

ECN-E--06-021

TORWASH

Proof of Principle - Phase 1

J.R. Pels en P.C.A. Bergman

December 2006

Verantwoording

Dit document is het eindrapport van het project "TORWASH", gefinancierd door SenterNovem onder projectnummer 0268-04-04-40-007 in het kader van het NEO-programma.

Abstract

Exploratieve testen hebben aangetoond dat TORWASH een werkend principe is. TORWASH is een innovatieve techniek die torrefactie integreert met het uitwassen van zouten en mechanische ontwatering. De essentie van TORWASH is dat torrefactiereacties zich afspelen in water bij verhoogde druk en temperatuur. De grootste winst is dat thermisch drogen van de biomassa overbodig is geworden. Tevens worden zouten bijna volledig uit de biomassa gewassen. Zo worden ook biomassastromen geschikt gemaakt voor gebruik als brandstof, die tot nu toe te nat waren of een te hoog zoutgehalte hadden. De experimenten hebben aangetoond dat voor graszaadhooi de optimale TORWASH condities rond 200°C liggen. Er vinden torrefactiereacties plaats waarbij sprake is van 30% massaverlies. Echter, 85% van de energie blijft in het residu over. Ontzouting is eveneens bereikt. De elementen K, Na, Cl en Br gaan bij TORWASH volledig in oplossing. De verbrandingswaarde van het residu is 20 kJ/g, vergelijkbaar met turf. Ontwatering gaat niet vanzelf, maar is wel eenvoudiger geworden, omdat water alleen nog fysisch gebonden is. Pelletiseren resulteert in een TORWASH brandstof met een droge stof gehalte van ca. 60%.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	5
Samenvatting	6
Summary	8
1. INLEIDING	10
1.1 Probleemstelling	10
1.2 Doelstelling	10
1.3 Het TORWASH concept	10
1.3.1 Essentie van TORWASH	10
1.3.2 Torrefactie	11
1.3.3 Uitwassing	11
1.3.4 Ontwatering	12
1.3.5 Integratie	12
1.4 Scope	13
1.5 Andere technieken	14
2. EXPERIMENTEEL	15
2.1 Uitgangsmateriaal	15
2.2 Autoclaaf	15
2.3 Referentiemetingen	16
2.4 Analysemethoden	16
2.5 Pelletiseren	17
3. Resultaten	18
3.1 Autoclaaf graszaadhooi	18
3.2 Analyses van vaste stoffen en vloeistoffen	19
3.3 Pelletproeven	19
3.4 Verbrandingswaardes	20
4. DISCUSSIE	21
4.1 Optimale TORWASH condities	21
4.2 Vochtgehalte	21
4.3 Pelletiseren	22
4.4 Opbrengst massa en energie	23
4.5 Verbrandingswaarde	23
4.6 Verwijdering van zouten	24
4.6.1 Kalium, natrium, chloor en broom	24
4.6.2 Overige elementen	27
4.7 Conceptreactor	28
4.8 Verwerking van afvalwater	28
4.9 Vervolgonderzoek	29
5. Conclusies	30

Lijst van tabellen

Tabel 2.1	Druk tijdens TORWASH reactie van graszaadhooi in autoclaaf.....	15
Tabel 3.1	Samenstelling van graszaadhooi en residuen, verkregen na wassen bij 20°C, TORWASH bij 200°C en droge torrefactie bij 240°C plus wassen bij 20°C; alle data op droge basis, behalve vochtgehalte; < d.l. = onder detectielimiet	18
Tabel 3.2	Samenstelling van extracten van graszaadhooi, verkregen na wassen bij 20°C, TORWASH bij 200°C en droge torrefactie bij 240°C plus wassen bij 20°C; < d.l. = onder detectielimiet.....	19
Tabel 3.3	Droge stof gehalte en dichtheid van pellets gemaakt van TORWASH materiaal..	20
Tabel 3.4	Verbrandingswaarde (bovenwaarde) van graszaadhooi en daaruit verkregen materialen; op basis van droge stof.....	20
Tabel 4.1	Vochtgehaltes natte residuen direct na filtratie en na pelletiseren in massaprocenten.....	22
Tabel 4.2	Opbrengst aan massa en energie bij TORWASH en referentiemeting; berekeningen op basis van opbrengst droge stof.....	23
Tabel 4.3	Verdeling van elementen in TORWASH experimenten	25
Tabel 4.4	Verdeling van elementen in referentie experimenten.....	25
Tabel 4.5	Fractie van bepaalde elementen, die achterblijft in het residu van geTORWASHt graszaadhooi bij verschillende niveaus van mechanische ontwatering.....	26
Tabel 4.6	Fractie van bepaalde elementen, die achterblijft in het residu van droog getorrifieerd en/of gewassen graszaadhooi bij verschillende niveaus van mechanische ontwatering.....	26

Lijst van figuren

Figuur 2.1	Schematisch tekening van de autoclaaf gebruikt voor TORWASH experimenten.	16
Figuur 2.2	Uni-axial press	17
Figuur 2.3	Stempels voor afwaterend persen.....	17
Figuur 3.1	Pellets van residu van geTORWASHt materiaal op (van links naar rechts) 150°C, 170°C, 190°C en 230°C	19
Figuur 4.1	Verbrandingswaarde van residuen en pellets van geTORWASHt graszaadhooi als functie van de temperatuur; bovenwaarde op droge basis.....	24
Figuur 4.2	Verwijderingsgraad van elementen via het extract bij diverse bewerkingen van graszaadhooi.	27
Figuur 4.3	Schematische voorstelling van een TORWASH reactor; dikke pijlen geven het pad van de biomassa aan, dunne pijlen stellen vloeistoffen voor	28

Samenvatting

TORWASH is een nieuwe opwerkingstechniek voor biomassa, die torrefactie integreert met het uitwassen en drogen. Opwerking en voorbereiding van biomassa kunnen leiden tot brandstof met verbeterde eigenschappen en tot vergroting van de inzet van biomassastromen. Drogen, uitwassen en torrefactie zijn drie van dergelijke technieken, die echter ook een aantal nadelen kennen. Drogen is een relatief eenvoudige voorbereiding, die de calorische waarde van de biomassa verhoogt, maar het kost tijd en energie. Ook uitwassen is een relatief simpele voorbereiding, waarmee zouten kunnen worden verwijderd, die problemen opleveren bij het stoken in een ketel. Je houdt echter een kletsnatte biomassa over, die achteraf gedroogd moet worden. Torrefactie is een veelbelovende nieuwe opwerkingstechniek. Het is een chemische omzetting, die zowel een energieverdichting als een verbetering van logistieke eigenschappen tot gevolg heeft. De maalbaarheid verbetert eveneens door degradatie van de vezelstructuur. Voorafgaand aan torrefactie moet echter eerst gedroogd worden. TORWASH is torrefactie van natte biomassa, waarbij torrefactie gecombineerd wordt met het uitwassen van zouten en die thermische droging vooraf overbodig maakt.

