

Die effek van die skermgas-samestelling in 'n induktiefgekoppelde plasma: 'n Eindige-elementalanalise

Outeurs:

NJM Grobler^a
H Bissett^b
GJ Puts^a
PL Crouse^a

Affiliasies:

^aDepartement Chemie
Ingenieurswese, Universiteit
van Pretoria, Privaatsak X20,
Hatfield 0028, Suid-Afrika.

^bAfdeling Toegepaste
Chemie, Suid-Afrikaanse
Kernenergiekorporasie,
R104 Pelindaba, Madibeng
0240, Suid-Afrika

Korresponderende outeur:

NJM Grobler
E-pos:
njmgrobler@gmail.com

Datums:

Ontvang: 17/07/20
Aanvaar: 26/10/20
Gepubliseer: 11/11/20

Hoe om hierdie artikel aan te haal:

NJM Grobler, H Bissett,
GJ Puts, PL Crouse, Die
effek van die skermgas-
samestelling in 'n induk-
tiefgekoppelde plasma: 'n
Eindige-elementalanalise,
*Suid-Afrikaanse Tydskrif
vir Natuurwetenskap en
Tegnologie* 39(1) (2020).
[https://doi.org/10.36303/
SATNT.2020.39.1.799](https://doi.org/10.36303/SATNT.2020.39.1.799)

Kopiereg:

© 2020. Authors.
Licensee: *Die Suid-
Afrikaanse Akademie vir
Wetenskap en Kuns*.
Hierdie werk is onder
die Creative Commons
Attribution License
gelisensieer.

Die skermgas speel 'n belangrike rol in die termiese beskerming van die reaktorwand in 'n induktiefgekoppelde plasmareaktor (IGP). Waterstof ioniseer moeiliker as argon. Waterstof word dus in klein hoeveelhede in die skermgas gebruik waar argon die hoof-plasmagas is om plasmavorming in die omgewing van die wand te verhoed. Die hoë vloeisnelheid van die skermgas verminder ook die tyd vir hitte-oordrag na die wand. Daar is verskeie numeriese modelle van IGP-sisteme in die literatuur; nie een neem die effek van die skermgassamestelling in ag nie. Die hoeveelheid waterstof in die skermgas en sy hoër ionisasiepotensiaal kan groot nuwe-effekte op die plasmagedrag hê. 'n Oormaat waterstof in die skermgas is ook 'n vermorsing. Beide faktore het 'n invloed op die ekonomie van die plasmaproces. Hierdie navorsing wys dat meer as 2 % H₂ in die skermgas benodig word om plasmavorming teen die wand te voorkom. 'n Lokale minimum in stralingsverliese dui daarop dat die optimale skermgassamestelling vir hierdie sisteem 3 % H₂ in die argon-skermgas is. Die kommersiële eindige-elementgebaseerde sagtewarepakket COMSOL Multiphysics is vir hierdie werk gebruik.

Sleutelwoorde: eindige-elementalanalise; induktiefgekoppelde plasma; skermgas.

The effect of sheath-gas composition in an inductively-coupled plasma reactor: A finite-element analysis: Sheath gas has a critical role in the thermal protection of the inner reactor wall of an inductively-coupled plasma reactor (ICP). Argon ionises more readily than hydrogen. Hydrogen is thus used in small concentrations in the sheath gas when argon is the main plasma gas in order to prevent plasma formation in close proximity to the reactor wall. The high linear velocity of the sheath gas further minimises temperature increase of the sheath gas, and thus heat transfer to the reactor wall. Many numerical models of ICPs have been published in the literature; not one has specifically taken the effect of sheath gas into account. The concentration of hydrogen may have deleterious effects on general plasma behaviour, because of its higher ionisation potential. In addition, an excess of hydrogen is costly. Both factors have an influence on the economics of any plasma process. The research reported here shows that more than 2 % H₂ in the sheath gas is required to prevent plasma formation at the wall surface. A local minimum in modelled radiative heat losses indicates the optimal hydrogen concentration to be 3 %. The commercial software package COMSOL Multiphysics was used for this work.

Key words: finite element analysis; inductively-coupled plasma; sheath gas.

