

Your partner in bioenergy

BIOMASS4TRANSPORT

DUURZAME TRANSPORTBRANDSTOF VIA VERGASSING VAN
PYROLYSE OLIE

Openbaar eindrapport

Colofon:

Projectnummer: TBBE119005

Projecttitel: Duurzame transportbrandstof via vergassing van pyrolyse olie – Biomass4transport

Penvoerder: BTG Biomass Technology Group BV

Deelnemer: TUD Technische Universiteit Delft

Projectperiode: 01-01-2020 t/m 30-06-2023

Contact:

BTG Biomass Technology Group BV

Dr. Ir. E.J. (Evert) Leijenhorst

+31(0)534861186

leijenhorst@btgworld.com

Samenvatting van de uitgangspunten en doelstelling van het project

In het Biomass4transport project wordt de productie van vier duurzame transportbrandstoffen (benzine, diesel, CNG en waterstof) uit biomassa residuen onderzocht. De productie route bestaat uit drie stappen;

- i. Decentrale conversie van de biomassa residuen via pyrolyse voor de productie van de vloeibare bio-energiedrager “FPBO” (Fast Pyrolysis Bio-Oil);
- ii. Centrale vergassing van FPBO in een autotherm katalytisch reformer voor de productie van schoon synthese gas;
- iii. Omzetting van synthese gas tot transportbrandstof.

Het experimentele onderzoek wat in het project is uitgevoerd is gericht op de tweede stap, de vergassing van FPBO. Hiervoor is gekozen aangezien zowel de productie van FPBO (i) als de omzetting van synthese gas tot transportbrandstof (iii) reeds op commerciële schaal worden uitgevoerd. Voor de vergassing van FPBO wordt een hybride systeem beoogd, waarbij een combinatie gemaakt wordt met water elektrolyse voor de productie van waterstof en zuurstof. De zuurstof wordt als oxidatie medium in de vergasser gebruikt, terwijl de waterstof wordt bijgemengd in het synthese gas om zo tot hogere opbrengsten te kunnen komen. Door de hybride benadering zal de transportbrandstof deels als e-fuel en deels als biobrandstof worden geclassificeerd. De beoogde route (waardeketen) is in zijn geheel gemodelleerd, met als doel de technische en economische haalbaarheid van de productie van de vier transportbrandstoffen te onderzoeken. Daarnaast is via een LCA (life cycle analysis) ook de duurzaamheid van de route onderzocht.

Het project is een samenwerking tussen BTG Biomass Technology Group BV, een MKB uit Enschede, en de Technische Universiteit Delft (TUD) afdeling Proces & energie (faculteit 3mE).

BTG Biomass Technology Group BV (BTG, www.btgworld.com) is gespecialiseerd in het omzetten van biomassa naar energie en producten. Binnen BTG zijn circa 30 medewerkers actief, verdeeld over twee business units; consultancy en technologieontwikkeling. Beide afdelingen dragen bij aan het *Biomass4transport* project. De snelle pyrolyse van biomassa voor de productie van pyrolyse olie is één van de kernactiviteiten, waarbij BTG (via zusterbedrijf BTL) in de afgelopen 10 jaar wereldwijd een duidelijke voortrekker is geworden. Naast de productie van pyrolyse olie is ook het gebruik hiervan in diverse toepassingen een belangrijk deel van de onderzoeksactiviteiten. In het huidige project wordt de vergassing van pyrolyse olie doorontwikkeld. De toepassing van pyrolyse olie voor de productie van syngas stelt BTG in staat pyrolyse olie als grondstof in te zetten voor de productie van (conventionele) transportbrandstoffen, en direct in te voeren in bestaande markten. De toegevoegde waarde zit hierbij niet alleen in de ontwikkeling van een vergassingstechnologie, maar ook in de stimulans die de ontwikkeling op de pyrolyse olieproductie zal opleveren.

