige o fuziji in jedrskih reakcijah, med branjem zelo užival ter pridobil veliko koristnih informacij in znanj. Veliko informacij sem dobil tudi na spletu, toda veliko je tudi takih člankov, ki niso tehnološko pravilni in sem jih moral izločiti, kar mi je vzelo precej časa. Forumi raznih spletnih strani so polni pesimizma o fuziji. Ljudje brez kakršne vednosti o njej pišejo, da nam tega nikoli ne bo uspelo doseči in da nikakor ni možnosti za pridobivanje energije s fuzijo, vendar ne vedo, da nam je to že uspelo, četudi le za kratek čas.

Z vsakim poizkusom smo bližje kontinuirani fuziji, zato glede na rezultate mojega raziskovanja menim, da bi bilo potrebno več investiranja na področju fuzijske energije in več zaupanja širše javnosti v le-to.

## 8. ZAHVALA

Zahvalil bi se svojim mentorjema g. Sašu Gnilšku in g. Zvonetu Cencenu za pomoč in svetovanje pri raziskovanju. Za strokovne nasvete in pomoč pri razlagi nekaterih stvari se zahvaljujem predavateljem iz predstavitve fuzije v Ljubljani, posebej Katji Rade. Zahvaljujem se tudi staršem ter ostalim, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi moje naloge. Iskrena hvala gibanju Mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline, ki so mi omogočili prijavo in izdelavo raziskovalne naloge.

## 9. VIRI IN LITERATURA

1. John Wesson, 2004, Tokamaks, Third edition. Združene države, Oxford University Press Inc.
2. [www.iter.org](http://www.iter.org) , 20. Marec 2009
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion), 3. Februar 2009
4. Garry McCracken, Peter Stott, 2005, Fusion The Energy of the Universe. London , Elsevier Inc.
5. A.A Harms, K. F Schoepf, G.H Miley, D.R Kingdon, 2000, Principles of Fusion Energy. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
6. Janez Strnad, 2005, Fizika Molekule. Kristali. Jedra. Delci. Ljubljana, DMFA založništvo
7. <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>, 29. December 2008
8. <http://sl.wikipedia.org/wiki/Tokamak>, 17. Januar 2009