Inleiding

Induktiefgekoppelde plasmareaktore (IGP's) het verskeie industriële toepassings, onder andere die voorbereiding van metaalpoelers vir additiewe vervaardiging (Murr et al., 2012). Sekere metaalprodukte word vervaardig deur middel van persing en sintering van metaalpoelers. Hierdie tegniek staan as poelermetallurgie bekend. Metaalpoelers wat vervaardig word deur middel van piro- en hidrometallurgiese prosesse toon onreëlmatige morfologieë. Hierdie onreëlmatighede bemoeilik die verwerking van die poelers omdat dit die persingsdruk en sinteringstemperatuur tot bo die teoretiese waardes verhoog. Daarteenoor toon gesferoidiseerde metaalpartikels 'n homogene morfologie wat toelaat dat die finale produk by baie laer temperature en drukke gesinter kan word. In sekere gevalle is die materiaaleienskappe na prosessering baie naby aan die teoretiese waardes. Derhalwe is gesferoidiseerde metaalpartikels die gewenste uitgangstof vir poelermetallurgie.

Die Suid-Afrikaanse Kernenergiekorporasie (Necsa) het 'n program gevestig vir die bevordering van sferoïdiseringstechnologie met die einddoel om 'n kommersiële, IGP-gebaseerde metaalprosesseringsaanleg te bou. Die navorsing wat ons hier rapporteer, fokus op die verstaan en verbetering van titaansferoïdisering. Toetse word tans uitgevoer op 'n Tekna TEKSPHERO-15 kleinskaalse sferoïdiseringstelsel met argon as die hoof-plasmagas (Tekna, 2016).

IGP-sisteme toon groot termiese verliese wat die energie-effektiwiteit van die sferoïdiseringsproses drasties verminder, in hierdie geval aan straling en na die verkoelingswater in die reaktorwand. Dit is noodsaaklik om hierdie energie-verliese te verminder om 'n suksesvolle kommersiële aanleg te bou.

Die energie wat deur die wand van die reaktor verloor word, kan verminder word deur die hitesone weg van die wand af te beweeg. Dit kan gedoen word deur 'n skermgas te gebruik wat moeiliker ioniseer as die hoof-plasmagas. Waterstof ioniseer moeiliker as argon en sal dus die hitesone van die wand af wegskuif indien dit teenwoordig in die skermgas is. 'n Oormaat waterstof toon egter newe-effekte op die termiese- en vloeigedrag van die plasma, kan die plasma blus, en onnodig materiaal verkwis.

Die besondere hoë temperatuur wat in 'n IGP bereik word, maak dit moeilik om eenvoudige lesings soos vloeï en temperatuur te neem. Rekenaarmodelle bied dus die geleentheid om die fisiese en chemiese eienskappe van 'n plasma te ondersoek en die gedrag daarvan te analiseer. Die rekenaarmodelle moet egter eksperimenteel bevestig word vir behoorlike interpretasie van die resultate.

Verskeie bestaande IGP-rekenaarmodelle is beskikbaar in die literatuur. Boulos (1978) was van die eerstes om 'n rekenaarmodel vir 'n IGP te ontwikkel. Verskeie aanvanklike modelle het gevolg wat die temperatuur- en vloeivelde bereken (Proulx et al., 1983; Mostaghimi et al., 1985; Yang et al., 1989). Moderne sagtewarepakette gebruik eindige-element/volume-analise wat met ingeboude funksies vir energie- en vloeiberekening beskikbaar gestel word. Voorbeelde van sulke sagteware is COMSOL Multiphysics (2018) en ANSYS Fluent (2018). Ikhlef et al. (2012) het 'n eindige-element COMSOL model vir 'n argon-IGP by atmosferiese druk ontwikkel om sodoende die magneto-hidrodinamiese koppelingsgedrag beter te verstaan. Daar is etlike moderne modelle wat die eindige-element/volume-metode gebruik om verskillende geometrieë van, of gebruike vir IGP's te simuleer (Bolot et al., 2007; Bogaerts & Aghaei, 2017; Colombo et al., 2008). Die outeurs is nie bewus van enige bestaande model wat die effek van die skermgas se samestelling in ag neem nie.

Hierdie navorsing poog om die optimale skermgas-samestelling te vind wat hitteverliese deur die plasmareaktor se wand minimeer. Die modellering en simulاسies is met

COMSOL Multiphysics gedoen, en het die pakket se ingeboude fisikamodules gebruik. Geen aanvullende kode is geprogrammeer nie en geen eksperimentele resultate word vermeld nie.

