

PUBLIC

# Brander Test Rapport

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

**DEI+ missie C, een klimaatneutrale industrie met hergebruik van  
grondstoffen en producten in 2050 en MMIP 7: Een 100% CO<sub>2</sub>-vrij  
industriële warmtesysteem, deelprogramma 4: Toepassing  
klimaatneutrale brandstoffen**

**Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.**

Pages modified under this revision: **1**

Rev	Date DD/MM/YY	STATUS	WRITTEN BY (name & visa)	CHECKED BY (name & visa)	APPROVED BY (name & visa)
1	23 Apr 2023	Revised	IJR	UKIN	SWAL
0	22 Feb 2023	FOR INFORMATION	IJR	UKIN	SWAL
DOCUMENT REVISIONS					

Sections changed in last revision are identified by a vertical line in the margin

**T.EN NETHERLANDS B.V. (TEN-NL)**

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---

TABLE OF CONTENTS

<b>1. Inleiding</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Activiteiten</b> .....	<b>4</b>
2.1 Doel van de test .....	4
2.2 Testprogramma .....	5
<b>3. Brander beschrijving</b> .....	<b>6</b>
3.1 Brander parameters .....	7
<b>4. Test opstelling</b> .....	<b>8</b>
4.1 Brander test oven .....	8
4.2 Brandstof debiet meting .....	9
4.3 Lucht gekoelde stralingsbuizen .....	10
4.4 Rookgas Analyzer .....	11
4.5 Fornuis onderdruk en fornuis temperatuur .....	11
4.6 Metingen.....	11
<b>5. Test brandstof mengsels</b> .....	<b>12</b>
<b>6. Brander test beschrijving</b> .....	<b>13</b>
6.1 Test serie A .....	14
6.2 Test serie B .....	18
6.3 Test serie C .....	23
6.4 Test serie J.....	26
<b>7. Discussie</b> .....	<b>31</b>
7.1 Vlamlengte/ warmteverdeling .....	32
7.2 NOx emissie .....	33
<b>8. Samenvatting</b> .....	<b>36</b>

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 1. Inleiding

Dit pilot project omvat het aanpassen van een industriële brander in een proef opstelling voor het gebruik van 100% aardgas tot 100% duurzame waterstof brandstof inclusief gebruik van duurzame elektrische luchtvoorverwarming. De proef condities (temperatuur en brandstof enz.) zijn gelijkwaardig aan de condities die in de praktijk kunnen optreden. Verder moet de verbranding een lage NOx emissie hebben en een warmteverdeling van de vlam die overeenkomt met de warmtevraag van de chemische reacties in ethyleen kraak fornuizen of steam methane reformer fornuizen. De lage emissie wordt bereikt omdat de gebruikte brander een unieke ontwerp heeft dat een lage emissie waarborgt. Hierdoor is het mogelijk om waterstof als brandstof te gebruiken zonder dat huidige emissie grenzen worden overschreden.

De hoeveelheid toegevoerde groene (of blauwe) waterstof alsmede de hoeveelheid toegevoerde groene elektrische energie kan (door netwerkbeheerders) worden aangepast tussen 0 en 100% om overbelasting van het waterstof netwerk en het elektriciteit netwerk te voorkomen. De aanpassing maakt de brander geschikt om kost effectief de broeikas gas emissie te verminderen..

De brander is een nieuw type brander voor hoge temperatuur processen zoals ethyleen kraak fornuizen of steam methane reformer fornuizen met een vuurhaard temperatuur tussen 1100°C-1400°C.

Doelstelling is het ontwikkelen van een verbranding met lage NOx emissie en een warmteverdeling van de vlam die overeenkomt met de warmtevraag van de chemische reacties in ethyleen kraak fornuizen of steam methane reformer fornuizen. Deze doelstelling wordt bereikt door een bestaand ontwerp van de iets aan te passen voor verbranding met waterstof.

Deze doelstelling voldoet aan de eisen van DEI+ missie C, een klimaatneutrale industrie met hergebruik van grondstoffen en producten in 2050 en MMIP 7: Een 100% CO2-vrij industrieel warmtesysteem, deelprogramma 4: Toepassing klimaatneutrale brandstoffen. De doelstelling van dit project voldoet aan deze subsidie regeling.

Deze pilot is uitgevoerd door T.EN Netherlands B.V.

T.EN Netherlands heeft als kernactiviteiten engineering en constructie van onder andere steam cracking fornuizen, steam cracking plants, steam reforming plants en plants voor biobrandstoffen. Daarnaast is T.EN Netherlands ontwerper, fabrikant en leverancier van kritische fornuis onderdelen zoals quench koelers, stralingsbuizen en branders.

Voor een ontwerper en producent van fornuizen en branders is het noodzakelijk om verbrandingstechnologie te ontwikkelen en beproeven voor duurzame brandstoffen zoals waterstof brandstof. Voor deze pilot bestaat de bijdrage van T.EN Netherlands uit onder andere:

- Ontwerp van benodigde branderaanpassingen
- Fabricatie van benodigde onderdelen voor de brander proeven
- Installatie van de proefbrander in de test opstelling
- Uitvoerder van de brander proef
- Eindrapportage

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 2. Activiteiten

Dit pilot project omvat het aanpassen en beproeven van een industriële brander die flexibel functioneert met 100% aardgas tot 100% waterstof brandstof met elektrische luchtvoorverwarming en geschikt is voor toepassing in hoge temperatuur fornuizen zoals kraakfornuizen en/of steam methane reforming fornuizen.

Door middel van proeven wordt het effect van de brandstof samenstelling (0%, 50% en 100% groene (en/of blauwe) waterstof) en verbrandingslucht voorverwarming (0-400°C) op de brander prestatie gemeten:

- warmteverdeling van de vlam
- vlamlengte
- NOx emissie
- Controle van de temperatuur van brandstof injectie nozzles

Indien nodig worden de brandstof injectie nozzles iets aangepast en geoptimaliseerd.

#### 2.1 Doel van de test

Operators van ethyleen kraak fornuizen en steam reforming fornuizen zijn op zoek naar een brander ontwerp dat geschikt is voor 100% waterstof als brandstof. Waterstof heeft een zeer hoge verbranding snelheid waardoor er risico op vlam terugslag optreedt.

Conventionele brander ontwerpen hebben vaak een intense lucht- brandstof menging (premix zone) waardoor er een hoog risico op ongewenste vlam terugslag is. De brander gebruikt geen intense lucht brandstof menging waardoor de brander uitermate geschikt is voor een hoog waterstof gehalte in de brandstof. Het resultaat van dit pilot project is een rapportage over de geschiktheid van de brander voor 100% aardgas tot 100% (groene of blauwe) waterstof als brandstof in combinatie met elektrische lucht voorverwarming. Voor toepassing van de brander in ethyleen kraak fornuizen of steam methane reforming fornuizen is het belangrijk dat de warmte toevoer over de hoogte van het fornuis overeen komt met de chemische reactie warmte van het proces. Dit is een grote uitdaging aangezien een variatie van brandstofsamenstelling in het algemeen resulteert in aanzienlijke verandering van de warmteverdeling van de vlam.

Tevens moet de verbranding met lage NOx emissie plaatsvinden. Een hoger waterstof gehalte van de brandstof en een hogere luchtvoorverwarmingstemperatuur resulteren in het algemeen in een aanzienlijke stijging van de NOx emissie.

De lage emissie wordt bereikt omdat de brander een unieke ontwerp heeft dat een lage emissie waarborgt. Hierdoor is het mogelijk om waterstof als brandstof te gebruiken zonder dat huidige emissie grenzen worden overschreden.

De opgedane kennis stelt operators en ontwerpers van ethyleen kraak fornuizen en steam methane reforming fornuizen in staat om een juiste keuze te maken voor de toekomstige brandstof en brander techniek. De brander is daarbij mogelijk een geschikte techniek. Fornuis operators zijn terughoudend om nieuwe (brander) technieken toe te passen in proces fornuizen en willen risico's zo veel mogelijk beperken. Het is belangrijk dat de warmteverdeling van de vlam overeenkomt met de warmtevraag van de chemische reacties in het proces fornuis. Verder is het belangrijk dat de brander NOx emissie zelfs met een hoger waterstof gehalte in de brandstof of met elektrische luchtvoorverwarming beneden de toelaatbare emissie limiet waarde blijft. Dit pilot project is belangrijk om fornuis

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

operators te overtuigen dat er geen grote risico's zijn bij gebruik van de brander in ethyleen kraak fornuizen en steam methane reforming fornuizen.

Locatie(s) waar het project uitgevoerd is:

TEN Netherlands B.V.  
Afrikaweg 30  
P.O. Box 86  
2700 AB Zoetermeer

T.EN brander test opstelling  
Merseyweg 10  
3197 KG Botlek Rotterdam

### 2.2 Testprogramma

Door middel van een brandertest het effect van de brandstof samenstelling (0%, 50% en 100% waterstof) en verbrandingslucht voorverwarming (0-400°C) op de brander prestatie waaronder:

- Warmteverdeling van de vlam
- Vlamlengte
- NOx emissie
- Temperatuur profiel in de brander ter controle van gebruikte brander materialen
- Controle van de temperatuur van brandstof injectie nozzles
- Indien nodig worden de volgende onderdelen van de brander worden aangepast en proefondervindelijk geoptimaliseerd:
  - Brandstof injectie nozzle vorm
  - Brandstof injectie nozzle stromings richting
  - Brandstof injectie nozzle grootte
  - Brandstof injectie nozzle divergentie hoek tussen de spleten van een nozzle
  - Brandstof injectie nozzle stromingsrichting meer naar brander CL

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 3. Brander beschrijving

De brander is een brander met ronde vlam.

De brander heeft een uniek nieuw ontwerp met getrapte verbranding. Brandstof wordt geïnjecteerd via een aantal brandstof injectie nozzles. De brandstof wordt eerst intens gemengd met rookgas uit de verbrandingskamer. Daarna wordt het brandstof-rookgas mengsel met verbrandingslucht en volgt verbranding. Door het toepassen van een getrapte verbranding blijkt dat de warmteverdeling van de vlam vrijwel onafhankelijk van de brandstof samenstelling is.

Tevens wordt door getrapte verbranding de piek vlam temperatuur lager waardoor de NOx emissie nauwelijks wordt beïnvloed door een hoog waterstof gehalte in de brandstof. De brander gebruikt geen brandstof-lucht premix vlam stabilisator maar een nieuw type vlamstabilisator die geschikt is voor toepassen van brandstof met een hoog waterstof gehalte. Om deze reden is de verbrandingstechniek van de brander uitermate geschikt voor het flexibel toepassen van waterstof als brandstof.