BTG maakt in het project gebruik van een reeds gebouwde pyrolyse olie vergasser. Deze vergasser is specifiek ontworpen om de uitdagingen die ontstaan bij de vergassing van pyrolyse olie aan te pakken. Hierbij zijn de drukverstuiving en de katalytische conversie de

twee belangrijkste aandachtspunten. De vergasser heeft een capaciteit van ~2 kg/uur pyrolyse olie (~10 kW), waardoor ook bijvoorbeeld de warmtebalans van het systeem op een goede manier onderzocht kan worden en de (storende) invloed van bijvoorbeeld elektrische ovens beperkt wordt. De vergasser wordt bedreven door operators met meer dan 10 jaar ervaring in zowel pyrolyse als vergassing. De concrete bijdrage van BTG in het project bestaat uit het (door)ontwikkelen van een drukverstuiver voor pyrolyse olie, uitvoeren van testen in de vergasser, analyse van grondstof en product, uitvoeren van een economische en duurzaamheidsevaluatie, en de project coördinatie.

Project partner Technische Universiteit Delft (www.tudelft.nl) is een kennisinstelling die actief is in onderzoek naar oplossingen voor maatschappelijke problemen. De groep Large-Scale Energy storage (faculteit 3mE, afdeling Process & Energy, <https://www.tudelft.nl/3me/afdelingen/process-energy/themes/theme-energy/>) heeft als research focus het ontwikkelen van processen voor grootschalige energieopslag, van belang voor toenemende integratie van intermitterende energiebronnen als zonne- en windenergie, en integratie met biomassaconversie via thermochemische routes, met name synthesegas generatie. De groep bestaat uit 2 vaste stafleden en ~15 promovendi, postdocs en research associates. In de groep is meer dan 25 jaar ervaring op het gebied van biomassa vergassing, met name wervelbedvergassing in meerdere reactor- en procesconcepten op kleine pilotschaal, alsmede daaraan gekoppeld biomassakaracterisering (pyrolyse onder diverse condities) en systeem integratie modellering. Dit project omvat de vergassing onder druk van pyrolyse olie met zuivere zuurstof. In de groep is praktische ervaring met stoom-zuurstof gebaseerde biomassavergassing en benodigde gasreiniging voor integratie met downstream upgradering van het synthesegas naar chemicaliën en brandstoffen. De groep kan met dit project een studie verrichten naar optimalisatie van de procesintegratie met technologie die relevant is voor energieopslag: integratie van groterschalige electrolyzers aan met name ook de zuurstof-producerende anode; verder is de toepassing van de pyroprobe met bio-olie relatief nieuw om het effect van verhittingsnelheid van bio-olie druppels op de vrijkomende ontledingsproducten te bestuderen. Dit kan tot verbetering van de modellen leiden bij vergassing van bio-olie aangezien de snelle pyrolyse stap de initiatie is van de chemische omzetting van de olie en medebepalend is voor de vergassingskarakteristieken.

De doelstelling van het project is de potentie van de productie van de vier transportbrandstoffen te onderzoeken, er zijn een 5-tal onderzoeksvragen gedefinieerd welke beantwoordt moeten worden:

- *Hoe beïnvloeden de fysisch-chemische eigenschappen van de pyrolyse olie het proces en wat is de verklaring hiervan?*
- *Kan de theoretisch maximale synthesegas opbrengst behaald worden in de vergasser, en zo niet, wat is de beperkende factor?*
- *Wat is de verwachte kostprijs voor de vier transportbrandstoffen wanneer deze via vergassing geproduceerd worden uit pyrolyse olie?*
- *Welk product is het meest veel belovend voor commerciële implementatie?*
- *Welk product levert de hoogste CO₂ besparing op?*

Beschrijving van de resultaten, knelpunten en het perspectief voor toepassing

Het project heeft de gewenste resultaten opgeleverd, alle vijf de onderzoeksvragen zijn beantwoord (zie volgende pagina). Hieronder worden eerst de specifieke resultaten van het experimentele werk weergegeven, gevolgd door een opsomming van de resultaten van het modelwerk.

De belangrijkste resultaten van het experimentele werk zijn:

- ✓ Aanpassen van een pyroprobe systeem om de snelle opwarming van FPBO te onderzoeken. Opwarmingsnelheden tot ~ 1000 °C per seconde zijn behaald.
- ✓ Het mechanisme van koolvorming tijdens de snelle opwarming is onderzocht door verschillende fracties van de FPBO te gebruiken.
- ✓ Een verstuiver op basis van ultrasone trillingen is ontwikkeld om pure FPBO in de vergasser te verstuiven. Cruciale aspecten zijn een gasdichte olie toevoer, temperaturen tot 950 °C en de directe menging met pure zuurstof en hete stoom.
- ✓ Koolvorming lager dan 1% is behaald in de vergasser, echter werd voor de meeste experimenten een koolvorming tussen de 2 en 5% behaald.
- ✓ Het synthesegas uit de vergasser is schoon en nagenoeg teer vrij (< 10 mg/Nm³). Typische samenstelling van het gas (op volume basis) is 45-50 % H₂, ~ 30 % CO₂ en ~ 20 % CO. De methaan concentratie is vaak $< 0.1\%$.
- ✓ Een synthesegas productie van 49 mol per kilogram FPBO is behaald, dit komt overeen met het theoretisch maximum van het proces.
- ✓ Toevoeging van een adsorptie materiaal om de katalysator te beschermen tegen zwavel vervuiling werkt, echter dient de koolvorming verder verlaagd te worden om drukopbouw in het systeem te voorkomen.

De belangrijkste resultaten van het modelwerk voor de vier transportbrandstoffen zijn in onderstaande tabel weergegeven:

	Massa efficiëntie [kg / kg FPBO]	Energie efficiëntie [MJ _{prod.} / MJ _{in}]	Minimale verkoop prijs ¹ [€/kg]	GHG emissies ² [kg CO ₂ -eq / MJ]
Hydrogen	0.15	0.63	4.3 – 6.3	0.01
CNG	0.58	0.69	2.1 – 3.1	0.01
Gasoline	0.38	0.53	2.1 – 3.1	0.01
Diesel ³	0.12 (0.32)	0.18 (0.38)	2.2 – 3.2	0.02

¹ = Prijs bevat alleen de investeringskosten en operationele kosten voor FPBO en elektriciteit. Een productiecapaciteit van 100 MW (input), FPBO prijs van 250 €/ton en elektriciteitsprijs van 160 €/MWh.

² = Berekend op basis van H₂ productie uit windenergie.

³ = Productie van diesel via Fischer-Tropsch synthese levert een grote hoeveelheid benzine als bijproduct, tussen haakjes staan de getallen van de totale efficiëntie (diesel en benzine). De minimale verkoopprijs en GHG emissies zijn berekend op basis van beide producten.

De vijf onderzoeksvragen zijn hieronder beantwoordt:

- *Hoe beïnvloeden de fysisch-chemische eigenschappen van de pyrolyse olie het proces en wat is de verklaring hiervan?*

FPBO bestaat uit een mengsel van honderden grotendeels organische chemicaliën. Bij verwarming zullen een aantal van deze componenten in de olie met elkaar reageren en uiteindelijk een vaste stof (kool) vormen. De mate van koolvorming is afhankelijk van de opwarmingssnelheid, en van de concentratie aan reactieve componenten. In het project is de FPBO gescheiden in verschillende fracties om zo de invloed van de verschillende componenten op de koolvorming te onderzoeken. Zowel de lignine als (hemi)cellulose afgeleide componenten vormen kool bij opwarming. Het ontwateren van FPBO versterkt de koolvorming, wat ongewenst is. Het voorkomen van koolvorming door fractionering van de FPBO is niet haalbaar, de beste manier om koolvorming te beperken is door een hoge opwarmingssnelheid te behalen, dit kan bereikt worden door een goede verstuiving van de vloeistof in de vergasser te bewerkstelligen. De vergasser moet zodanig ontworpen worden dat een kleine hoeveelheid kool getolereerd kan worden.

- *Kan de theoretisch maximale synthesegas opbrengst behaald worden in de vergasser, en zo niet, wat is de beperkende factor?*

De maximale synthesegas productie die behaald is was 49 mol (H₂ + CO) per kilogram FPBO, dit komt overeen met het theoretisch maximum. Bij optimale procescondities wordt per kilogram FPBO 1.44 Nm³ aan droog synthesegas gevormd, met als samenstelling (op volume basis) 48% H₂, 20% CO, 31% CO₂ en 0.1% CH₄. Bij suboptimale procescondities is met name de koolvorming in de beperkende factor voor de synthesegas productie.