Berekeningsmodel

Samestellende vergelykings

COMSOL gebruik 'n wiskundige model ontwikkel deur Boulos et al. (1994) vir die beskrywing van 'n IGP soos hieronder beskryf. Turbulente vloeï word aanvaar, die saampersbare vloeï in die stelsel word beskryf deur die kontinuïteitsvergelýking, die momentumvergelýking en die $k-\omega$ turbulensievergelýkings weergegee in Vergelýking (1) tot (6), met ω as die spesifieke dissipasiestempo.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (2)$$

Vergelýking (1) is die kontinuïteitsvergelýking en Vergelýking (2) is die momentumbalans. Vergelýking (3) tot Vergelýking (6) is die $k-\omega$ vergelýkings vir turbulente vloeï.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{k} = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k^*) \nabla \mathbf{k}] + P_k - \beta_0^* \rho \omega k \quad (3)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta_0 \rho \omega^2 \quad (4)$$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (5)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (6)$$

Hier verteenwoordig ρ , u , F , T , μ , en p die digtheid, snelheidsveld, die liggaamskragvektor wat die verskillende kragte op die volume in ag neem, temperatuur, viskositet, en druk, onderskeidelik.

Die totale hitte-oordrag word deur Vergelýking (7) beskryf en die konduktiewe hittevloed word deur Vergelýking (8) beskryf.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (7)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (8)$$

Hier verteenwoordig Q , Q_p , Q_{vd} , \mathbf{q} , C_p , en k onderskeidelik die plasmahittebron, die drukarbeid, die viskose energie-verliese, die konduktiewe hittevloed, die spesifieke warmtekapasiteit, en die termiese geleidingsvermoë. Die Maxwell-vergelýkings word weergegee in Vergelýking (9) tot Vergelýking (12).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e \quad (11)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \quad (12)$$

Hier verteenwoordig H , J , B , A , E , ω , D , J_e , σ , en v onderskeidelik die magneetveldintensiteit, stroomdigtheid, magnetiese vloeddigtheid, magnetiese vektorpotensiaal, elektriese veldintensiteit, frekwensie, die diëlektriese verplasingvektor, ekstern-gegenereerde stroomdigtheid, elektriese geleidingsvermoë, en versnelling van die geometrie relatief tot 'n verwysingsgeometrie.

Die plasma-hittebron, Q , in Vergelyking (7), word gedefinieer deur Vergelyking (13).

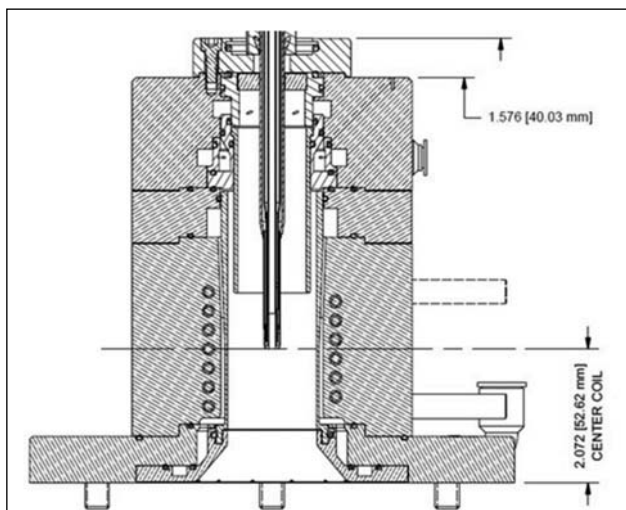
$$Q = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) + Q_{rad} \quad (13)$$

Hier verteenwoordig k_B , q , en Q_{rad} onderskeidelik die Boltzman-konstante, die eenheidslading, en die totale volumetriese stralingsverliese. Die eerste term aan die regterkant verteenwoordig entalpie-transport. Die tweede term beskryf Joule-verhitting.

Oplossingsmetodiek

Die wiskundige model, beskryf deur Vergelyking (1) tot (13), is gebruik om die Tekna plasmareaktor te simuleer. Die model maak gebruik van drie fisikanodes binne COMSOL, nl. vloeddinamika, hitte-oordrag en elektromagnetisme. Die magneetveldnode los die Maxwell-vergelykings op vir die elektromagnetiese velde opgewek deur die wisselstroom in die klos asook in die plasma. Die COMSOL-plasmapakket koppel die magneetveldnode en die hitte-oordragnode deur die verskaffing van 'n plasmahittebron. Turbulente vloeï is aangeneem.