De mengzone van brandstof en rookgas en de tweede mengzone met verbrandingslucht worden zodanig aangepast dat de warmteverdeling van de vlam overeenkomt met de warmtevrage van de chemische reacties in het fornuis. Omdat waterstof een laag molecuul gewicht heeft is het natuurlijk nodig om de vorm, grootte en uitlaat richting van de brandstof injectie nozzles aan te passen.

#### **Brandstof injectoren**

Het uiteinde van iedere brandstof injectie nozzle, de heeft een complex patroon waardoor een bepaald stroompatroon ontstaat.

Elektrische energie die naar de brander wordt toegevoerd wordt gecompenseerd door minder energie toe te voeren met (fossiele) brandstof. Verbrandingslucht kan eenvoudig elektrisch worden voorverwarmd tot een temperatuur van 400°C. De maximale verbrandingslucht temperatuur bedraagt c.a. 800°C.

Bij gebruik van fossiele brandstof (traditioneel aardgas) daalt de CO2 emissie ongeveer 1% voor iedere 20°C hogere lucht voorverwarmingstemperatuur. Bij een verbrandingslucht temperatuur van 300°C daalt de CO2 emissie dus met ongeveer 15%.

Bij gebruik van groene waterstofgas brandstof is er geen CO2 emissie. In dit geval kan met behulp van elektrische luchtvoorverwarming brandstof en brandstof kosten worden bespaard.

Lucht voorverwarming veroorzaakt een hogere vlam temperatuur en hierdoor stijgt de NOx formatie in de vlam. Door de uitlaat richting en capaciteit van de brandstof injectie nozzles iets aan te passen kunnen de mengzones van brandstof-rookgas en verbrandingslucht zo worden aangepast dat de piek vlam temperatuur wordt verlaagd waardoor de NOx emissie nagenoeg niet toeneemt ondanks hogere lucht voorverwarmingstemperatuur (flameless combustion).

Het inschakelen of uitschakelen de toevoer van duurzame brandstof en/of duurzame elektrische energie naar de brander kan real-time worden gedaan op momenten van overschotten of schaarste van groene energie binnen de grenzen van de aansluiting op het energienet. Hierdoor is het mogelijk om de duurzame brandstof en/of duurzame elektriciteitsvraag flexibel aan te passen aan de beschikbaarheid van duurzaam opgewekte energie waardoor het energienetwerk stabiel kan werken. Vanwege de verwachte groei van fluctuerende energiebronnen en toenemende fluctuaties in de vraag naar energie

---

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---

wordt een goede balans tussen vraag- en aanbodzijde in het energiesysteem steeds belangrijker.

### **3.1 Brander parameters**

De volgende parameters zijn gevarieerd tijdens de brandertest:

- Waterstof gehalte in de brandstof
- Afmeting en stromingsrichting van de brandstof injectoren
- Hoeveelheid brandstof naar de vlamstabilisator
- Luchtvoorverwarmingstemperatuur
- Brander capaciteit
- Luchthoeveelheid

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

## 4. Test opstelling

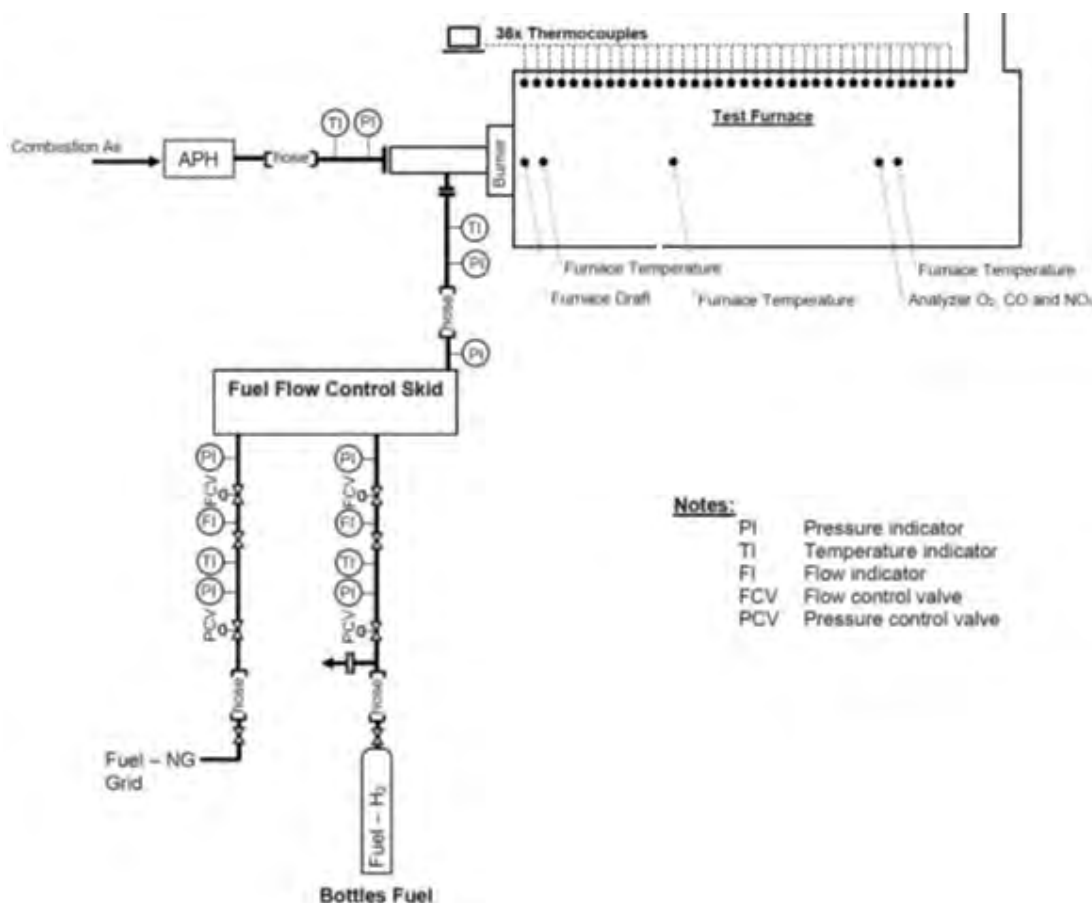
### 4.1 Brander test oven

De brander test wordt uitgevoerd in de TEN-NL brander test opstelling in Rotterdam.

Burner Test Furnace	
Furnace type	Box (inside refractory lined)
Furnace inside dimensions (LxWxH)	12 x 2.5 x 2.5 m
Draft	Induced

**Table 4.1:** eigenschappen van de brander test oven.

Zie onderstaande figuur voor de gebruikte instrumentatie.



**Figure 4.1:** Schema van de brander en test oven instrumentatie

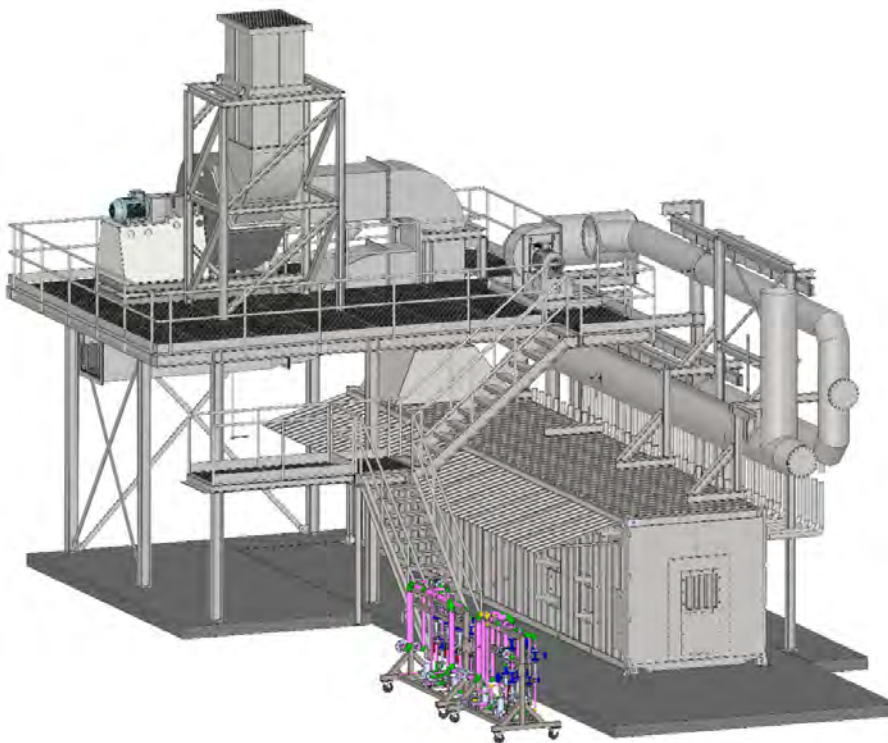
Het brander test fornuis heeft lucht gekoelde stralings buizen om de temperatuur in de verbrandingskamer te regelen beneden een temperatuur van 1200°C. De stralingsbuizen zijn onderverdeeld in 36 afzonderlijke segmenten met elk een eigen inlaat en uitlaat. De koellucht wordt geleverd door een lucht ventilator. De lucht in de stralingsbuizen kan worden opgewarmd tot een temperatuur van 500 °C of lager. De opgewarmde koellucht wordt naar de atmosfeer geleid en/of kan worden gebruikt als



## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

verbrandingslucht voor de test brander. De afstand tussen twee opeenvolgende segmenten bedraagt 0.3048 m (1 foot).

Iedere segment van stralingsbuizen gelijke afmetingen en heeft een temperatuur meting op de uitlaat die met behulp van een computer uitgelezen en opgeslagen kan worden. Op plaatsen in het fornuis met hoge warmte intensiteit van de vlam wordt de temperatuur van de stralingsbuizen hoger en wordt de luchttemperatuur aan de uitlaat zijde hoger. De locatie met de hoogste uitlaat temperatuur is de locatie met de hoogste vlam warmte intensiteit.



**Figure 4.2:** Het brander test fornuis

### 4.2 Brandstof debiet meting

De brandstof hoeveelheid wordt gemeten met debiet meters met variabel oppervlak. (rotameters). De metingen worden gecorrigeerd voor brandstof temperatuur en druk.