De essentie van TORWASH is dat de biomassa in een drukvat in aanwezigheid van water thermisch behandeld wordt, zodat torrefactiereacties zich afspelen in de vloeistof bij verhoogde druk en temperatuur. De grootste winst is dat er alleen mechanische energie in het drogen van de biomassa gestoken hoeft te worden. Vooraf drogen is overbodig en door de chemische veranderingen in de biomassa kan water, wat alleen nog maar fysisch gebonden is, met mechanische middelen afgedreven worden. Thermisch drogen is dus overbodig. Met TORWASH kan ook zeer natte en vezelige biomassa opgewerkt worden, die ongeschikt is voor simpele uitpersing, omdat de biomassa veerkrachtig is en het water vooral chemisch en biologisch gebonden is. Een andere doelstelling van TORWASH is om zouten in de biomassa uit te wassen. De torrefactiereacties maken de zouten los, die meteen oplossen in het aanwezige water. Dit water kan - zoals eerder genoemd - eenvoudig worden afgedreven. Zo worden ook biomassastromen geschikt gemaakt voor gebruik als brandstof, die tot nu toe problemen opleverden met corrosie en bedagglomeratie vanwege het te hoge zoutgehalte. Voor het TORWASH concept is een octrooiaanvraag ingediend.

Doelstelling van het project TORWASH is om het "Proof-of-Principle" te leveren voor het TORWASH concept. Onderzocht zijn bij welke condities in water torrefactiereacties plaatsvinden, in hoeverre zouten losgemaakt worden en oplossen, en hoe goed de biomassa na afloop te ontwateren is. Het beoogde eindresultaat was de geboorte van een nieuwe technologie, die de kwaliteit van biomassabrandstoffen sterk kan verbeteren en die tot nu toe onbruikbare biomassastromen geschikt kan maken om als brandstof ingezet te worden.

Graszaadhooi is uitgekozen als representatieve biomassa-stroom. In een autoclaaf zijn TORWASH experimenten gedaan bij temperaturen tussen 150 en 230°C en drukken die opliepen tot 33 bar. Als eerste referentie is wassen (bij omgevingstemperatuur en atmosferische druk) gebruikt; als tweede referentie is droge torrefactie gevolgd door wassen gekozen. Vast residu is uitgeperst tot pellets in een uni-axiale pers.

De TORWASH experimenten hebben bevestigd dat het principe werkt. De optimale TORWASH temperatuur voor graszaadhooi is 190-200°C. Onder die condities treedt ca. 30% massaverlies op terwijl 85% van de energie blijft in het residu over. Ontwatering is makkelijk. Mechanische ontwatering d.m.v. pelletiseren resulteert in een TORWASH brandstof met een droge stof gehalte van ca. 60%. Thermische droging gaat ook snel. De elementen K, Na, Cl en Br gaan bij TORWASH volledig in oplossing. De elementen P, S, Ca en Mg gaan gedeeltelijk in oplossing. De meeste andere elementen, o.a. Si, Al en Fe blijven vrijwel geheel in het residu

achter. De mate waarin het vocht mechanisch afgedreven kan worden bepaalt uiteindelijk welk deel van de elementen in het ontwaterde residu overblijft. De verbrandingswaarde van het residu is 20 kJ/g (bovenwaarde op droge basis), wat vergelijkbaar is met turf. Ook de uiterlijke verschijning lijkt op turf. Het (droge) residu is in hoge mate vergelijkbaar met biomassa, die droog getorrefieerd is. De voornaamste verschillen zijn a) een veel lager zoutgehalte en b) een zekere hoeveelheid achterblijvend vocht.

De exploratieve testen hebben aangetoond dat TORWASH een werkend principe is. Het "Proof-of-Principle" is geleverd voor graszaadhooi. In het vervolgonderzoek moet het principe ook bewezen worden voor andere grondstoffen, b.v. hout, digestaat en rioolslib. Voorts dient er materiaal geproduceerd te worden in grotere hoeveelheden, zodat maalbaarheid en bestendigheid tegen bederf kunnen worden aangetoond. De mechanische ontwatering moet verder ontwikkeld worden, zodat een droge stof gehalte van 85% kan worden gehaald, tenzij aannemelijk gemaakt kan worden dat thermische droging van het laatste restje vocht een haalbaar alternatief is. Er kan worden overgegaan naar het "Proof-of-Concept" stadium, gericht op ontwikkeling van een proces en een TORWASH reactor.

Summary

TORWASH is a new technique for upgrading biomass fuels that integrates torrefaction with washing and drying. Upgrading and pretreatment of biomass can lead to biomass fuels with improved characteristics and to utilization of so far unused biomass volumes. Drying, washing and torrefaction are three of those techniques, each having advantages and some disadvantages. Drying is a relatively simple form of pretreatment that improves the calorific value of biomass fuels, but it consumes time and energy. Also washing is a relatively simple form of pretreatment that removes salts, which may cause problems during firing in a boiler. After washing, the biomass fuel is soaking wet and requires drying. Torrefaction is a promising technique for upgrading biomass fuels. It encompasses a thermo-chemical conversion resulting in energy densification and improvement of logistic characteristics. The grindability improves because the fiber structure is degraded. However, prior to torrefaction, the biomass needs to be dried. TORWASH is torrefaction of wet biomass combined with washing of salts and without prior drying.

The basic idea of TORWASH is that biomass is thermally treated in a pressurized vessel with water, so that torrefaction reactions take place in liquid water at elevated temperature. The most important advantage is that the drying afterwards does not require thermal energy, only mechanical energy. Drying before torrefaction is not needed and removal of water afterwards is easy due to the chemical changes in the biomass. As a result of torrefaction, water is only physically bound and can be removed by mechanical means. TORWASH is suitable for upgrading wet and fibrous biomass that cannot be dried by simply compressing it because the biomass is springy and water is mainly bound chemically and biologically. Another objective of TORWASH is to remove salts by washing. The torrefaction reactions release ions that immediately dissolve in water. The salts are taken along when the water is removed mechanically. In this way, biomass can be converted into a fuel that is – until now – unattractive because of problems with corrosion and agglomeration due to the high salt content.

The objective of the TORWASH project is to provide a “Proof-of-Principle” for the TORWASH concept. In the project, it has been investigated a) under which conditions torrefaction reactions take place in water, b) to what extent salts are released and dissolved and c) how well biomass can be dewatered afterwards. The projected end result was the birth of a new technology that can strongly improve the quality of biomass fuels and make available biomass volumes that were hitherto unsuitable for utilization as fuel

Threshed hay (graszaadhooi) was selected as a representative form of biomass. TORWASH experiments were performed in an autoclave with temperatures ranging between 150 and 230°C, and pressures up to 33 bar. As a reference, washing at room temperature and atmospheric conditions was used. A second reference was dry torrefaction followed by cold washing was selected. The solid residues of experiments were compressed into pellets using a uni-axial press.

The TORWASH experiments have confirmed that the TORWASH principle basically works. For threshed hay, the optimal temperature is 190-200°C. Under those conditions about 30% of mass is dissolved, but 85% of the energy remains in the residue. Mechanical dewatering becomes easy. When compressed into pellets, a fuel is produced with a dry matter content of 60%. Thermal drying was found to be fast as well. The ions of K, Na, Cl and Br are completely dissolved. The elements P, S, Ca and Mg are partly dissolved, while most other element, including Si, Al and Fe remain almost entirely in the residue. The degree of dewatering eventually determines to what extent the dissolved elements remain in the dewatered residue. The calorific value of the TORWASH product is about 20 kJ/g (upper heating value, dry basis), which is comparable to peat. The (dry) residue is very well comparable to biomass that has

undergone dry torrefaction. The main differences are a) lower salt content and b) some residual water in the TORWASH product.

The project has shown that TORWASH is a working concept. The “Proof-of-Principle” is demonstrated for threshed hay. In subsequent research, TORWASH must also be proven for other forms of biomass, e.g. wood, digestate and sewage sludge. Furthermore, TORWASH product must be made in larger quantities, so that improved grindability and assumed resistance against (biological) decay can be proven. The mechanical dewatering must be further developed, with the objective to produce in this way fuel with a dry mater content of 85% or more, unless it can be proven that thermal drying of the remaining bit of water is a viable option. The TORWASH concept can now progress towards the “Proof-of-Concept” stage, aimed at development of a TORWASH reactor.