'n Tegnie diagram van die Tekna-reaktor word in Figuur 1 getoon en die vereenvoudiging daarvan vir modelleringsdoeleindes in Figuur 2. Die geometrie in Figuur 2 is 'n praktiese vereenvoudiging van die tegnie diagram. Die



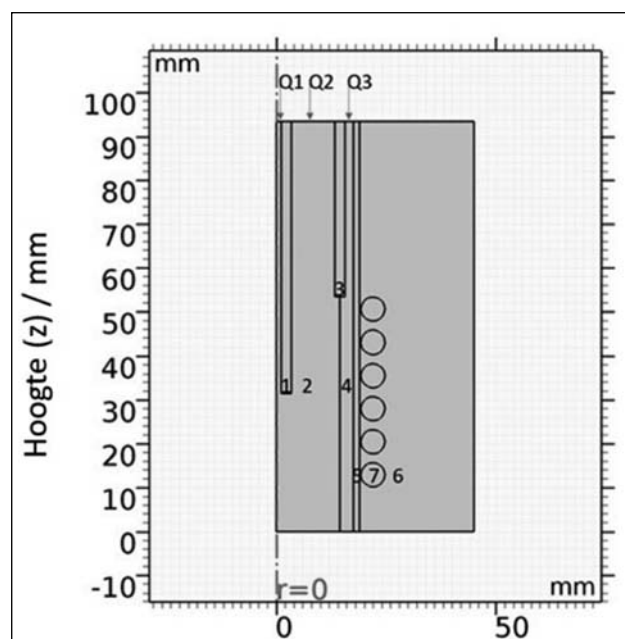
FIGUUR 1: Tegnie diagram van 'n Tekna TEKSPHERO-15 induktiefgekoppelde RF plasmabrande.

silindriese simmetrie van die reaktor is vereenvoudig na 'n 2D-aksiaalsimmetriese simulatie, vir 'n drastiese vermindering in berekeningshulpbronne en simulasietyd.

Domein 1 (in Figuur 2) verteenwoordig die wand van die draergassonde en Q1 verteenwoordig die draergasinlaat. Q2 is die hoof-plasmagasinlaat vir suiwer argon, waar Q3 die argon skermgas verteenwoordig wat 'n klein variërende hoeveelheid waterstof bevat. Domein 2 verteenwoordig die sentrale plasmagas. Domein 3 die kwartsbuis wat die plasmagas en skermgas skei. Domein 4 verteenwoordig die skermgas en Domein 5 die wand van die plasmabrande. Die vloeddinamikavergelykings is slegs vir Domein 2 en 4 opgelos, met 'n geenglip-randvoorwaarde vir die wand (grens tussen Domein 4 en 5).

Die grens tussen Domein 2 en 4 is kunsmatig, word slegs vir numeriese doeleindes gebruik, en het geen fisiese effek op die vloeï en hitte-oordrag nie. Die grootste beperking van COMSOL is dat dit nie die vermenging van gasse in 'n plasma in ag kan neem nie. Dit lewer die grootste bydrae tot die fout. Die modellering van 'n sisteem met waterstof in die skermgas vereis 'n kunsmatige skeiding tussen twee domeine met verskillende samestellings, wat steeds vir vloeï- en hitte-oordrag toelaat. Domein 4 is daarom 'n homogene mengsel van waterstof en argon en die eenskappe hiervoor is addisioneel ingeprogrammeer.

Die hitte-oordrag is bepaal in Domeine 2, 4, en 5. Die hitte-oordrag in die res van die geometrie is nie van belang nie aangesien die hitteverlies na die verkoelingswater in die model ingesluit is deur 'n vaste temperatuur van 300 K op die buitewand te spesifiseer. Die aanvangstemperatuur is op 300 K gestel vir die volledige geometrie en die aanvanklike vloeïveld op 0 m/s is gestel.



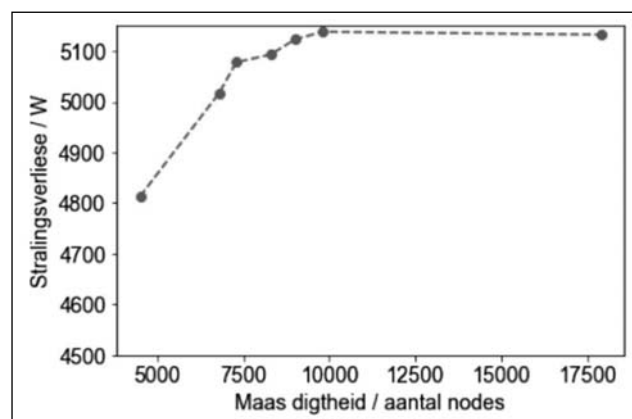
FIGUUR 2: Simulasiegeometrie wat die verskillende domeine en inlate aandui.