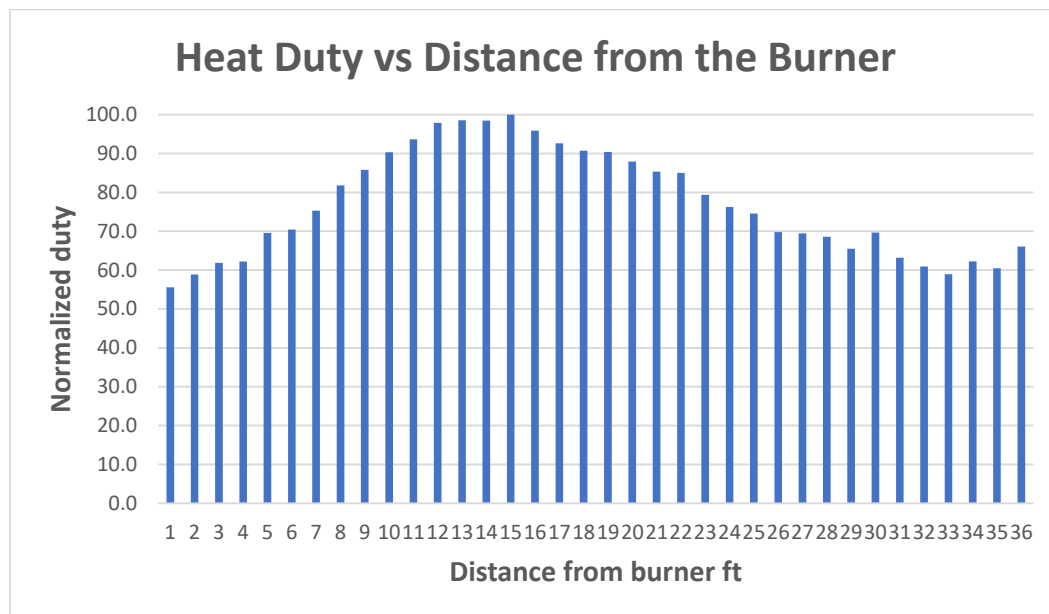
**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



**Figuur 4.3:** Brandstof debiet meting met rotameters.

**4.3 Lucht gekoelde stralingsbuizen**

De uitlaat van ieder luchtgekoeld stralingsbuis segment heeft een temperatuur meting. De temperatuur elementen zijn aangesloten op een data acquisition systeem. Met behulp van een programma wordt uit de gemeten uitlaat temperatuur een genormalizeerde heat duty van de luchtgekoelde stralingsbuizen berekend, zie onderstaande figuur.



**Figuur 4.4:** Voorbeeld normalized heat flux van de stralingsbuizen versus afstand van de brander.

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

Aan het einde van de vlam is de verbranding compleet en komt er geen warmte meer vrij van verbranding van de brandstof. De temperatuur van de gevormde rookgassen neemt daardoor af van het eind van de vlam tot de fornuis uitlaat locatie. De locatie van de hoogste warmtestroom dichtheid (heat flux) is op de plaats van het einde van de vlam.

De afstand tussen de uitlaten van twee verschillende stralingsbuis segmenten is 1 ft (0.3048 m). De afstand van segment uitlaat #1 tot de brander is 1 ft.

### 4.4 Rookgas Analyzer

De rookgas analyser meet de concentratie van NO<sub>x</sub>, CO & O<sub>2</sub> in de rookgas. Rookgas wordt continue uit het fornuis aangezogen, gekoeld en aanwezige waterdamp wordt gecondenseerd.

Manufacturer Analyzer:	Ecom
Type of Analyzer:	J2KN-PRO (NO, NO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> and O <sub>2</sub> analyzer)
Serial No Analyzer:	10743 / 45773
Standard:	NEN EN 50397

### 4.5 Fornuis onderdruk en fornuis temperatuur

De onderdruk in het fornuis wordt met een manometer gemeten. Rookgas wordt met behulp van een rookgas ventilator uit het fornuis naar de schoorsteen geblazen. De onderdruk in het fornuis wordt ingesteld door met de hand het toerental van de rookgas ventilator te regelen (variable speed drive).

De fornuis temperatuur wordt met een thermocouple in het fornuis gemeten. Er is een meting bij de brander en er is een meting bij de fornuis uitlaat.

### 4.6 Metingen

Onderstaande parameters worden gemeten:

- Fuel flow(s)
- Fuel pressure(s) at the burner
- Fuel temperature(s) at the flow skid
- Fuel temperature at burner
- Ambient air temperature and humidity
- The position of the air register
- Furnace box outlet temperature, in the middle and at the burner
- Furnace draft at burner
- The content of O<sub>2</sub>, CO and NO<sub>x</sub> in the flue gas
- The flame color and dimensions (visual)
- Noise (at design and normal firing rate). The overall sound pressure level and individual octave band sound pressure levels.
- Heat flux profile

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

## 5. Test brandstof mengsels

De volgende test brandstoffen worden gebruikt:

Aardgas  
Waterstof (99,999 vol% zuiver)  
Stikstof (99,9 vol% zuiver)

Onderstaande tabel laat de aardgas samenstelling zien.

Test brandstof samenstelling	Aardgas (NG)	Units
CH4	93.12	[vol%]
C2H6	4.58	[vol%]
C3H8	0.82	[vol%]
C4H10	0.34	[vol%]
C5H12	0.04	[vol%]
C6+	0.02	[vol%]
N2	0.54	[vol%]
CO2	0.49	[vol%]
He	0.05	[vol%]
<b>Total</b>	100	[vol%]
<b>MW</b>	17.27	[kg/kmol]
<b>LHV</b>	48606	[kJ/kg]

Table 5-1 Aardgas samenstelling.

---

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---

## **6. Brander test beschrijving**

De brander is horizontaal bevestigd aan het test fornuis.

Voor iedere test wordt de samenstelling van de gebruikte brandstof vermeld alsmede het molecuul gewicht en de verbrandingswaarden (LHV).

Van ieder test punt worden de volgende gegevens vermeld:

Lucht temperatuur bij brander inlaat

Luchtdruk bij brander inlaat

Brander belasting

Brandstof druk bij brander

Stand van de lucht klep.

Fornuis temperatuur bij de brander

Fornuis temperatuur bij de uitlaat verbrandingskamer

Rookgas analyse, O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>

Hier volgt een beschrijving van tests met verschillende brandstoffen en aangepaste brander geometrieën.

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 6.1 Test serie A

#### Test opstelling

Een brander is horizontaal geïnstalleerd in de test oven.

Twee brandstof gas aansluitingen:

1. aansluiting 1= waterstof gas
2. aansluiting 2= lage druk waterstof mengsel restgas / stikstof mengsel dat typisch uit een toekomstige waterstof fabrieken komt.

Een verbrandingslucht aansluiting, voorzien van een verbrandingslucht klep.

#### Aansteken

Het aansteken van de brander gaat handmatig met een elektrische vonk aansteker in een koude oven en met gesloten brander lucht klep.

Brandstof is H<sub>2</sub>.

Brandstof druk 0.02 barg.

Het UV flame scanner signaal confirmeerde de vlam.



Aansteken met waterstof brandstof

#### 6.1.1 Normale brander capaciteit test A

##### Brandstof samenstelling

Test fuel composition	H <sub>2</sub>	waste gas
H <sub>2</sub> vol%	100	93
N <sub>2</sub> vol%		7
CH <sub>4</sub> vol%		
LHV kJ/kg	119960	58631
MW	2.02	3.84

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---

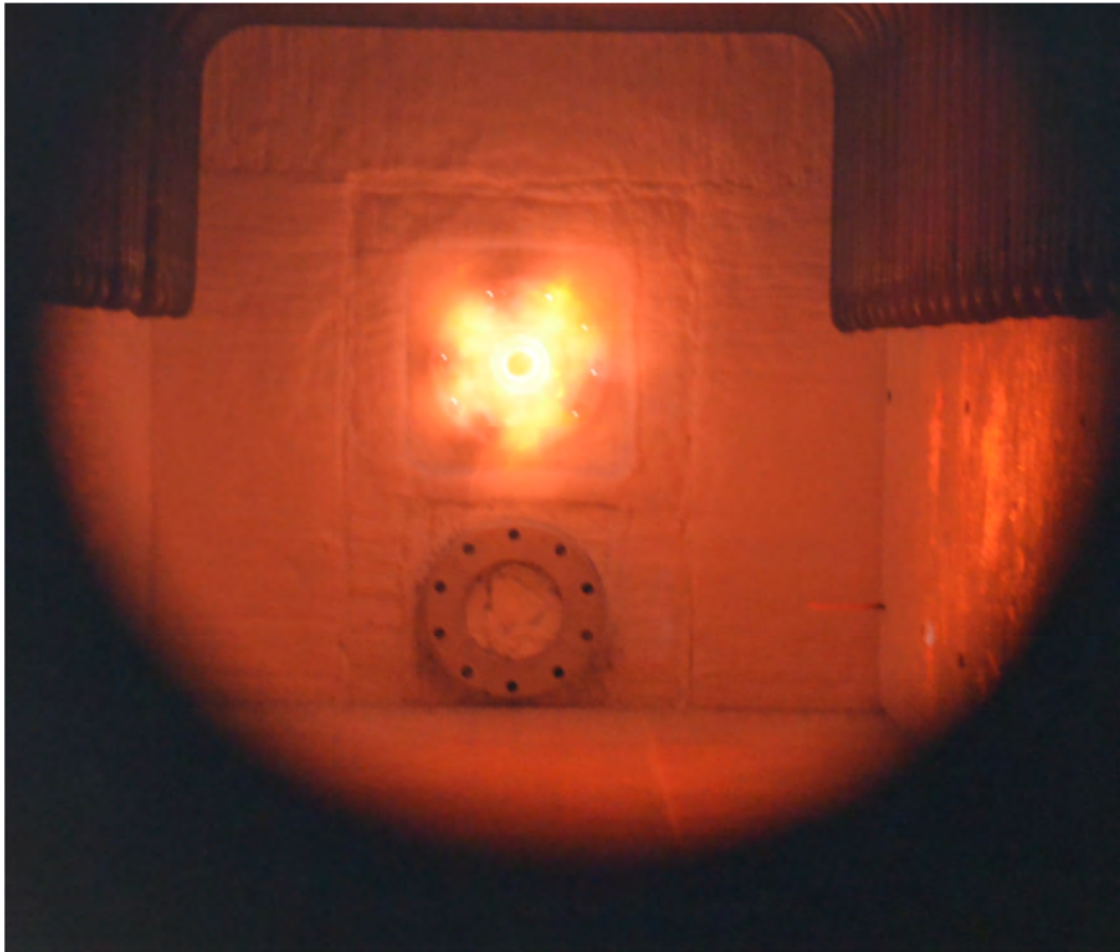
Metingen

Test points	A1	A1	A2	A2	A3	A3
Fuel name	H2	waste gas	H2	waste gas	H2	waste gas
Air temperature °C	222		237		213	
Air pressure mmWC	36		33		31	
burner mode	LN		LN		LN	
fired heat kW LHV	230	1690	173	1740	173	1740
fuel pressure at burner barg	0.18	0.1	0.17	0.11	0.17	0.11
air damper opening	full		full		full	
Furnace temperature at burner °C	673		721		737	
Furnace temperature at exit °C	507		522		540	
Furnace draft mmWC	11		11		11	
O2 vol%	4.4		3.6		2.97	
CO ppmvd	0		0		0	
NO ppmvd	101.4		108.1		103.2	
NO2 ppmvd	6.6		6.2		5	