1. INLEIDING

1.1 Probleemstelling

Diverse voorbereidingen en opwerkingstechnieken kunnen worden ingezet om te komen tot een verbetering van de eigenschappen van biomassa en een vergroting van de inzetbaarheid van biomassa. Torrefactie neemt hierin een voorname plaats in omdat het niet alleen een energieverdichting is, maar ook een verbetering betekent van andere logistieke eigenschappen, zoals houdbaarheid en maalbaarheid. Bij torrefactie moet echter de biomassa eerst gedroogd worden, wat de nodige energie kost. Daarnaast is verlaging van het zoutgehalte gewenst, wat d.m.v. uitwassing bereikt kan worden. Waterbehandeling levert echter een zeer natte biomassa op, wat conflicteert met torrefactie, omdat er dan juist extra energie in droging gestoken moet worden. Droging van biomassa is op zich eveneens een wenselijke manier van voorbehandeling al is het voor vergassing of verbranding niet noodzakelijk om het watergehalte onder 15 wt% te brengen. De genoemde verbeteringen van de brandstofkwaliteit zijn tegelijk realiseerbaar door het gebruik van een nieuwe techniek, genaamd TORWASH, die bestaat uit een geïntegreerde torrefactie, uitwassing en droging, waarbij de belangrijkste nadelen van elke techniek vermeden worden.

1.2 Doelstelling

Het project TORWASH heeft als doel het ontwikkelen van de nieuwe TORWASH techniek in het "Proof-of-Principle" stadium, d.w.z. dat de basisprincipes van de techniek getest worden. In dit geval moeten de volgende vragen beantwoord worden

- 1) Vinden in water bij hoge druk wel echt torrefactiereacties plaats?
- 2) Is uit het materiaal volledige verwijdering van zouten mogelijk?
- 3) Vloeit het vocht spontaan uit geTORWASHt materiaal?

Het doel van dit project wordt nagestreefd middels experimenten op atmosferische druk en in een autoclaaf. Omdat TORWASH geacht wordt vooral geschikt te zijn voor (te) natte biomassastromen en biomassa met (te) veel alkalimetalen en chloor, is voor dit project gras als grondstof gekozen. De resultaten van dit project vormen de eerste fase van de "Proof of Principle" van het TORWASH proces.

Het beoogde eindresultaat is dat er een nieuwe technologie geboren zal zijn, die de kwaliteit van biomassa-brandstoffen sterk kan verbeteren en die het mogelijk maakt biomassastromen in te zetten als brandstof, die tot nu toe als zodanig ongebruikt bleven.

1.3 Het TORWASH concept

1.3.1 Essentie van TORWASH

TORWASH is een techniek voor de opwerking van natte biomassastromen tot biobrandstof. TORWASH bestaat uit een integratie van drie technieken: torrefactie, uitwassing en ontwatering. Elk van deze technieken wordt in navolgende secties kort besproken, met voor- en nadelen. Vervolgens wordt duidelijk gemaakt hoe door integratie een groot aantal nadelen vermeden kan worden zonder de voordelen op te geven.

De kern van TORWASH is een thermische behandeling van biomassa in vloeibaar water bij temperaturen van 150-300°C. Deze temperatuur is zodanig gekozen dat er torrefactiereacties plaatsvinden en de druk moet zodanig hoog zijn dat het water vloeibaar blijft. De torrefactie vindt plaats zonder dat eerst een grote hoeveelheid energie gebruikt moet worden om de biomassa te drogen. Daarnaast lossen chloor en alkalimetalen direct op in het aanwezige water. Tijdens torrefactie wordt de biomassa hydrofoob door de chemische veranderingen die het

ondergaat, zodat water alleen nog maar fysisch gebonden is en eenvoudig, mechanisch afgedreven kan worden. Tegelijk met het water worden probleemelementen afgevoerd. Het resultaat van TORWASH is een biomassa-brandstof met zeer goede eigenschappen, omdat deze én getorrefieerd én gedroogd én ontzout is.

1.3.2 Torrefactie

Torrefactie, of om precies te zijn *droge torrefactie*, staat bekend als een thermochemische behandeling van biomassa die plaatsvindt bij 200 tot 300°C in een zuurstofloze gasvormige omgeving bij atmosferische druk. Torrefactie is een thermische conversie met als doel chemische modificaties van de biomassa-structuur te bewerkstelligen, waardoor deze zijn mechanische sterkte en veerkracht verliest. Het brosse, getorrefieerde materiaal is beter maalbaar¹ en bij compressie makkelijker tot een pellet te persen. Daarnaast is getorrefieerde biomassa hydrofoob, waardoor het droog blijft bij opslag en ongevoelig is voor luchtvochtigheid. Getorrefieerde biomassa is geconserveerd waardoor rotting en broei wordt voorkomen. Torrefactie van biomassa gaat gepaard met massaverlies (ontgassing), wat kan oplopen tot zo'n 30%. Van de energie-inhoud gaat maar ongeveer 10% verloren, zodat de geproduceerde brandstof een hogere calorische waarde, tot wel 22.5 kJ/g. Getorrefieerde biomassa heeft een grotere energiedichtheid (zowel naar massa als naar volume) en heeft dus lagere transportkosten per eenheid energie. Al deze voordelen worden ook geacht van toepassing te zijn op geTORWASHte biomassa.

Het grootste nadeel van torrefactie is dat voorafgaand aan de chemische omzetting, de biomassa eerst volledige droging moet ondergaan. De benodigde energie kan deels uit verbranding van de afgassen worden gewonnen, maar als droging achterwege blijft kan er een groot energetisch voordeel behaald worden. Kortom, geTORWASHte brandstof heeft alle voordelen, die ook door droge torrefactie te bereiken zijn, maar dan zonder de energie-intensieve droging.

1.3.3 Uitwassing

TORWASH biedt de mogelijkheid om tegelijk met het afgedreven vocht het overgrote deel van de zouten uit de biomassa af te voeren. Vooral chloor en alkalimetalen gaan goed in oplossing en dit zijn tevens elementen, die ongewenst zijn in biomassa brandstof. Biomassa, zonder chloor en alkalimetalen is een stuk aantrekkelijker, vanwege de volgende redenen:

- Chloor is de primaire component in corrosie en verwijdering van chloor uit de brandstof levert een aanzienlijke verbetering op m.b.t. het risico van corrosie in de ketel en in de koeler van een thermische installatie. Dit kan zich vertalen in gebruik van goedkopere materialen of minder frequente vervanging van stoompijpen. Ook zou het mogelijk zijn om door de sterkere verlaging van chloor in de brandstof een biomassa-installatie met een hogere stoomdruk te ontwerpen. Een eerste schatting geeft aan dat hierdoor het elektrische rendement 3-5 procentpunten omhoog kan.
- Verlaging van het chloorgehalte heeft een gunstig effect op de mogelijkheden tot hergebruik van de assen. Voor gebruik als bouwstof is chloor één van de grootste probleemelementen bij toetsen aan het Bouwstoffenbesluit. Ook is chloride één van de kritische eisen van de EN 450-1 voor hergebruik van vliegassen in beton. Chloor is mede beperkend voor het meestookpercentage van biomassa in kolencentrales. Wanneer chloorarme biomassa wordt gebruikt, kan in principe meer biomassa in kolencentrales gebruikt worden. Ook buiten de EN 450-1 zijn assen met een verlaagd gehalte chloor (en alkalimetalen) aantrekkelijker voor gebruik in cementproducten.
- Verwijdering van alkalimetalen is gunstig voor toepassing van biomassa-brandstof in wervelbedinstallaties. Wanneer K en Na verwijderd worden, worden er minder (snel)

¹ Dit heeft indirect ook voordelen voor de askwaliteit, omdat er door verminderde slijtage van beitels minder metalen zoals chroom, nikkel en vanadium in de as komen, die bij uitloging de toepassingsopties verminderen.

laagsmeltende silicaten gevormd op het bedmateriaal, zodat het risico van bedagglomeratie sterk terugloopt en verversingsnelheid van bedmateriaal daalt.