Die sisteem is ondersoek in 'n frekwensie-tyd-domein vir 'n bedryfsperiode van 8 s aangesien gestadigde toestande na 4 s bereik word. Verskeie simulaties met verskillende hoeveelhede H_2 in die skermgas is gedoen. Tabel 1 bevat die bedryfstoeistand en beginwaardes wat konstant gehou is vir al die simulaties.

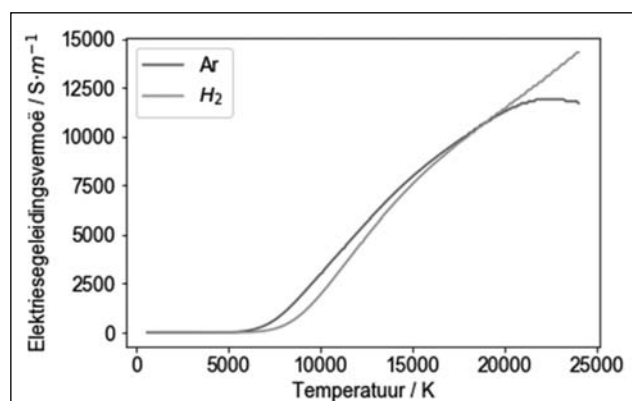
TABEL 1: Bedryfstoeistand en beginwaardes

| Parameter | Waarde | Eenheid |
|--|--------|---------|
| Drywing | 11 | kW |
| Frekwensie | 3 | MHz |
| Inlaat 1 (Q1) | 2 | slpm |
| Inlaat 2 (Q2) | 10 | slpm |
| Inlaat 3 (Q3) | 40+x | slpm |
| Begin temperatuur | 300 | K |
| Aanvanklike vloeiveld | 0 | m/s |
| Aanvanklike magnetiese vektor potensiaal | 0 | Wb/m |

Die maas is 'n kritiek-belangrike aspek van die simulasielproses. Indien die maas nie fyn genoeg is nie, kan dit 'n diskontinuiteit in die resultate veroorsaak. Die maasstudie is dus gedoen om te bevestig dat die maas fyn genoeg is deur sistematies verskillende groottes te toets. Die punt waar verfyning nie verdere verandering tot gevolg het nie, word as akkuraat genoeg beskou. In baie gevalle kan die maas ook te fyn wees en, behalwe om onnodige rekenaarhardeware te vereis, ook divergente gedrag in die oplossing veroorsaak.



FIGUUR 3: Stralingsverliese van die plasma as 'n funksie van maasdigtheid



FIGUUR 4: Elektriese geleidingsvermoë van argon en waterstof as 'n funksie van temperatuur (Boulos et al., 1994).

Sewe verskillende maasdigthede is getoets. Figuur 19 wys hoe die stralingsverliese as funksie van die maasdigtheid verander. Dit is duidelik dat dit rondom 9 000 maasnodes stabiliseer. Dit impliseer dat 'n maas van ten minste 9 000 nodes benodig word vir 'n akkurate oplossing. Die grofste maas wat getoets is, het 4 500 nodes bevat; minder as dit het divergente gedrag in die model veroorsaak.

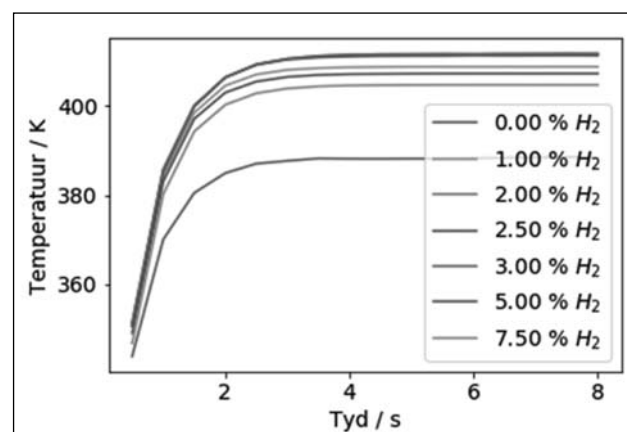
Resultate en bespreking

Die hoof-resultate word in Figuur 5 tot Figuur 10 aangetoon. Figuur 6 wys die temperatuur as funksie van afstand vanaf die reaktorwand. Figuur 7 wys die temperatuur 1 mm van die binnewand as funksie van die konsentrasie H_2 in die skermgas. Figuur 7 dui die verandering in totale hittevoed by verskillende H_2 konsentrasies. Figuur 9 gee die stralingsverliese as funksie van H_2 konsentrasie in die skermgas. Figuur 10 wys die radiale temperatuurprofiel by die maksimum temperatuur vir elke simulatie.