**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---



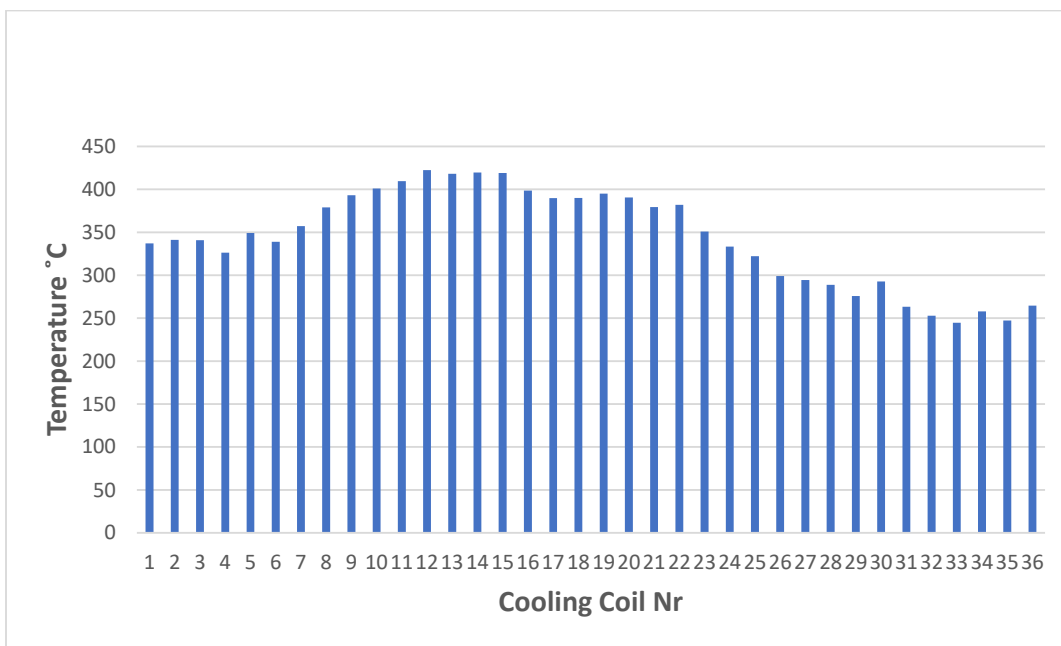
Normaal bedrijf met waterstof en waterstof/N2 brandstof

Heat flux meting

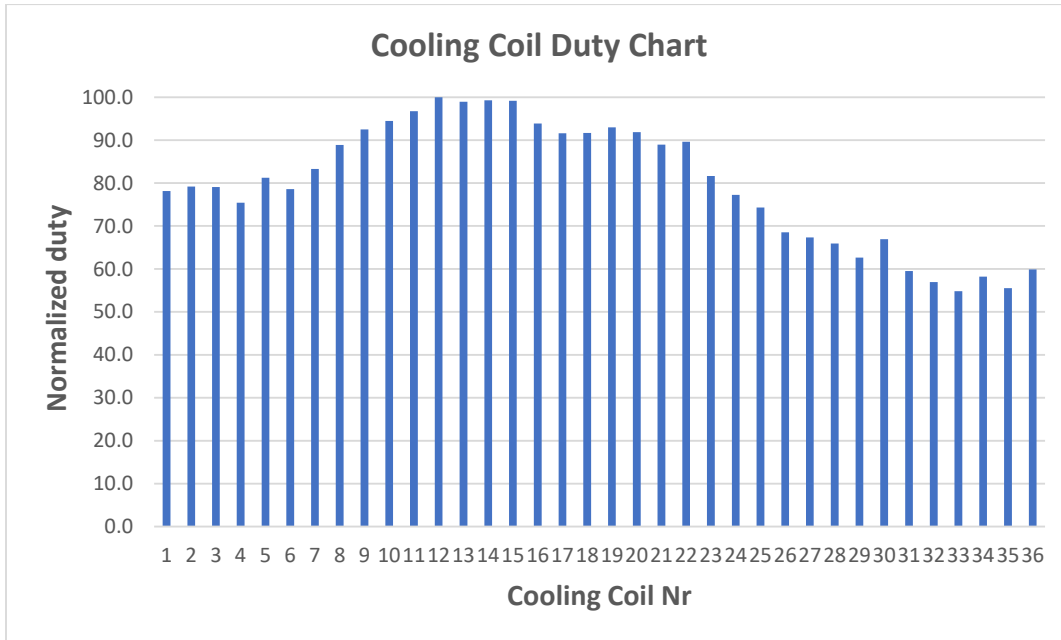
De uitlaat temperatuur van de luchtgekoelde radiant tubes wordt gemeten.  
Met behulp van deze temperaturen wordt een genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis bepaald.



**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



Uitlaat temperatuur lucht gekoelde stralings buizen test A1



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis Test A2

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

**6.2 Test serie B**

Test opstelling

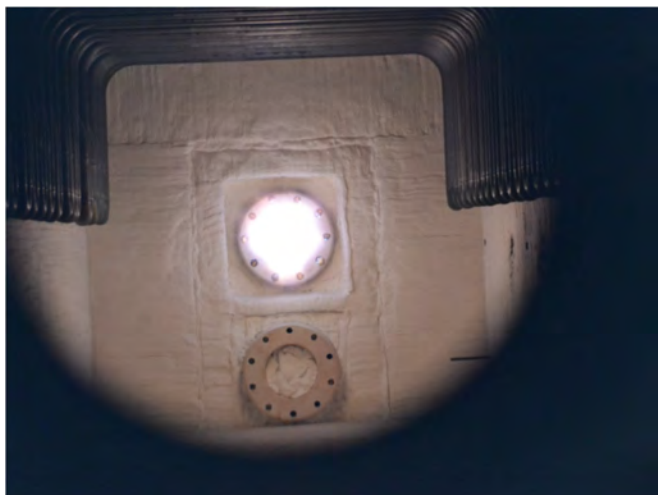
Een brander is horizontaal geïnstalleerd in de test oven.

Er zijn twee brandstof gas aansluitingen:

1. aansluiting 1= waterstof gas
2. aansluiting 2= lage druk waterstof / stikstof mengsel dat typisch uit een toekomstige waterstof fabrieken komt.

Aansteken

Het aansteken van de brander gaat handmatig met een elektrische vonk aansteker in een koude oven en met gesloten brander lucht klep.



Brandstof is H<sub>2</sub>.  
Brandstof druk 0.01 barg.

**6.2.1 Normale brander capaciteit test B**

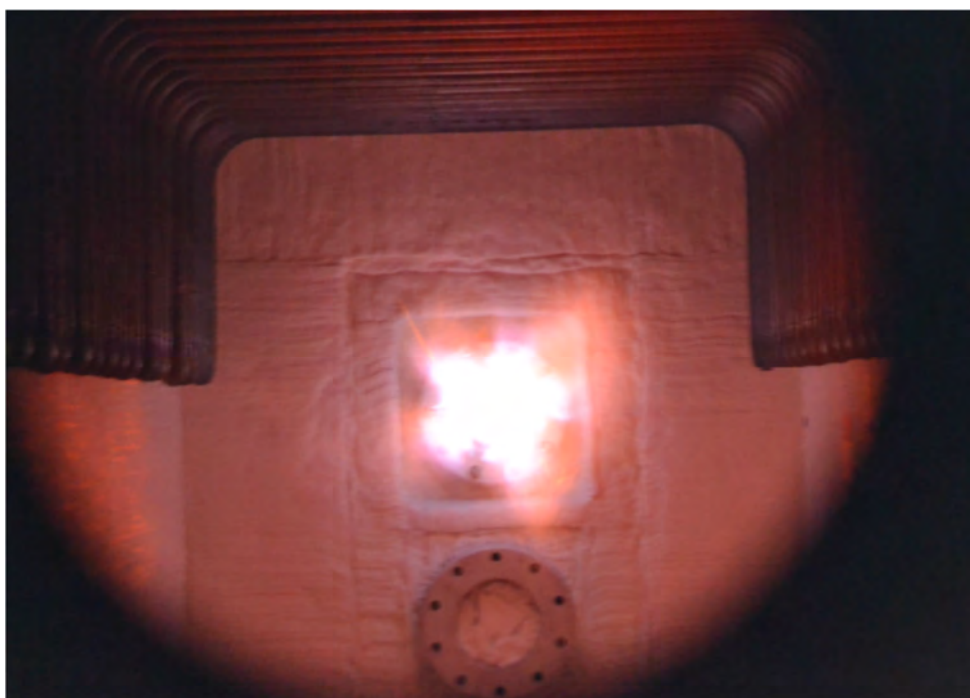
Brandstof samenstelling

Test fuel composition	H2	waste gas	natural gas	waste gas 2
H2 vol%	100	88		
N2 vol%		13		37
NG vol%			100	63
LHV kJ/kg	119960	40184	48635	24921
MW	2.02	5.27	17.29	21.26