Uitwassing is op zich simpel en heeft direct effect. Wanneer b.v. stro pas van het land gehaald wordt *na* een regenbui, dan heeft dit een merkbare verlaging van het zoutgehalte tot gevolg. Gecontroleerde uitwassing resulteert in verwijdering van 75-95% van K en Cl. Het grootste nadeel van directe uitwassing is dat er een zeer natte brandstof overblijft, waar toch nog niet alle zouten uit verwijderd zijn. Bij TORWASH zal de verwijderingsgraad van K en Cl en andere zouten hoger liggen omdat deze door chemische reacties losgemaakt worden.

De uitgewassen zouten komen met een onbekende fractie opgelost organisch materiaal in een waterige oplossing terecht. De verwerking van dat afvalwater is een punt van zorg, wat expliciet nog niet in de doelstellingen van dit project is opgenomen. Wel wordt een voorschot genomen op verschillende oplossingen, waaronder winning van biochemicalïën en hergebruik van nutriënten als meststof.

1.3.4 Ontwatering

Het verwijderen van water uit biomassabrandstof is een stap, die doorgaans snel tot verbetering van de brandstofkwaliteit leidt, omdat het de calorische waarde flink verbetert. Ontwatering kost energie, vooral thermische droging. Zeer natte biomassa kan ontwaterd worden door uitpersing, maar omdat een groot deel van het water chemisch of biologisch gebonden is, zal slechts een beperkte winst behaald kunnen worden. De beste persen halen hooguit 50% droge stof, maar dat vereist doorgaans toch ook een zekere vorm van modificatie, die cellen en vezels afbreekt. In principe is 50% droge stof genoeg voor verbranding, maar een niveau van 85% droge stof of meer is nodig voor optimaal rendement van vergassing en verbranding. De volledige thermische droging die voorafgaat aan droge torrefactie hoeft bij TORWASH niet bereikt te worden. Met name verwijdering van het laatste restje water is kostbaar.

Bij TORWASH vindt ontwatering wel plaats, maar achteraf. Ontwatering voorafgaande aan de torrefactiereacties hoeft niet gerealiseerd te worden. Het idee van TORWASH is dat de verdamping van water – wat veel energie kost - wordt omzeild omdat torrefactie in water worden uitgevoerd. De chemische reacties van TORWASH maken de biomassa hydrofoob en water is alleen nog maar fysisch gebonden. Dit vocht kan voor een deel vanzelf 'uitzweten' en de rest kan met eenvoudige, mechanische ontwateringstechnieken zoals centrifuge of pelletisering afgedreven worden. De torrefactiereacties hebben ook de structuur van de biomassa aangetast, zodat deze veel minder weerstand biedt tegen compressie.

De energiebehoefte is beperkt tot wateropwarming en arbeid voor het op druk brengen van water en biomassa. Een groot deel kan daarvan weer teruggewonnen worden. Waar het drogen ca 10% van de energie-inhoud van de biomassa bedraagt (50% vochtgehalte) zou dit tot enkele procentpunten kunnen verlaagd. Door de eliminatie van thermische droging zou het totale procesrendement van TORWASH boven 100% uit kunnen stijgen (LHV basis).

1.3.5 Integratie

Het TORWASH concept combineert torrefactie, uitwassing en droging. Door de integratie van de drie procesdoelstellingen (drogen, torrefactie en wassen) kan vergaande procesintensificatie plaatsvinden, hetgeen de productiekosten mogelijk sterk vermindert. De grootste nadelen van torrefactie en ontzouting worden in TORWASH vermeden:

- Bij TORWASH is volledige ontwatering voorafgaand aan de eigenlijke torrefactie niet meer nodig.
- Door de chemische veranderingen als gevolg van torrefactie kan natte biomassa bijna volledig ontwaterd worden m.b.v. mechanisch technieken en niet thermisch.

- Wassen met als doel ontzouten laat kletsnatte biomassa achter, maar doordat drogen bij TORWASH veel eenvoudiger is en minder energie kost, wordt wassen stukken aantrekkelijker.

TORWASH kan worden gerealiseerd door torrefactie uit te voeren in een enkele reactor in water bij temperaturen tussen 150°C tot 300°C, waarbij de druk ongeveer gelijk is aan de stoomdruk, zodat water vloeibaar blijft. Het inbrengen en verwijderen van de biomassa slurry zal lastig zijn. Aanvullend zal ontwaterd moeten worden, maar mogelijk is dit simultaan met het verwijderen van de biomassa te realiseren.

Met TORWASH wordt een duurzame brandstoffen gemaakt met een hoog rendement en met gunstige brandstofeigenschappen, aantrekkelijk voor alle biomassatoepassingen. Naar verwachting zal geTORWASHte biobrandstof uitstekend inpasbaar zijn in alle vormen van gebruik van biomassa als brandstof; niet in de laatste plaats voor meestook bij kolencentrales.

Voor het TORWASH concept is een octrooiaanvraag ingediend.

1.4 Scope

TORWASH is in principe toepasbaar op alle biomassastromen, maar de meeste winst valt te halen bij brandstoffen, die een of meerdere van de volgende eigenschappen hebben:

- vezelig, zodat malen een energie-intensieve voorbereiding is,
- een hoog gehalte chloor en/of alkalimetalen
- een hoog vochtgehalte, zeker wanneer water chemisch of biologisch gebonden is
- gevoelig voor microbiële bederf

Dit betreft veel onaantrekkelijke biomassastromen, die momenteel niet of nauwelijks benut zijn. Alleen al uit Nederlandse bronnen kan meer dan 300 PJ per jaar primaire energie vermeden worden door de volgende stromen in te zetten:

- rietplaggen uit weerribben²: 350.000 m³ = 17.5 kton/jr droog = 0.35 PJ/jr
- maaisel³: 500 kton/jr = 7.5 PJ/jr
- digestaat, ONF, etc, 9.2 kton/jr = 0.18 PJ/jr
- GFT-afval⁴: 1400 kton/jr = 20 PJ/jr
- reststromen agro-industrie⁵: 1500 kton/jr = 21 PJ/jr
- zuiveringsslib⁴: 17000 kton/jr (droog) = 275 PJ/jr

Zuiveringsslib is veruit de grootste stroom, maar draagt in zich het risico dat deze wel ontwaterd kan worden met TORWASH, maar dat verwerking van het waswater moeilijker zal zijn dan voor schone biomassa. Ook zijn hier alternatieve technieken voor ontwikkeld, waarmee TORWASH zal moeten concurreren. Digestaat is op dit moment nog niet groot, maar indien de verwachte sterke groei in het aantal vergisters doorgaat, neemt deze stroom toe. De agrarische sector zal de te verwachten hoeveelheden digestaat niet meer kunnen uitrijden op het land. TORWASH is dan een alternatief voor export.