Figuur 4 gee die elektriese geleidingsvermoë van waterstof en argon as 'n funksie van temperatuur, soos gebruik deur COMSOL. In die temperatuurgebied van belang, nl., 5 000 K to $\sim 20\,000$ K, is die elektriese geleidingsvermoë van argon hoër as waterstof. Argon ioniseer meer gereedelik as H_2 . Dit gebeur omdat waterstof van die beskikbare energie gebruik om chemiese bindings te breek.

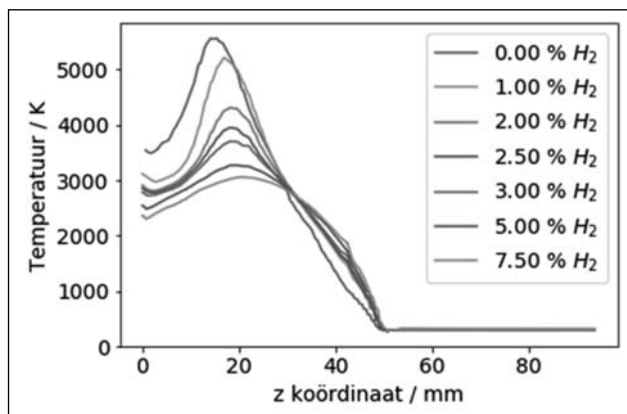
Figuur 5 toon die tydsverloop van die temperatuur by 'n vaste punt in die middel van die wand op die hoogte waar die maksimum temperatuur bereik word. Die temperatuur in die wand lyk of dit 'n gestadigde toestand bereik na 4 s (Figuur 5). Die simulaties is dus almal vir 8 s geloop.

Die teenwoordigheid van waterstof beweeg die hitesone na links en verminder plasmavorming by die wand (soos later aangetoon); maar, dit verbeter ook die hitte-oordrag na die wand. Dit word verwag aangesien waterstof 'n beter hittegeleidingsvermoë het as argon. Die verbeterde hittegeleiding na die wand en die groter afstand tussen die wand en die hitesone is twee kompeterende effekte wat lei tot 'n optimale punt waar daar minimale hitte deur die wand verloor word.

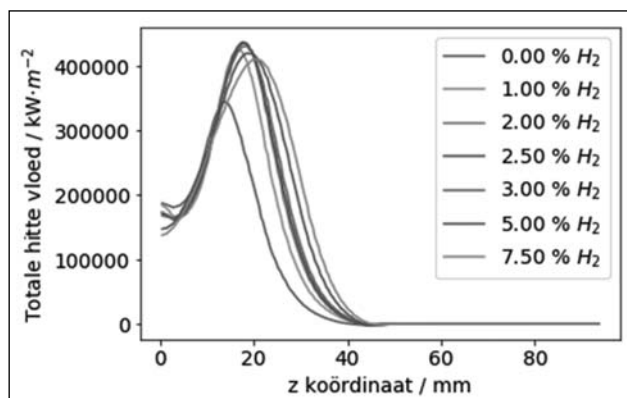


FIGUUR 5: Plasmabrandewandtemperatuur by die z-positie waar dit piek teenoor tyd.

Figuur 6 wys die temperatuurprofiel 1 mm weg van die binnewand oor die volle lengte van die brander vir verskillende konsentrasies van H_2 in die skermgas by die finale tydstap. Die maksimum temperatuur naby die wand bo 2.0 % H_2 is onder 5 000 K. Dit is die temperatuur waar argon begin om te ioniseer. Dit beteken dus dat daar geen plasmavorming by die wand plaasvind nie.



FIGUUR 6: Temperatuur 1 mm van die binnewand vir verskillende konsentrasies H_2 in die skermgas.