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

Metingen

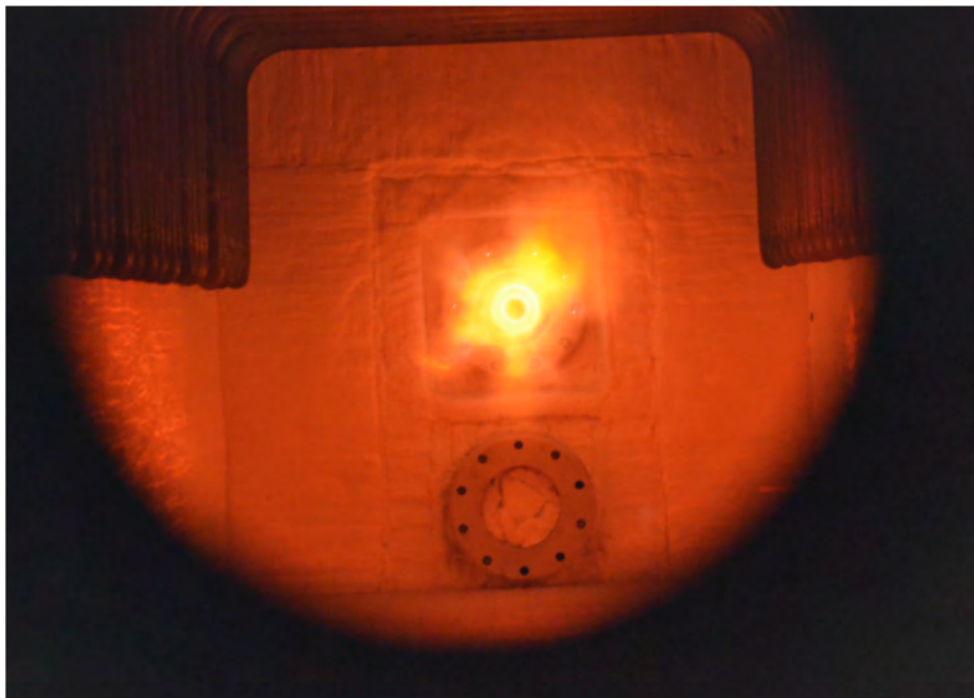
Test points	B2	B2	B3	B3	B4	B4	B5	B5
		waste		waste		waste		waste
Fuel name	NG	gas	H2	gas	H2	gas	NG	gas 2
Air temperature °C	189		201		217		217	
Air pressure mmWC	45		46		46		46	
burner mode	LN		LN		LN		LN	
fired heat kW LHV	110	850	1090	850	1090	850	950	750
fuel pressure at burner barg	0.135	0.1	1.81	0.11	1.81	0.11	1.31	0.07
air damper opening	full		full		full		full	
Furnace temperature at burner °C	689		751		806		772	
Furnace temperature at exit °C	526		537		562		580	
Furnace draft mmWC	8		7		9		7	
O2 vol%	1.95		3.72		1.84		2.19	
CO ppmvd	0		0		0		0	
NO ppmvd	69		126		145.7		56.1	
NO2 ppmvd	2.2		5.4		3.7		1	



Normaal bedrijf test B2 met aardgas en waterstof/N2 brandstof

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

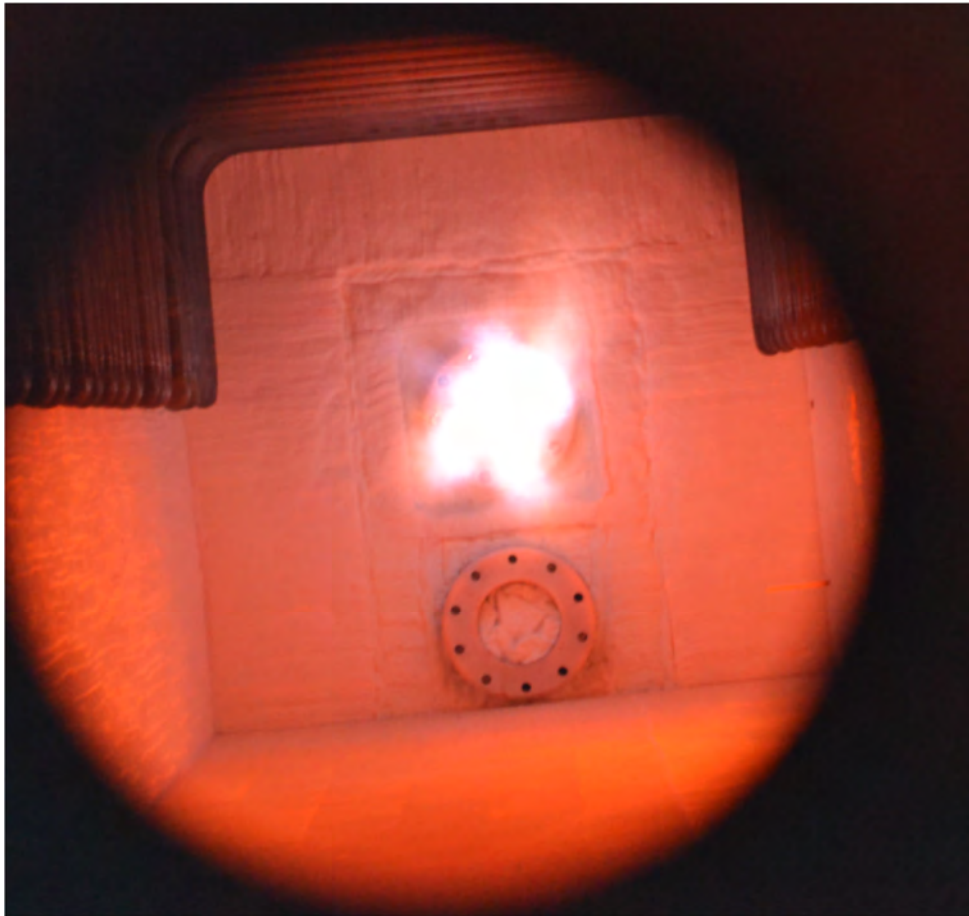
---



Normaal bedrijf test B3 met waterstof en waterstof/N2 brandstof

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---

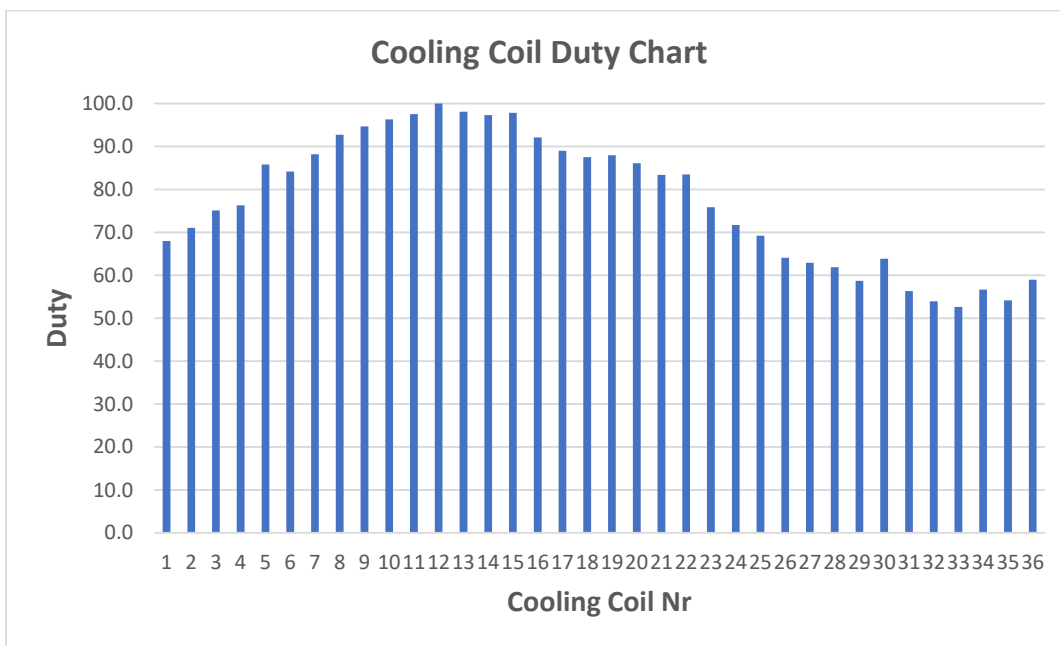


Normaal bedrijf test B5 met aardgas en aardgas/N2 brandstof

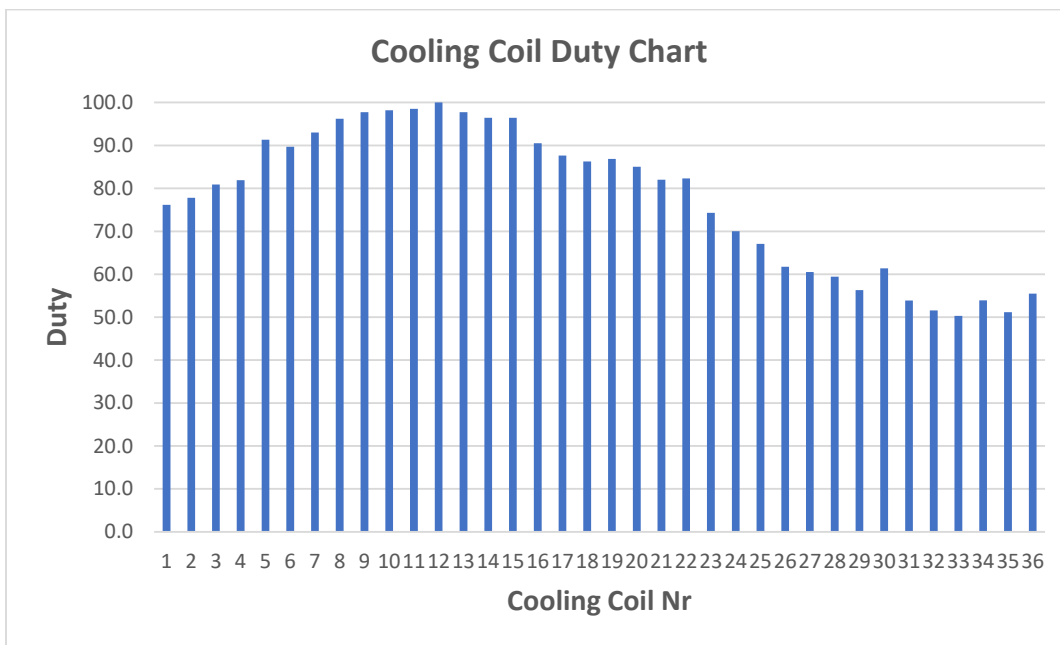
Heat flux meting

De uitlaat temperatuur van de luchtgekoelde radiant tubes wordt gemeten.  
Met behulp van deze temperaturen wordt een genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis bepaald.