- *Wat is verwachte kostprijs voor de vier transportbrandstoffen wanneer deze via vergassing geproduceerd worden uit pyrolyse olie?*

De productie kosten worden met name bepaald door de elektriciteitsprijs, en in mindere mate door de FPBO-prijs en de investeringskosten voor de productiefaciliteit. In het project is de 'minimale verkoopprijs' per transportbrandstof berekend op basis van deze drie belangrijkste kostfactoren (zie tabel op de vorige pagina voor details). Wanneer de elektriciteitsprijs daalt van de aangenomen 160 €/MWh naar bijvoorbeeld 100 €/MWh zal de productie van waterstof 4-5 €/kg kosten, terwijl benzine, diesel en CNG allemaal minimaal 2 €/kg gaan kosten. In vergelijking met de fossiele alternatieven zullen dus voor alle producten subsidies en/of belastingvrijstellingen nodig zijn om tot een economisch haalbare businesscase te komen.

- *Welk product is het meest belovend voor commerciële implementatie?*

Op basis van de techno-economische evaluatie blijkt dat de kostprijs voor de verschillende producten op energiebasis vergelijkbaar is. Een voorkeur voor één van de producten zal direct afhangen van het (lokale) scenario voor de productie. Zoals hierboven beschreven zijn fiscale maatregelen noodzakelijk voor de nabije toekomst. Op basis van het onderzoek kan wel gesteld worden dat wanneer er voor CNG gekozen wordt, de hoeveelheid duurzame elektriciteit welke benodigd is significant hoger is dan voor de overige producten. Daarnaast

levert de productie van diesel relatief veel bijproducten (o.a. benzine), deze bijproducten wegen sterk mee in de haalbaarheid van diesel productie via vergassing van FPBO.

- *Welk product levert de hoogste CO₂ besparing op?*

De productie van waterstof levert de hoogste CO₂ besparing van de onderzochte ketens, het onderlinge verschil is echter klein en alle producten laten goede CO₂ besparingen zien. De belangrijkste factor voor de CO₂ besparing is het gebruik van duurzame elektriciteit voor de elektrolyse. Wanneer de huidige (Nederlandse) elektriciteitsmix gebruikt wordt voor elektrolyse zal de CO₂ emissie vergelijkbaar zijn met de fossiele brandstoffen.

De mogelijkheid om CO₂ af te vangen bij de productie-installaties is in de huidige berekeningen nog niet mee genomen. Wanneer CO₂ wordt afgevangen kunnen zelfs negatieve CO₂-emissies behaald worden. Met name voor de productie van waterstof levert dit in potentie zeer hoge besparingen op.

Knelpunten in het project betroffen met name twee praktische zaken. Allereerst was het niet mogelijk om de beoogde opwarmingsnelheid van 20.000 °C per seconde te behalen in de pyroprobe, via een alternatieve route is alsnog het mechanisme van koolvorming verder onderzocht. Ten tweede bleek de beoogde drukverstuiving van FPBO in de vergasser niet de gewenste resultaten op te leveren, in plaats daarvan is een verstuiver op basis van ultrasone trillingen ontwikkeld, welke wel de beoogde resultaten leverde.

Hoge investeringskosten, in combinatie met een onzeker politiek en maatschappelijk klimaat ten aanzien van het gebruik van biomassa, hinderen op dit moment een snelle uitrol van de onderzochte techniek. Belangrijk om te vermelden is dat de route technisch haalbaar is en de producten direct inpasbaar zijn in de huidige markt (drop-in biofuel/e-fuel). Het gebruik van een katalysator in de vergasser levert een hogere efficiëntie ten opzichte van niet-katalytische vergassing, echter dient de lange termijn activiteit van de katalysator verder onderzocht te worden. De berekende CO₂-emissies laten zien dat de producten 80-90% CO₂ besparen ten opzichte van de fossiele alternatieven.

Beschrijving van de bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

Het *Biomass4transport* project past in de programmalijs Thermochemische en Chemisch katalytische conversietechnologie. Biomassa wordt omgezet tot energiedragers via chemische omzetting. Het pyrolyse proces is thermochemisch, hierbij is geen katalysator aanwezig. De vergasser is een combinatie van thermochemische en katalytische conversie en de product opwerking bestaat voor alle beoogde producten uit katalytische processen.