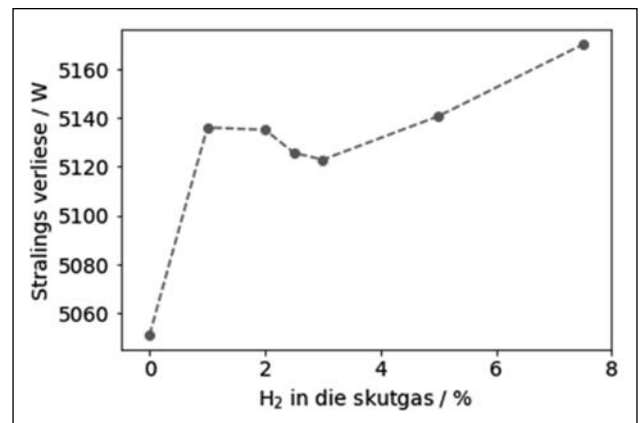
FIGUUR 7: Totale hitte vloed oor die buitewand by verskillende konsentrasies H_2 gas.

Figuur 7 wys die totale normaalhitte vloed oor die buitewand vir verskillende konsentrasies van H_2 gas. Dit is duidelik dat die H_2 'n groot invloed het tot by 2.0 mol % en dat 'n verdere verhoging in die H_2 konsentrasie nie beduidend is nie.

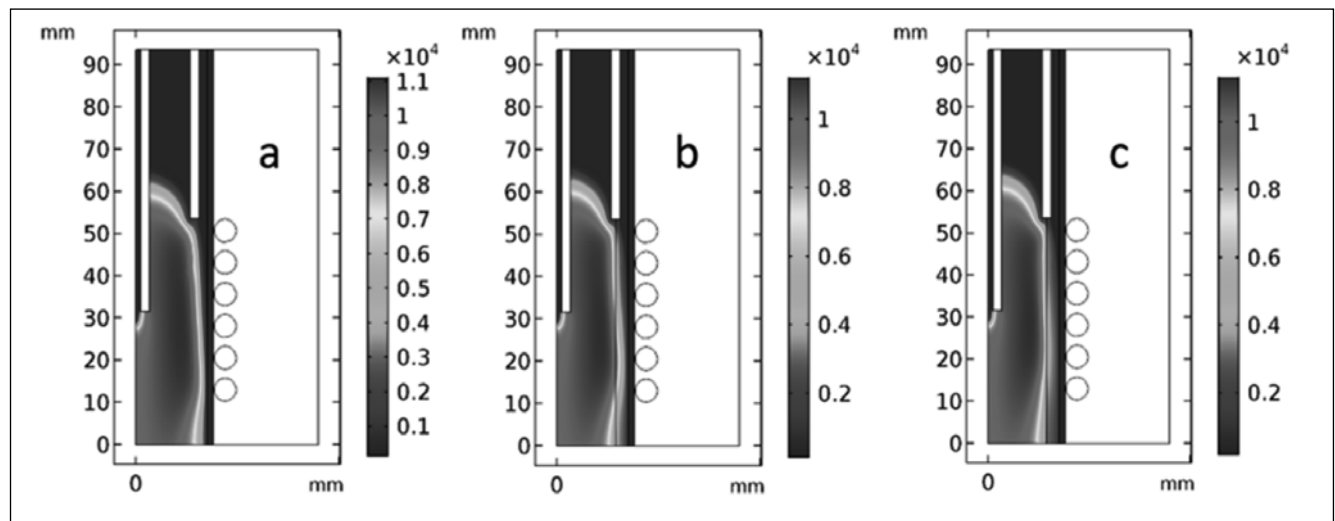
Figuur 8 toon die stralingsverliese geïntegreer oor die hoogte vir diesisteem as 'n funksie van waterstofkonsentrasie in die skermgas.

Daar is 'n lokale minimum by 3 % H_2 in die skermgas. Dit is ook bo die minimum hoeveelheid benodig om plasmavorming by die wand te voorkom.

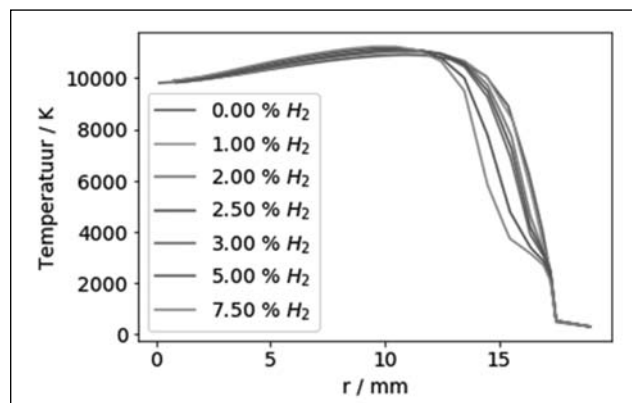
Figuur 9 wys die temperatuurveld vir 0 mol %, 3 mol % en 7.5 mol % H_2 en toon aan hoe die hitesone na links beweeg met meer waterstof in die skermgas. Figuur 10 dui ook op die beweging van die hitesone na links met 'n toename van H_2 in die skermgas. Die maksimum temperatuur skuif bykans 4 mm links wanneer die H_2 in die skermgas toeneem van 0 % na 7.5 %.