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

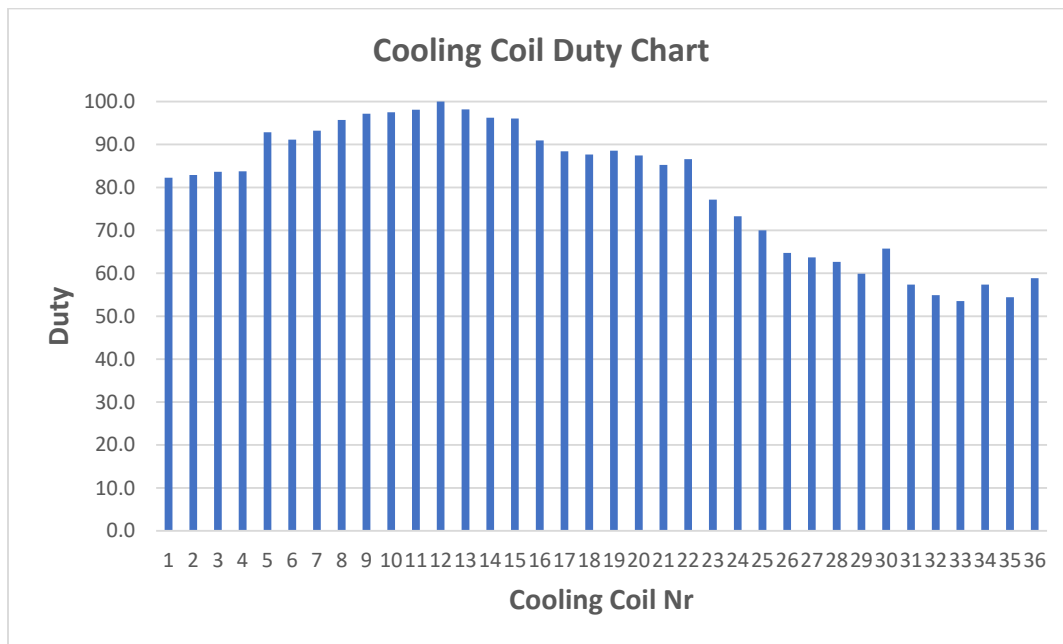


genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis Test B2



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis Test B5

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis Test B5

### 6.3 Test serie C

#### 6.3.1 Normale brander capaciteit test C

Brandstof samenstelling

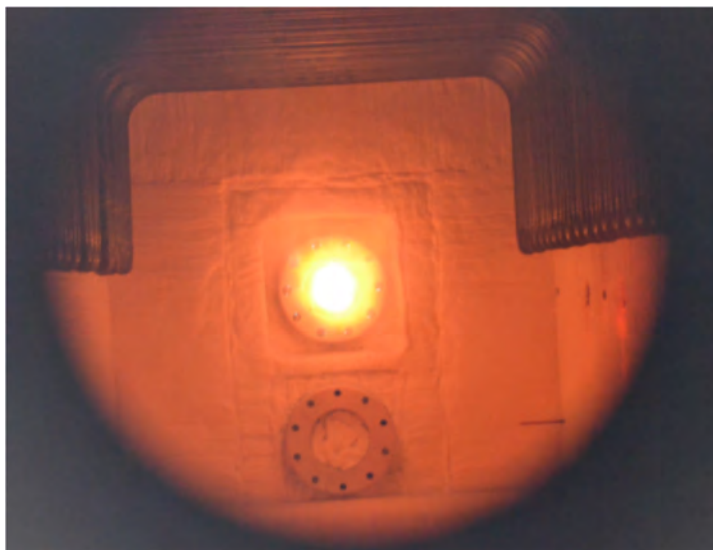
Test fuel composition	H2
H2 vol%	100
N2 vol%	
NG vol%	

LHV kJ/kg	119960
MW	2.02

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

Metingen

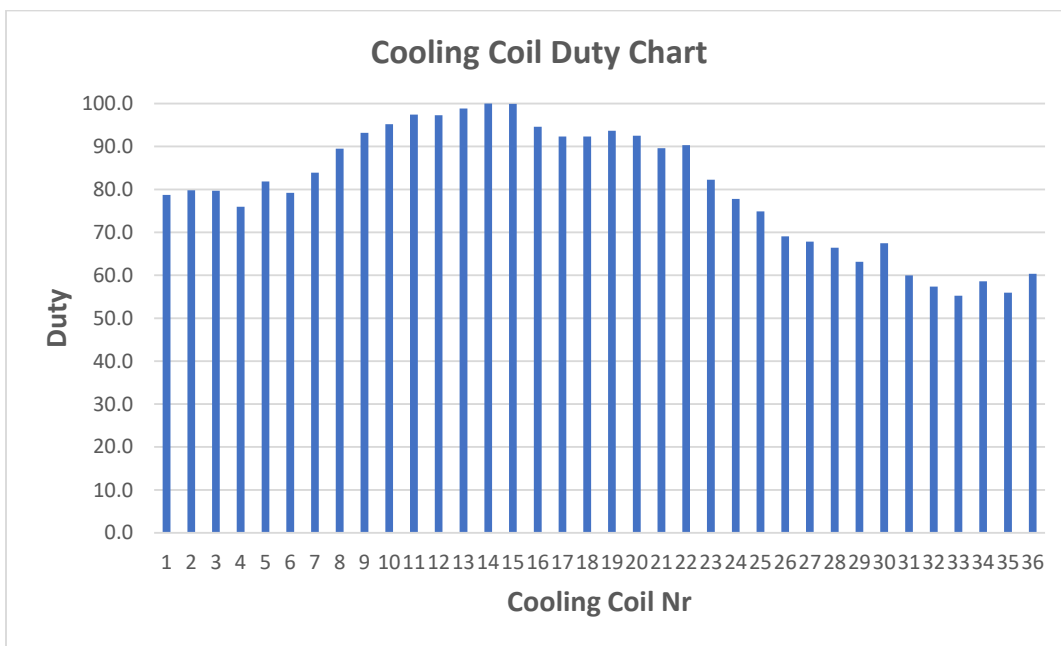
Test points	C12	C12
Fuel name	H2	H2 waste gas
Air temperature °C	214	
Air pressure mmWC	40	
burner mode	LN	
fired heat kW LHV	1090	850
fuel pressure at burner barg	1.73	0.43
air damper opening	full	
Furnace temperature at burner °C	709	
Furnace temperature at exit °C	555	
Furnace draft mmWC	12	
O2 vol%	3.9	
CO ppmvd	0	
NO ppmvd	116	
NO2 ppmvd	4.5	



Normaal bedrijf test C12 met waterstof brandstof



**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis Test C12

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 6.4 Test serie J

#### Test opstelling

Een brander is horizontaal geïnstalleerd in de test oven.

Er zijn twee brandstof gas aansluitingen

- Aansluiting 1 vlam stabilizer
- Aansluiting 2 direct staging lances

De brander is horizontaal geïnstalleerd boven de vloer zodat de vlam langs de oven vloer brand.

Het is mogelijk om brandstof aansluitingen 1+2 gecombineerd van brandstof te voorzien of afzonderlijk.

Daarnaast is een mogelijkheid om met een injectie buis stikstof in de luchtstroom van de brander te injecteren.

#### Aansteken

Het aansteken van de brander gaat handmatig met een elektrische vonk aansteker in een koude oven en met gesloten brander lucht klep.



Brandstof is aardgas.  
Brandstof druk 0.02 barg.

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

**6.4.1 Normale brander capaciteit test J**

Brandstof samenstelling

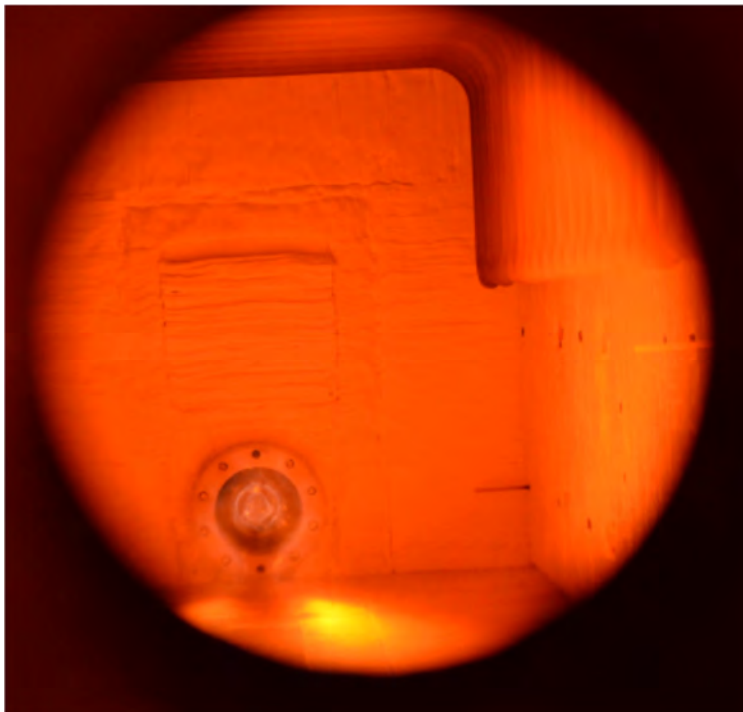
Test fuel composition	H2	natural gas
H2 vol%	100	
N2 vol%		
NG vol%		100
LHV kJ/kg	119960	48635
MW	2.02	17.29

Test points	J1	J4	J6 95% H2+ 100Nm3/h FGR/N2
Fuel name	H2	NG	
Air temperature °C	Amb	Amb	Amb
Air pressure mmWC	Atm	Atm	Atm
burner mode	LN	LN	LN
fired heat kW LHV	1800	1800	1800
fuel pressure at burner barg	0.4	0.25	0.4
air damper opening	4.5	6.5	4.5
Furnace temperature at exit °C	862	866	924
Furnace temperature °C	1005	968	993
Furnace draft mmWC	20	20	20
O2 vol%	2.4	1.6	1.5
CO ppmvd	0	0	0
NO ppmvd	98	34.5	62.6
NO2 ppmvd	3.6	1.4	1.4

Voor test J6 is via een extra aansluiting in de lucht inlaat 100 Nm3/h stikstof geïnjecteerd als NOx mitigatie oplossing. De NOx emissie blijkt hierdoor verlaagd te worden t.o.v. test 1 zonder stikstof injectie.