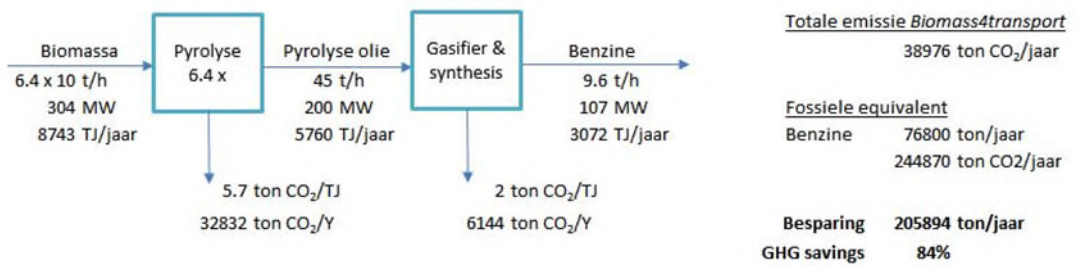
De voorgestelde keten geeft een duidelijke invulling aan de cascadering van biomassa. Er worden vermarkbare producten geproduceerd welke producten uit fossiele grondstoffen 1 op 1 vervangen:

- ✓ Benzine en diesel uit biomassa, in plaats van aardolie
- ✓ Waterstof en CNG uit biomassa, in plaats van aardgas

De tussenstap van snelle pyrolyse levert een aantal specifieke voordelen in de totale keten, maar ook vanuit het oogpunt van cascadering is de ontkoppeling gunstig. Pyrolyse olie op zichzelf al een duidelijke toegevoegde waarde ten opzichte van de biomassa, hierdoor is het al economisch haalbaar om pyrolyse olie uit biomassa te produceren. Pyrolyse olie biedt daarnaast een platform voor verdere raffinage van producten en brandstoffen, analoog aan de rol die aardolie in een traditionele raffinaderij speelt.

De bijdrage in de verduurzaming van de Nederlandse samenleving wordt gerealiseerd door transportbrandstoffen te produceren uit biomassa, waarmee de uitstoot van CO₂ uit fossiele bron wordt vermeden. Afhankelijk van de toepassing van de pyrolyse olie, en eventueel transport tot 500 km naar een centrale verwerking, is de GHG-emissie reductie typisch 80-90% ten opzichte van het fossiele alternatief. Vooral de productie van waterstof heeft zeer veel potentie heeft ten aanzien van CO₂ besparing. Voor de productie van waterstof wordt het syngas na de vergasser namelijk in een lage-temperatuur water-gas-shift reactor volledig naar H₂, CO₂ en H₂O gebracht. H₂O wordt gerecycled naar de vergasser, H₂ wordt gescheiden uit het gas als hoofdproduct, waarna een bijna zuivere stroom CO₂ over blijft. Wanneer deze CO₂ wordt afgevangen ontstaat naar verwachting een keten met negatieve CO₂ emissie, waarbij c.a. 70% van de duurzame koolstof uit de oorspronkelijke biomassa wordt vastgelegd en de energie uit de biomassa in de vorm van waterstof vrijkomt voor (lokaal) emissie loos transport. Wanneer de pyrolyse olieproductie installatie ook een CO₂ afvang systeem implementeert kan tot 100% van de koolstof worden vastgelegd, waarmee netto CO₂ uit de atmosfeer wordt gehaald.

Voor één enkele installatie (200 MW) die benzine produceert is de CO₂ besparing weergegeven in onderstaand figuur. Te zien is dat er in vergelijking met fossiele benzine ruim 200.000 ton CO₂ per jaar bespaard kan worden.



Per vergasser zal ruim 3PJ/jaar aan duurzame transportbrandstof worden geproduceerd. Het herhalingspotentieel van deze ontwikkeling is zeer goed, de Nederlandse markt voor transportbrandstof bedraagt op dit moment grofweg 400 PJ/jaar. In de nabije toekomst is de verwachting dat een belangrijk deel van de transport elektrisch uitgevoerd kan worden, echter is er ruimte genoeg voor de huidige keten.

De maatschappelijke relevantie van het project is zeer groot. Door het produceren van duurzame transportbrandstoffen welke chemisch identiek zijn aan de huidige fossiele equivalenten is het voor iedereen mogelijk om op een duurzame manier te reizen, ook voor mensen die geen elektrisch voertuig kunnen betalen. Het bijkomende voordeel dat het huidige wagenpark kan blijven bestaan is dat er geen subsidies of belastingvrijstellingen geïntroduceerd hoeven te worden om mensen te stimuleren nieuwe(re) voertuigen te kopen. Deze indirecte besparing zal de betaalbaarheid van deze keten ten opzichte van alternatieve duurzame routes positief beïnvloeden.