FIGUUR 8: Stralingsverliese met 'n lokale minimum by 3 % H_2 in die skermgas



FIGUUR 9: Temperatuurkontoere met: a) 0 mol %, b) 3 mol % en c) 7.5 mol % H_2 in die skermgas.



FIGUUR 10: Radiale temperatuurprofiel by die maksimum temperatuur.

Waterstof in die skermgas verminder duidelik die temperatuur op die binnewand en verminder daardeur hitteverliese deur die wand terwyl dit aanleiding gee tot 'n warmer plasma in die prosesseringssone, wat voordelig vir sferoidiserings is. Die wand bereik 'n maksimum temperatuur van slegs 526 K met 3 % H_2 in die skermgas. Hierdie temperatuur is laag genoeg om termiese skade op die binnewand te voorkom en steeds 'n minimale effek op die plasma en energiekostes te hê. Waterstof in die skermgas verbeter egter die hitte-oordrag na die wand en het 'n hoër temperatuur in die wand as gevolg van 'n kompeterende effek.

Gevolgtrekking

Die rekenaarmodel dui daarop dat die wand van plasmavorming beskerm kan word met 'n waterstof/argon-skermgas met 'n minimum van 2 % H_2 . Waterstof veroorsaak ook 'n warmer plasma, maar te veel kan die plasma blus. Uit 'n ekonomiese oogpunt word so min as moontlik waterstof verkies. Daar is 'n minimum in die stralingsverliese by 3 % H_2 wat bo die minimum hoeveelheid is om plasmavorming te voorkom. Daarom is 3 % H_2 gekies as die optimale bedryfspunt vir die IGP.

Verwysings

- Aghaei M, Bogaerts A. 2016. Particle transport through an inductively coupled plasma torch: elemental droplet evaporation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 31, 631-641.
- Ansys Fluent 2018 Ansys Fluent <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> [16 July 2018].
- Bogaerts A, Aghaei M. 2017. Inductively coupled plasma-mass spectrometry: insights through computer modeling. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 32, 233-261.
- Bolot R, et al. 2007. Modeling of an inductively coupled plasma for the synthesis of nanoparticles. *Journal of Thermal Spray Technology* 16, 690-697.
- Boulos MI. 1978. Heating of powders in the fire ball of an induction plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science* 6, 93-106.
- Boulos MI, Fauchais P, Pfender E. 1994. *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*. Plenum Press, New York, pp. 388-447.
- Colombo V, Ghedini E, Mostaghimi J. 2008. Three-dimensional modeling of an inductively coupled plasma torch for spectroscopic analysis. *IEEE Transactions on Plasma Science* 36, 1040-1041.
- COMSOL Multiphysics 2018 COMSOL Multiphysics 5.3a <https://www.comsol.com/> [16 July 2018].
- Ikhlef N, et al. 2012. Nonlinear compressible magnetohydrodynamic flows modeling of a process ICP torch. *The European Physical Journal Applied Physics* 58, 10804-10813.
- Mostaghimi J, Proulx P, Boulos MI. 1985. Computer modeling of the emission patterns for a spectrochemical ICP. *Numerical Heat Transfer* 8, 153-166.
- Murr LE, et al. 2012. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: Examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and Technology* 1(1), 42-54.
- Proulx P, Mostaghimi J, Boulos MI. 1985. Plasma-particle interaction effects in induction plasma modeling under dense loading conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28, 1327-1336.
- Proulx P, Mostaghimi J, Boulos MI. 1987. Heating of powders in an r.f. inductively-coupled plasma under dense loading conditions. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 7, 29-52.
- SY163 15 kW Induction Plasma System Original Operating Manual 2016 Tekna Plasma Systems Inc. Sherbrooke.
- Tekna Spheroidization system Teksohero-15 system 2016 <http://www.tekna.com/landing-page/teksphero-15> [16 July 2018].
- Yang P, et al. 1989. Application of a two-dimensional model in the simulation of an analytical inductively coupled plasma discharge. *Spectrochimica Acta, Part B* 44 657-666.