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**

---



Normaal bedrijf test J1 met waterstof brandstof



Normaal bedrijf met aardgas brandstof

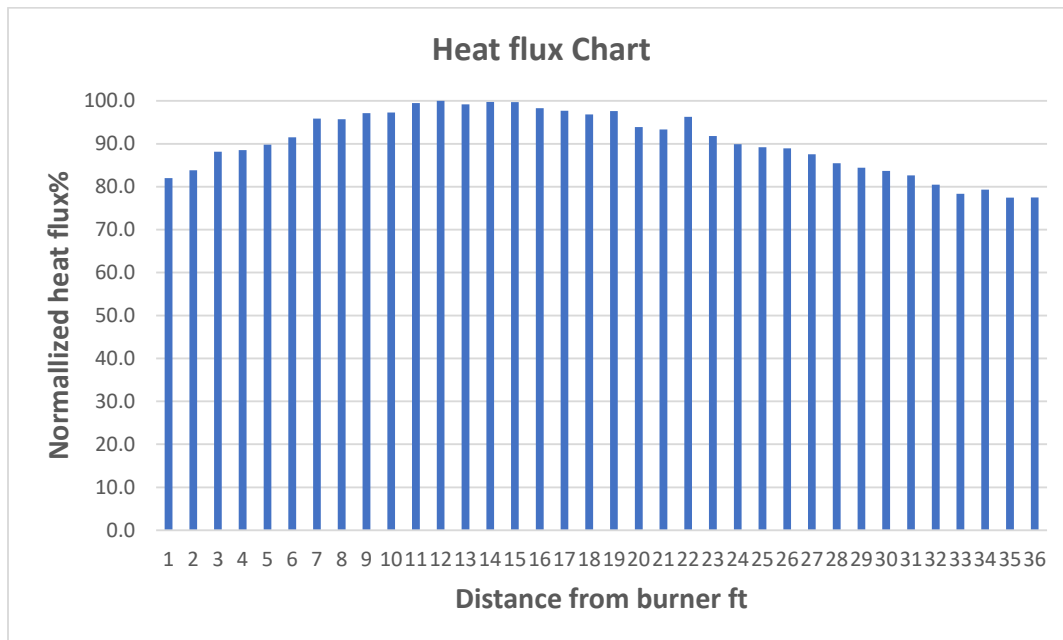
**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



Normaal bedrijf met 95% waterstof brandstof en 100 Nm3 stikstof injectie in verbrandingslucht.

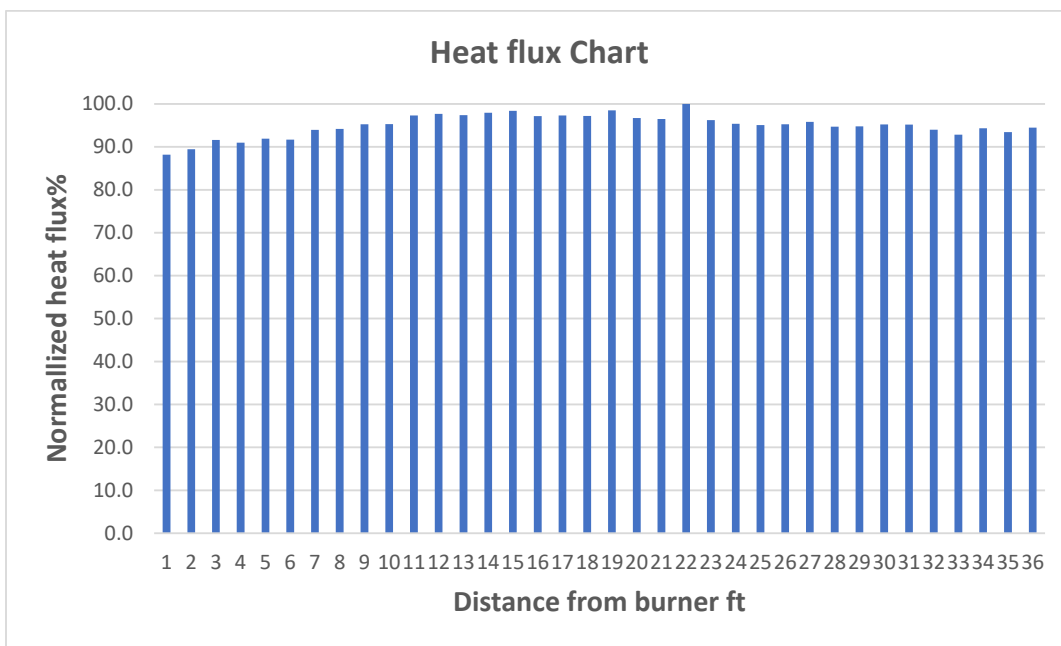
Heat flux meting

De uitlaat temperatuur van de luchtgekoelde radiant tubes wordt gemeten. Met behulp van deze temperaturen wordt een genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis bepaald.

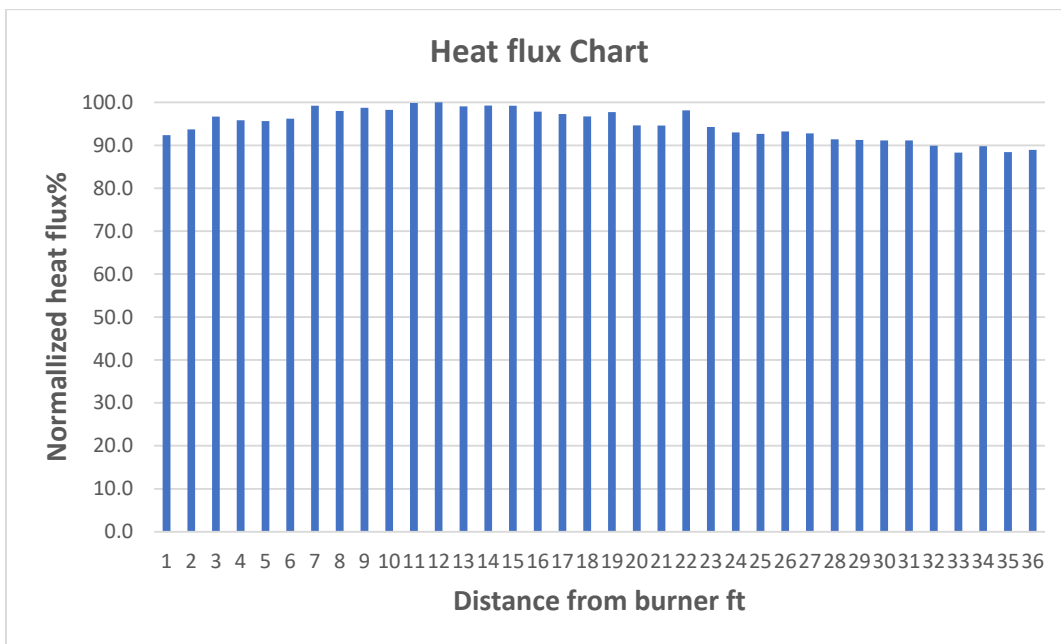


genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis test J1

**Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063**



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis test J4



genormaliseerd heat duty profiel van de brander vlam in het fornuis test J6

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

### 7. Discussie

De vlamlengte hangt mogelijk af van de volgende parameters

- Brandstof samenstelling (H2 gehalte)
- Brander geometrie (brandstof injectoren)

De NOx emissie hangt mogelijk af van de volgende parameters

- Brandstof samenstelling
- Brander geometrie (brandstof injectoren)
- Hoeveelheid brandstof naar de stabilisator
- Luchtvoorverwarmingstemperatuur

De bovenstaande parameters zijn onderzocht door het effect van verandering van een parameter uit te zetten tegen de vlamlengte en NOx emissie.

Waterstof brandstof heeft als voordeel dat bij verbranding geen CO2 ontstaat. In de onderstaande tabel zijn de twee brandstoffen met elkaar vergeleken.

	Natural gas	Hydrogen fuel
MW	16	2
LHV kJ/kg	50,000	120,000
Flame speed m/s	0.3	2.4
LEL / UEL in air vol%	5 - 17	4 – 75
Ignition energy mJ	0.1	0.019
Auto ignition temperature °C	540	560
Adiabatic flame temp. °C	1963	2210
Special API requirements		H2 service for partial pressure >700 kPag

Vergelijking aardgas brandstof met waterstof brandstof

De verbrandingssnelheid van waterstof/lucht is veel hoger dan die van aardgas. Hoge verbrandingssnelheid van de brandstof verhoogt de kans op ongewenste flashback in premix branders. Om deze reden worden premix branders waar brandstof intens gemengd wordt voor de verbranding niet aanbevolen voor een waterstof percentage boven 70%.

Waterstof heeft een hoge vlamtemperatuur. Dit heeft mogelijk invloed op de vorming van stikstof oxiden (NOx) dat bij hoge temperatuur plaatsvindt.

API 535 geeft aan dat waterstof brandstof een factor 1.55 hogere NOx emissie geeft dan methane brandstof. Het is niet duidelijk of deze waarde ook betrekking heeft op branders voor hoge temperatuur fornuizen met lucht voorverwarming.

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

### 7.1 Vlamlengte/ warmteverdeling

Het is mogelijk om met een rekenmodel de gemeten temperaturen van de luchtgekoelde stralingsbuizen te transformeren naar lokale rookgas temperatuur in de stralingszone. De locatie van de hoogste uittrede temperatuur van de stralingsbuizen is gelijk aan de locatie van de hoogste lokale rookgas temperatuur.

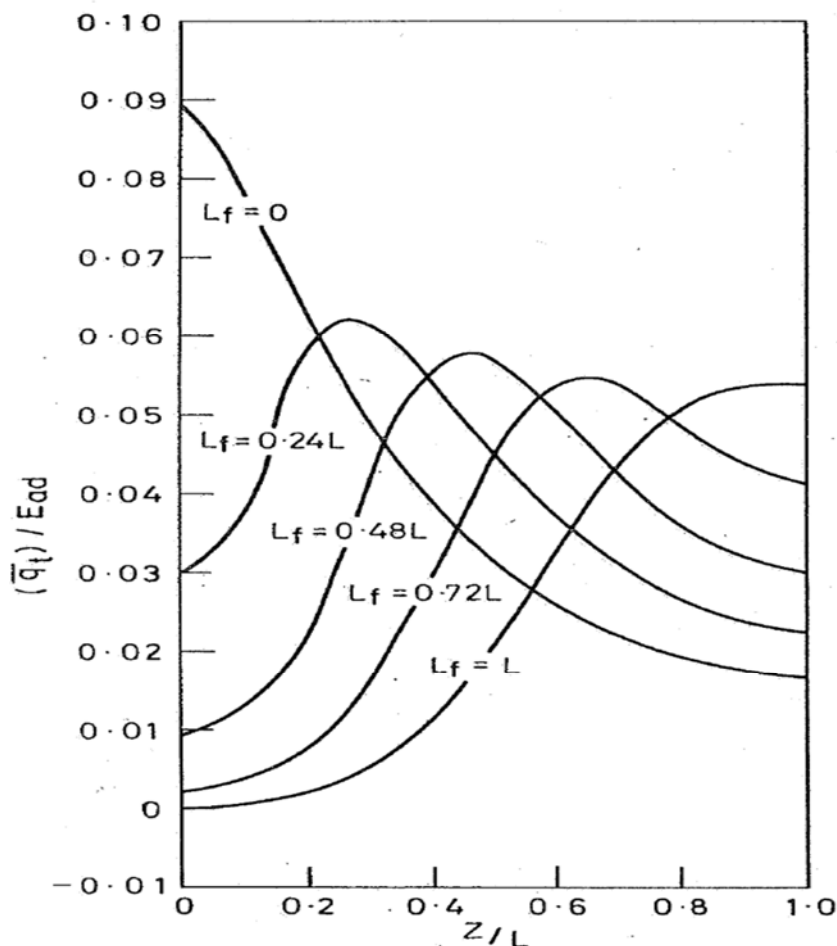


FIG. 6 Distribution of dimensionless average radiant flux density at the tube surfaces for various flame lengths.