Berekeningen voor indirecte energieverdienste uit verminderd risico van corrosie en verbeteringen in hergebruik van assen zijn speculatief en moeilijk in Petajoule te kwantificeren.

² A. Stoker, "Duurzame energie uit rietplaggen", presentatie Praktijkdag Grootschalige Bio-Energie Projecten, SenterNovem, 9 juni 2004

³ J. Van Doorn, et al., "Cascadering van maaisel", ECN Rapport ECN-C--01-050, 2001

⁴ website CBS

⁵ Marsroutes voor elektriciteit- en warmteopwekking uit afval en biomassa, studie uitgevoerd door PricewaterhouseCoopers, ECN en TNO-MEP in opdracht van Novem, Novem-EWAB rapporten 2EWAB00.20, 2EWAB00-21, 2EWAB00.22 en 2EWAB00.23, 2000.

De verdienste zit vooral in verlaging van onderhoudskosten, verbeterde beschikbaarheid van een installatie, en een (onzekere) opbrengst uit hergebruik van assen, dan wel vermeden stortkosten.

1.5 Andere technieken

De behoefte aan een proces, waarin biobrandstof gemaakt wordt uit minder aantrekkelijke biomassastromen is ook elders opgepikt. Drie initiatieven moeten met name vermeld worden, omdat ze analoge bedrijfscondities als TORWASH hanteren en toegepast worden op stromen, waarvoor ook TORWASH bijzonder geschikt geacht wordt. Dit zijn het IBUS project (EU, Denemarken) voor o.a. stro, het SlurryCarb process van ENERTECH (USA) en het THP proces van CAMBI (Noorwegen), beide voor rioolslib.

2. EXPERIMENTEEL

2.1 Uitgangsmateriaal

Graszaadhooi is uitgekozen als uitgangsmateriaal voor de TORWASH experimenten in een autoclaaf. Het vertegenwoordigt een scala van natte, vezelige en/of zout-rijke typen biomassa, die het meest aantrekkelijk lijken voor TORWASH. Graszaadhooi is vezelig en bevat relatief veel zouten. Bij oogsten heeft het een hoog vochtgehalte, maar daarna is het gedroogd. Aanvankelijk was het de bedoeling in het project TORWASH vers gras te gebruiken, maar de houdbaarheid daarvan bleek zo slecht te zijn dat er voor een gedroogd gras is gekozen. Voor een “Proof of Principle” is dit aanvaardbaar, maar in het vervolg zal zeker vers gras of andere verse, natte biomassa getest moeten worden.

Het graszaadhooi is geleverd door Tom de Wit, een agrarisch bedrijf uit de kop van Noord-Holland. Het is gedroogd aangeleverd, verpakt in papieren zakken. Er zijn zoveel mogelijk representatieve monsters uit genomen, maar het is niet uitgesloten dat fijn stof wat zich onderin de zak bevond ondervertegenwoordigd is. Voor het bewijzen van het principe van TORWASH is dit niet erg, omdat juist de vezelige delen belangrijk zijn. Voor autoclaaf experimenten is het hooi geknipt tot een maximale lengte van 1,5 cm. Bij de reguliere torrefactie, die als referentie is gebruikt, is een andere zak graszaadhooi gebruikt. De samenstelling van deze tweede batch graszaadhooi wijkt licht af van de eerste. Bij de berekeningen is hier rekening mee gehouden.

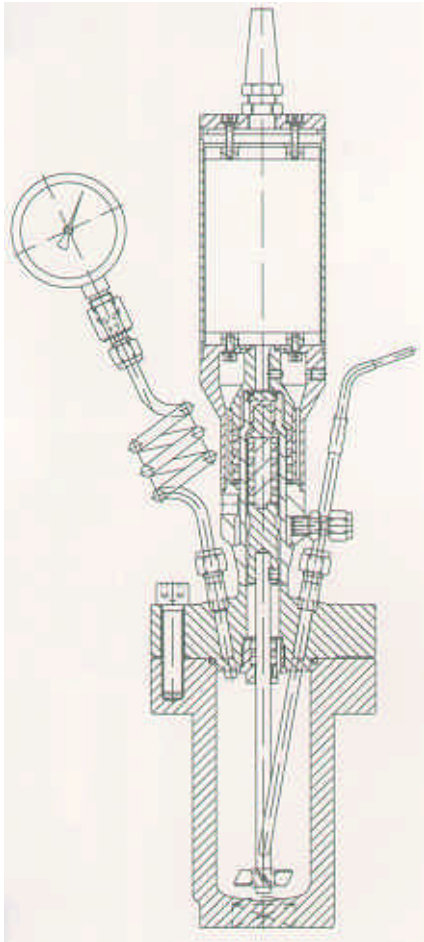
2.2 Autoclaaf

Verkennde TORWASH experimenten zijn uitgevoerd in een autoclaaf van 0.45 liter, voorzien van een mechanische roerder, temperatuurmetering en drukmetering, zie Figuur 2.1. De autoclaaf is geplaatst in een mantel die voor opwarming en koeling zorgt. Het roeren van de inhoud zorgt voor snelle warmteoverdracht in de reactor. Er is telkens ca. 12,5 gram geknipt graszaadhooi gebruikt in 250 ml water, zodat het materiaal net onder water stond. De autoclaaf werd hermetisch afgesloten; geen toevoer of afvoer van gas of vloeistof; geen drukregeling. Er werd opgewarmd/afgekoeld met 300°C per uur. Daartussen bleef de autoclaaf 30 minuten op setpoint temperatuur. Afwijkingen van het setpoint bedroegen maximaal 7°C en zijn verwaarloosd. De temperatuurverhoging initieerde de TORWASH reacties. De gemeten druk komt overeen met de stoomdruk vermeerderd met de druk van vrijgekomen gassen. Na koeling tot 30-40°C werd het roeren gestaakt, de overgebleven druk afgelaten en de autoclaaf geopend.

De inhoud van de autoclaaf werd overgebracht op een micronfilter en met vacuüm afgefilterd, zodat een *residu* en een *extract* geproduceerd worden. In sommige gevallen is tot 25 ml extra water gebruikt bij het overbrengen. Hier is in de berekeningen voor gecorrigeerd. Extracten en residuen zijn in de koelkast bewaard.

Tabel 2.1 Druk tijdens TORWASH reactie van graszaadhooi in autoclaaf

proefneming setpoint [°C]	maximale druk [bar]	druk na afkoeling [bar]
150	5.4	0.9
170	10.0	1.6
190	14.5	1.6
200	18.6	1.4
230	32.7	2.1



Figuur 2.1 Schematisch tekening van de autoclaaf gebruikt voor TORWASH experimenten