Ook zal de ontwikkeling een positieve invloed hebben op de werkgelegenheid. Er worden banen gecreëerd in het bouwen en bedienen van pyrolyse en vergassingsinstallaties. Ook in de ondersteunende takken zoals het transport en financieel/administratieve functies wordt de werkgelegenheid gestimuleerd. Op basis van ervaring met bestaande pyrolyse installatie is bekend dat c.a. 25 FTE aan permanente banen per pyrolyse plant wordt gecreëerd. Uitgaande van 1 centrale vergasser, die olie verwerkt uit 6 pyrolyse installaties kan circa 100 tot 200 permanente FTE's worden gecreëerd. Bij de bouw van de installaties worden ook tijdelijk (c.a. 1 jaar) enkele tientallen FTE's gecreëerd.

De ontwikkelingen in het *Biomass4transport* project heeft de kennispositie van Nederland op het gebied van pyrolyse olieproductie en gebruik verder versterkt. Specifiek de productie van synthesegas uit pyrolyse olie is verder versterkt. Voor zover bekend is de testinstallatie bij BTG de enige waarbij op een schaal > 1kg/h met behulp van een katalysator zuiver synthesegas uit pyrolyse olie wordt geproduceerd.

Spin off binnen en buiten de sector

Het Biomass4transport project heeft tot op heden niet tot spin-off activiteiten geleid. Hoge investeringskosten, in combinatie met een onzeker politiek en maatschappelijk klimaat ten aanzien van het gebruik van biomassa, hinderen op dit moment een snelle uitrol van de onderzochte techniek. Belangrijk om te vermelden is dat de route technisch haalbaar is en de producten direct inpasbaar zijn in de huidige markt (drop-in biofuel/e-fuel). Het gebruik van een katalysator in de vergasser levert een hogere efficiëntie ten opzichte van niet-katalytische vergassing, echter dient de lange termijn activiteit van de katalysator verder onderzocht te worden. De berekende CO₂-emissies laten zien dat de producten 80-90% CO₂ besparen ten opzichte van de fossiele alternatieven.

Op wetenschappelijk vlak is een vervolg gemaakt door de keten iets anders te positioneren, in plaats van een 'stand-alone' biobrandstof/e-fuel installatie lijkt de productie van waterstof via een hybride vergasser erg geschikt als buffertechniek in combinatie met waterstof productie vanuit elektrolyse gedreven uit windparken op zee. Deze benadering maakt het (theoretisch) mogelijk om een ononderbroken stroom duurzame waterstof te produceren welke in raffinaderijen gebruikt kan worden, zonder de noodzaak om een enorme opslag van waterstof en/of elektriciteit in te zetten voor de periode waarin weinig windenergie beschikbaar is.

Overzicht van openbare publicaties over het project

- A techno-economic assessment of a Power and Biomass to Liquid plant, integrating electrolysis, bio-oil gasification, direct DME synthesis and DME to gasoline. Matteo Beragnoli. Master thesis TUDelft.
Available after the restriction period in the TUD repository.
- Process integration of gasification and Electrolysis for biofuel production, a techno-economic assessment. Onsi Hanafi. Master thesis TUDelft
Available through: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A0e12cc0a-a236-401f-b9a8-cc58aa116374>
- Autothermal catalytic reforming of pyrolysis oil: results of a 10 KW oxygen blown gasifier. E.J. Leijenhorst et al. Proceedings of the 2021 European Biomass Conference & Exhibition. 2BO5.3.
Available through: <http://www.etaflorence.it/proceedings/>
- Pyrolysis and gasification to provide a flexible pathway for advanced biofuel production. E.J. Leijenhorst. Presentation at the CONVERGE workshop. May 2021, TNO/petten.
Available through: <https://www.converge-h2020.eu/workshopbiofuels/>

Distributie en Contact

Exemplaren van dit project zijn per email aan te vragen via de contactpersoon:

Contact:

Evert Leijenhorst – Project coordinator

BTG Biomass Technology Group BV

Postbus 835

7500 AV Enschede

Email: leijenhorst@btgworld.com

Tel: 0534862290

Vermelding van de verkregen subsidie

“Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.”



BTG Biomass Technology Group BV
Josink Esweg 34, 7545 PN Enschede
P.O. Box 835, 7500 AV Enschede
T. + 31 (0)53 486 1186
F. +31 (0)53 486 1180
W. www.btgworld.com
E. secretariaat@btgworld.com