Een analyse van Selcuk (1975) geeft aan dat de locatie van de piek heat flux gelijk is aan de vlamlengte.

“ The net flux to the tube surfaces increases up to the region of the end of the flame where combustion is complete, passes through a maximum, and then decreases continuously up to the furnace exit “.

N.Selcuk, R.G.Seddal, and J.M.Beer, Prediction of the effect of flame length on temperature and radiative heat flux distributions in a process fluid heater, J. Inst. Fuel, 89-96, 1975.



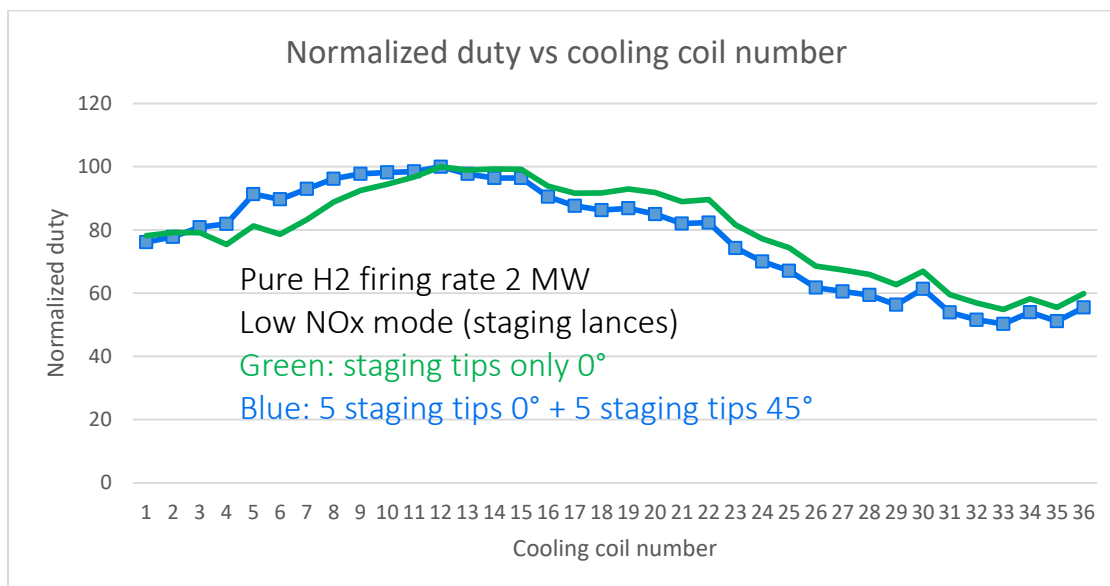
## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

Deze bevinding is erg belangrijk voor het meten van vlamlengte van branders die met waterstof brandstof werken. Immers de vlammen van waterstof brandstof zijn nagenoeg niet zichtbaar. Het meten van de heatflux in een fornuis is hiervoor een uitkomst.

Het blijkt dat de locatie van de hoogste duty in het fornuis, de vlamlengte af hangt van de geometrie van de brander.

De vlamlengte wordt korter als staging lances worden gebruikt waarbij de brandstof iets naar het midden van de brander wordt gestuurd. De vlam is langer als staging lances worden gebruikt met een stromingsrichting parallel met de brander langs as.

Als voorbeeld is in de onderstaande figuur het heat flux profiel van test B3 vergeleken met test C12. De brander met staging tips 0° heeft een vlamlengte van 15 feet terwijl de brander met de staging tips (45°) een vlamlengte heeft van 12 feet. Zie onderstaande figuur.



Opgemerkt wordt dat de locatie van de piek heatflux (vlamlengte) voor de brander met de snake eye tips in tests A en B 12 feet is voor verschillende brandstoffen.

Een brander met brandstof injectoren die in de verbrandingsluchtstroom zijn gericht geven kortere vlam lengte.

Verandering van de brandstof samenstellingen tussen aardgas en 100% waterstof heeft nagenoeg geen effect op de vlamlengte.

In geen enkele test was er een aanwijzing dat de temperatuur van de brandstof injectoren hoger was bij waterstof dan bij andere brandstoffen.

## 7.2 NOx emissie

De NOx formatie in een vlam hangt af van onder andere de brandstof samenstelling, de brander geometrie, luchtvoorverwarmingstemperatuur en vuurhaard temperatuur.

API 535 geeft aan dat waterstof brandstof hogere NOx formatie geeft voor dezelfde brander bij verschillende brandstoffen.

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

- Brandstof samenstelling
- Brander geometrie (brandstof injectoren)
- Hoeveelheid brandstof naar de stabilisator
- Luchtvoorverwarmingstemperatuur

Het effect van toepassen van andere brandstof injectoren is te zien door vergelijken van tests b4 en c12.

Bij vrijwel gelijke condities is de NOx emissie van de brander met een aantal brandstof injectoren met 45° injectie hoek 23 procent hoger dan de NOx emissie van de brander met enkel injectoren met 0° injectie hoek.

Test	b4	c12
staging lances	5 x 0°	5 x 0°
	<b>5 x 45°</b>	5 x 0°
fired Fuel 1 kW	1090	1090
fired Fuel 2 kW	850	850
combustion air °C	217	214
T exit flue gas°C	562	555
O2 vol%dry	1.8	3.9
<b>NOx ppmvd</b>	<b>149</b>	<b>121</b>

Het effect van waterstof gehalte op NOx van een brander is te zien door vergelijken van tests met verschillend waterstof gehalte in aardgas-waterstof brandstof.

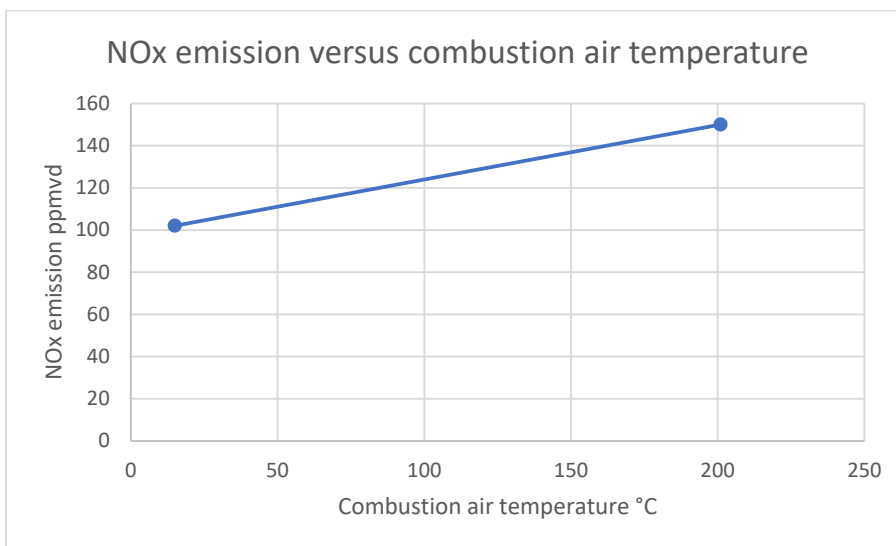
Deze toename staat in schril contrast met de genoemde waarde van 55% NOx toename in API 535.

De stijging van NOx emissie met toename van het waterstof gehalte in de brandstof is uitgezet in de onderstaande figuur.

Het effect van verbrandingslucht temperatuur op NOx van een waterstof brander is te zien door vergelijken van tests j1 met b4.

Test	j1	b4
H2 content	100	98
fired heat kW	1800	1940
verbrandingslucht temperatuur °C	ambient	201
T exit fluegas°C	862	537
O2 vol% dry	2.4	1.8
NO ppmvd	98	146
NO2 ppmvd	4	4
NOx ppmvd	102	150

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063



NOx emissie versus verbrandingslucht temperatuur voor waterstof brandstof.

De gemeten NOx toename voor waterstof brandstof bij een verbrandingslucht temperatuur van 200° bedraagt 47%.

API 535 suggereert een NOx toename voor een verbrandingslucht temperatuur tussen 18% en 38%. De gemeten NOx toename is iets hoger dan de verwachte waarde in API 535.

## Waterstof brander met elektrische lucht voorverwarming voor proces fornuizen, DEI 121063

---

### 8. Samenvatting

Waterstof is een zeer goede brandstof voor proces fornuizen.

Bestaande branders zijn niet automatisch geschikt voor waterstof brandstof, met name als de branders voorgemengd type zijn (premix) waarbij brandstof intensief gemengd wordt met verbrandingslucht voor verbranding plaatsvind.

De vlamlengte (locatie van de hoogste warmte straling/ temperatuur in de oven) blijkt niet afhankelijk te zijn van de brandstof samenstelling. Bij een hoog of laag waterstof gehalte in de brandstof blijft de vlamlengte vrijwel gelijk.

Het is mogelijk om de vlamlengte van de geteste brander aan te passen met andere brandstof injectoren.

De emissie van NO<sub>x</sub> voor waterstof brandstof is hoger dan de NO<sub>x</sub> emissie van aardgas. API 535 suggereert een NO<sub>x</sub> toename van 55 procent, echter in dit verslag is een toename van 180 procent gevonden.

De emissie van NO<sub>x</sub> bij het toepassen van luchtvoorverwarming is hoger dan de NO<sub>x</sub> emissie van branders zonder luchtvoorverwarming. De voorgestelde correlatie in API 535 voor NO<sub>x</sub> versus verbrandingslucht temperatuur blijkt ook geldig voor de geteste waterstof brander.

Een meting van de temperatuur verdeling in een (test) fornuis kan nauwkeurige informatie over de vlamlengte geven. Vlamlengte is een belangrijke parameter in fornuis simulatie software zoals het SPYRO programma voor fornuis berekeningen.