2.3 Referentiemetingen

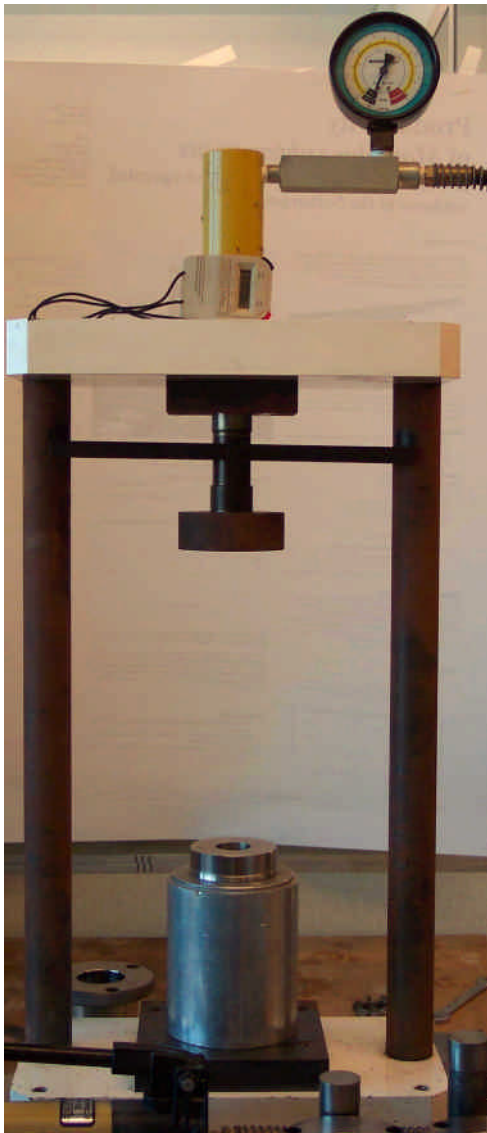
Twee experimenten zijn uitgevoerd met als oogmerk een referentiepunt voor de effectiviteit van TORWASH te zijn. Ten eerste is geknipt graszaadhooi gewassen bij atmosferische druk en omgevingstemperatuur. Een portie van 12,5 gram is in een bekersglas weggezet in 300 ml water gedurende 2 uur, waarbij af en toe geroerd is. Na afloop is het materiaal afgegoten en werd een extract en een residu verkregen. De tweede referentie betreft graszaadhooi wat eerst droog getorrefieerd is bij 240°C gedurende 32 minuten. De opbrengst van de droge torrefactie was 84 wt%. Een portie van 15,4 gram is gewassen in 288 ml water gedurende 2,5 uur, waarbij af en toe geroerd is. Na afloop is het materiaal gescheiden in een extract en een residu d.m.v. uitlekken op een filter.

2.4 Analysemethoden

De residuen van TORWASH materiaal geproduceerd bij 200°C en de twee referentiemetingen zijn onderworpen aan chemische analyse om de overall samenstelling op elementen vast te kunnen stellen. Dit is gedaan d.m.v. ontsluiting (B8) en ICP-AES analyse van de verkregen vloeistof. Voorts zijn chloor, broom en het watergehalte bepaald. De extracten zijn ook geanalyseerd met ICP-AES (10x verdunning). Van de extracten zijn tevens gehalten organisch (DOC) en anorganisch koolstof (DIC) bepaald. Om inzicht te krijgen in de aard van het extract, o.a. met het oog op winning van grondstoffen of potentiële problemen bij verwerking, is een eerste aanzet gedaan tot identificatie van de moleculen, opgelost in het extract, m.b.v. GC-FID analyse.

2.5 Pelletiseren

Toen de eerste resultaten aangaven dat het residu zoals dat uit de autoclaaf kwam niet spontaan ontwaterde, is besloten om te onderzoeken of simpele mechanische ontwatering mogelijk zou zijn. Hiertoe is een statische pers gebruikt, waarin maximaal ca. 10 gram extract werd gecompriemd bij drukken tussen 20 en 100 bar (zie Figuur 2.2). De stempel zijn cilindrisch met een diameter van 20 mm. De onderste stempel was gemaakt van poreus metaal, zodat vocht weg kon lopen. Afhankelijk van de hoeveelheid materiaal en de mate van compressie is de pellet 1-15 mm hoog. Het verkregen pellet werd gedroogd bij 105°C om het watergehalte te bepalen. Er is koud geperst, zonder toevoeging van een bindmiddel.



Figuur 2.2 Uni-axial press



Figuur 2.3 Stempels voor afwaterend persen

3. Resultaten

3.1 Autoclaaf graszaadhooi

Een serie TORWASH experimenten is uitgevoerd met als temperaturen 150, 170, 190, 200 en 230°C. Tijdens de experimenten zijn de volgende observaties gedaan:

- Bij 150 is het eindproduct nog duidelijk herkenbaar als hooi, gelig met herkenbare sprietjes, vezelig en ietwat veerkrachtiger. Het materiaal is gemakkelijk te filtreren, want het zakt niet in onder zijn eigen gewicht. Het extract is geel-bruin gekleurd, zoals slappe thee.
- Bij 170°C is het materiaal gedeeltelijk verpulpt, maar er zitten nog duidelijk herkenbaar sprietjes hooi in. Het is lichtbruin, en slap materiaal, wat gemakkelijk met de hand uit elkaar te pluizen. Het materiaal is matig te filtreren. Het extract is lichtbruin gekleurd, zoals gewone thee.
- Bij 190 en 200°C is de kleur van het materiaal lichtbruin; onderling geen verschil. Er zijn kortvezelige klontjes, maar geen hooisprietjes meer over. Filtratie is soepel. De filterkoek lijkt op bruin vilt; deze is nat eenvoudig scheurbaar, maar na droging een stuk sterker. Het extract is donkerbruin gekleurd, als slappe koffie.
- Bij 230°C is het product donkerbruin en slijmerig. Er zijn geen vezels meer herkenbaar. Filtreren is mogelijk, maar het duurt lang. De filterkoek is een kleverige pasta. Het filtraat is helder, lichtbruin gekleurd, zoals gewone thee; iets lichter dan van 190-200°C.

Tabel 3.1 Samenstelling van graszaadhooi en residuen, verkregen na wassen bij 20°C, TORWASH bij 200°C en droge torrefactie bij 240°C plus wassen bij 20°C; alle data op droge basis, behalve vochtgehalte; < d.l. = onder detectielimiet

		graszaadhooi gedroogd op 105°C	residu graszaadhooi, gewassen 20°C	residu graszaadhooi, TORWASH 200°C	residu graszaadhooi, getorrificeerd bij 240°C, gewassen bij 20°C
As(550)	%	8.8	8.3	3.9	
As(815)	%	7.9	7.8	4.0	7.1
vocht	%	1.9	79.0	78.2	73.6
vluchtig	%	71.7	74.2	74.5	70.1
C	%	43.9	44.6	51.2	45.6
H	%	5.9	6.0	6.0	5.5
N	%	1.8	1.8	1.7	1.8
O	%	40.2	39.0	35.8	37.4
Br	mg/kg	65.0	27.0	12.5	41
Cl	mg/kg	10096.0	3327.0	1052.0	3832
Al	mg/kg	148.5	757.5	232.0	223.1
Ca	mg/kg	4849.5	5216.3	3338.9	4799.4
Cd	mg/kg	< d.l.	< d.l.	< d.l.	0.3
Fe	mg/kg	130.8	479.1	310.7	149.1
K	mg/kg	23347.4	11484.8	3184.3	13556.8
Mg	mg/kg	1040.3	936.0	338.6	1139.4
Na	mg/kg	1271.1	697.4	221.8	521.2
P	mg/kg	3116.6	2387.3	1606.4	2917.4
S	mg/kg	2236.0	1729.3	1271.5	1240.0
Si	mg/kg	13376.6	20023.2	10369.0	14960.7
Zn	mg/kg	19.9	21.7	42.1	26.4

3.2 Analyses van vaste stoffen en vloeistoffen

Het uitgangsmateriaal, de residuen, extracten en referentiemonsters zijn geanalyseerd. In Tabel 3.1 staan de chemische analyses van de vaste stoffen; uitgangsmateriaal, TORWASH residu bij 200°C en residu van de referentiemetingen. In Tabel 3.2 staan de analyses van de vloeistoffen, die vrijgekomen zijn bij de wasstappen.

Tabel 3.2 Samenstelling van extracten van graszaadhooi, verkregen na wassen bij 20°C, TORWASH bij 200°C en droge torrefactie bij 240°C plus wassen bij 20°C; < d.l. = onder detectielimiet

		extract graszaadhooi, gewassen 20°C	extract graszaadhooi, TORWASH 200°C	extract graszaadhooi, getorrifieerd bij 240°C, gewassen bij 20°C
Br	mg/kg	4.0	4.0	11
Cl	mg/kg	400.0	478.5	593.5
NO3	mg/kg	1.0	26.0	
PO4	mg/kg	153.0	309.0	
SO4	mg/kg	102.0	137.5	
DIC	mg/kg	7.0	< d.l.	74.0
DOC	mg/kg	1390.0	7090.0	515.0
Al	mg/kg	0.13	0.15	0.6
Ca	mg/kg	58.22	141.92	26.7
Fe	mg/kg	0.26	0.56	0.8
K	mg/kg	728.81	990.92	1020.9
Mg	mg/kg	18.36	40.96	<d.l.
Na	mg/kg	35.75	64.02	<d.l.
P	mg/kg	58.74	98.56	<d.l.
S	mg/kg	42.00	71.40	<d.l.
Si	mg/kg	5.31	62.62	<d.l.
Zn	mg/kg	0.19	0.29	0.1

3.3 Pelletproeven

Van de natte residuen zijn pellets geperst. Een foto van vier pellets is weergegeven in Figuur 3.1. Deze foto illustreert duidelijk de kleurverandering in het residu en veranderingen in morfologie van de pellet. De pellet van materiaal bij 150°C valt niet uit elkaar, maar moet wel voorzichtig behandeld worden. De pellets van 170 en 190°C zijn sterk. De pellet van 230°C is bij het uitnemen uit de pers per ongeluk plat gedrukt. Na drogen blijkt het materiaal keihard geworden te zijn.



Figuur 3.1 Pellets van residu van geTORWASHt materiaal op (van links naar rechts) 150°C, 170°C, 190°C en 230°C

De pelletproeven dienden om te bepalen of het mogelijk is mechanisch te ontwateren door middel van comprimeren, waarbij de installatie zo ontworpen is, dat uitgedrukt vocht afgevoerd kan worden. In dit geval via een filter en poreuze stempel. In Tabel 3.3 staat weergegeven wat het droge stof gehalte was van het gefilterde residu en welk gehalte haalbaar is met ontwaterende pelletisering. De genoemde druk van 25-100 bar is representatief voor eenvoudige pelletiseermachines.

Tabel 3.3 Droge stof gehalte en dichtheid van pellets gemaakt van TORWASH materiaal

materiaal	druk [bar]	droge stof gehalte [wt%]		dichtheid [kg/m ³]	
		uitgangsmateriaal	geperst materiaal	nat	droog
graszaadhooi 150	20	8%	35%	844	292
2e pellet	100	8%	42%	817	345
graszaadhooi 170	20	15%	46%	1068	495
graszaadhooi 190	20	18%	56%	1116	622
2e pellet*	50	23%	66%	1485	976
graszaadhooi 230	20	23%	54%	#	

* pellet minder dan 1 mm dik en mogelijk niet representatief

pellet kapotgegaan tijdens persen

3.4 Verbrandingswaardes

De vaste stoffen, die in dit project gebruikt of verkregen zijn hebben allen een zekere verbrandingswaarde⁶, weergegeven in Tabel 3.4. Om een vergelijking te kunnen maken met betrekking tot de kwaliteit van de brandstof die het gevolg is van chemische omzettingen is de verbrandingswaarde bepaald op basis van droge stof. De werkelijke verbrandingswaarde wordt mede beïnvloed door het watergehalte.

Tabel 3.4 Verbrandingswaarde (bovenwaarde) van graszaadhooi en daaruit verkregen materialen; op basis van droge stof

materiaal	bovenwaarde [kJ/g]
graszaadhooi	16.4
graszaadhooi, droge torrefactie bij 240°C	17.5
residu graszaadhooi, TORWASH 170°C	18.2
residu graszaadhooi, TORWASH 200°C	19.9
residu graszaadhooi, TORWASH 230°C	22.1
residu graszaadhooi, droge torrefactie 240°C, wassen 20°C	18.4
pellet graszaadhooi, TORWASH 150°C	17.1
pellet graszaadhooi, TORWASH 170°C	17.7
pellet graszaadhooi, TORWASH 190°C	18.6
pellet graszaadhooi, TORWASH 230°C	20.9

⁶ Het verschil tussen de verbrandingswaarde (bovenwaarde) en de stookwaarde (onderwaarde) is de energie die vrijkomt bij het uitcondenseren van water uit het rookgas; gemiddeld verschil (droge basis) 1000-1500 J/g

4. DISCUSSIE

4.1 Optimale TORWASH condities

Het graszaadhooi is erg volumineus en voor het uitvoeren van TORWASH betekent dit dat er veel water moet worden toegevoegd. Zelfs wanneer het graszaadhooi geknipt is in stukjes van max. 1,5 cm, kan er in de autoclaaf maar ca. 12 g in 200 ml water gebruikt worden. TORWASH lijkt optimaal te werken als de biomassa volledig in water zit. Voor opschalen betekent dit dat de waterhuishouding goed in de gaten gehouden moet worden en dat er met water recycling of in tegenstroom gewerkt moet worden.

Uit de serie TORWASH experimenten uitgevoerd met als temperaturen 150-170-190-200-230°C blijkt een duidelijke verandering in het eindproduct zichtbaar. Bij 150°C bestaat het eindproduct vooral uit hooi, wat enigszins verteerd lijkt te zijn. Met toenemende temperatuur (en druk) verpulpt het materiaal steeds meer. Bij 190-200°C ligt een optimum, want er zijn nog korte vezeltjes over, maar de bulk is een kneedbare massa. De roerder heeft ongetwijfeld meegeholpen om het materiaal te verkleinen en het precieze effect moet nog worden uitgezocht. Bij 230°C is de conversie te ver, want filtratie is lastig en het residu blijft een steekvaste pasta.

Bij hogere TORWASH temperaturen neemt het gehalte droge stof van het residu toe van 8% bij 150°C tot 23% bij 230°C. Ook wordt het materiaal steeds beter te pelletiseren en neemt ook het droge stof gehalte van het pellet toe en wordt de pellet sterker (vooral na droging).

Al met al lijkt 190-200°C de optimale temperatuur te zijn voor praktisch gebruik van TORWASH. In dit temperatuurtraject zijn de vezels kwetsbaar en breken onder impact van de roerder, maar het product is eenvoudig te filtreren tot een hanteerbare koek. Bij lagere temperatuur is de conversie onvolledig en blijft het residu te vezelig; bij hogere temperatuur is veel verlies aan vaste stof en energie. Bovendien wordt filtreren lastig.

Deze optimale temperatuur van TORWASH is ongeveer 75°C lager dan de optimale temperatuur voor droge torrefactie. Dit heeft als voordeel dat er minder energie in verwarming gestopt moet worden. Ook kan er bij ca. 20 bar gewerkt worden, een druk die aanzienlijk lager ligt dan aanvankelijk gedacht. Bij 275°C is de stoomdruk ongeveer 60 bar. Aspecten die mee spelen bij deze verlaging van de temperatuur zijn:

- water, wat als reagens fungeert
- water, wat zorgt voor verbeterde warmteoverdracht
- een roerder, die mechanische stress uitoefent.

De tijdsperiode van de TORWASH experimenten is 30 minuten op setpoint, wat vergelijkbaar is met droge torrefactie. Mogelijk zou bij hogere temperatuur en druk een veel kortere verblijftijd volstaan voor effectieve conversie.

4.2 Vochtgehalte

De vochtgehaltes van geTORWASHt materiaal zijn onverwacht hoog: 75% of meer. Er was gehoopt dat water spontaan uit het residu zou lopen. Tabel 4.1 geeft vochtgehaltes weer, gemeten direct na affilteren. De vochtgehaltes van de gefilterde monsters zijn experimenteel meerdere malen bepaald. Ze zijn niet altijd gelijk voor hetzelfde materiaal (vergelijk Tabel 3.3 en 4.1). Dit kan komen omdat het materiaal inhomogeen is of omdat er na verloop van tijd toch water uitzakt en onderin de pot komt. Potten zijn altijd gesloten en in de koelkast bewaard, dus uitdampen is niet significant. Verder zijn sommige monsters erg klein en kunnen meetfouten

voor procentpunten afwijking zorgen, zodat de getallen onnauwkeurig zijn. Trends lijken wel significant te zijn en daarop is de verdere evaluatie gebaseerd.

Tabel 4.1 Vochtgehalten natte residuen direct na filtratie en na pelletiseren in massaprocenten

monster graszaadhooi	na filtratie	na pelletiseren (20 bar)
gewassen op 20°C	76%	
TORWASH 150°C	88%	65% (pellet valt uiteen)
TORWASH 170°C	84%	54%
TORWASH 190°C	81%	44% (34% bij 50 bar)
TORWASH 200°C	80%	
TORWASH 230°C	74%	46%
getorrefieerd, gewassen bij 20°C	75%	

De verwachting was dat vocht spontaan uit het materiaal zou lopen ("uitzweten") omdat het materiaal apolair van karakter zou worden. Wel is waar te nemen dat vocht snel af te dampen is. Dit duidt erop dat het vocht wat in het materiaal zit, niet gebonden is. Hetzelfde kan worden waargenomen bij droog geTORWASHt materiaal, wat uitgewassen is. Dat blijkt na affiltreren toch ca 80% vocht te bevatten, maar ook dit hoeft maar even te liggen en het is opgedroogd. De meest aannemelijke verklaring is dat zowel droog getorrefieerd materiaal als geTORWASHt materiaal een apolair karakter heeft en dat vocht dus niet chemisch gebonden is, maar gewoon fysisch gebonden water is wat in de poriën zit. Er is slechts verdamping nodig om het weg te krijgen. Dit zal drogen in heet gas eenvoudig maken omdat bij lagere temperaturen al een aanzienlijk vochtverlies gerealiseerd kan worden. De verdampingsenthalpie zal echter nog steeds ingebracht moeten worden om het vocht uit het materiaal te krijgen. Als alternatief kan mechanisch ontwaterd worden. Als het materiaal voldoende slap is kan water er simpelweg uit geknepen worden. De pers moet wel afvoer van vocht toelaten.

4.3 Pelletiseren

Mechanische ontwatering van geTORWASHt materiaal is toegepast in de vorm van pelletiseren. Tabel 3.3 geeft aan dat een aanzienlijke ontwatering realiseerbaar is bij 20 bar en dat deze beter wordt bij 100 bar. Als beste is een drogestof gehalte van ca. 60% haalbaar voor geTORWASHt materiaal van 190-230°C. Dit is, startende vanaf ca. 20% een grote sprong, waarbij 3/4 van alle vocht uit het materiaal geperst is. Een hogere druk tijdens het pelletiseren heeft een gunstig effect op de dichtheid. Van twee monsters geTORWASHt materiaal is een tweede pellet gemaakt bij hogere druk 50-100 bar in plaats van 20 bar. Deze hebben een hoger droge stof gehalte en een hogere dichtheid.

Een biomassapellet met ca. 60% droge stof is nat, maar op zich inzetbaar als brandstof. Het is echter nog ver verwijderd van de gewenste 85%. Er zijn verschillende remedies voor te bedenken.

- Persen bij hogere druk, 100 i.p.v. 20 bar levert pellets op met 5 tot 10 procentpunten meer droge stof. Het is niet duidelijk hoe hoog de druk moet zijn om tot 85% droge stof te komen.
- Er is koud geperst, maar wanneer er warm geperst wordt is een hoger droge stof gehalte haalbaar omdat boven 80°C lignine plastisch wordt en poriën begint op te vullen.
- Drogen aan de lucht kan het drogestofgehalte doen toenemen, zeker als hiervoor een warm (rook)gas gebruikt kan worden. Maar ook buitenlucht kan goed werken. Het is bij de proeven opgevallen dat geTORWASHt materiaal op een schotel zeer snel droogt; veel sneller dan gewone biomassa.

4.4 Opbrengst massa en energie

Van de serie TORWASH proeven en de referentiemetingen is berekend hoe de totale massa van het graszaadhooi verdeeld is tussen extract en residu. In tabel 4.2 staat de opbrengst aan vaste stof in het residu zoals dat uit de autoclaaf is gekomen. Het is duidelijk dat bij toenemende TORWASH temperatuur de opbrengst aan massa sterk terugloopt, terwijl die bij TORWASH op 170°C nog gelijk was. Overigens moet hierbij aangetekend worden dat vijf procentpunten afname bij de wasstap voor rekening komt van verlies aan zouten. NB. Dezelfde berekening op basis van materiaal na verdere mechanische ontwatering tot 85% droge stof wordt niet wezenlijk anders.

Tabel 4.2 Opbrengst aan massa en energie bij TORWASH en referentiemeting; berekeningen op basis van opbrengst droge stof

materiaal	massa na torrefactie	massa na koud wassen	massa na TORWASH	energie opbrengst
TORWASH bij 170°C			81%	90%
TORWASH bij 200°C			71%	85%
TORWASH bij 230°C			57%	77%
alleen wassen bij 20°C		81%		niet bepaald
droge torrefactie + wassen bij 20°C	84%	83%		93%

Het deel van de energie dat in het residu blijft bij TORWASH en bij droge torrefactie plus wassen zijn ook weergegeven in Tabel 4.2. Hierbij is de opbrengst aan massa vermenigvuldigd met de bovenste verbrandingswaarde van het residu en gedeeld door de verbrandingswaarde van het uitgangsmateriaal op basis van droge stof. Bij TORWASH op 200°C wordt 71% van de massa behouden, maar die bevat 85% van de energie die oorspronkelijk in het graszaadhooi aanwezig was.

Bij reguliere torrefactie verdwijnt ca. 20% van de massa van de biomassa, maar blijft ca. 90% van de energie behouden in de vaste stof. De vervluchtigde massa wordt nuttig gebruikt in de torrefactie installatie. Deze getallen worden bevestigd in dit project: 83% van de massa en 93% van de energie blijven behouden bij droge torrefactie bij 240°C gevolgd door wassen bij 20°C. Voor TORWASH bij 170°C worden vergelijkbare getallen gevonden, respectievelijk 81% en 90%. Bij TORWASH op hogere temperaturen lopen zowel massa- als energieopbrengst terug. Bij TORWASH op 200°C is er nog sprake van 86% energieopbrengst, wat op zich nog niet onredelijk is, maar bij TORWASH op 230°C is het al teruggelopen tot 77%. De oorzaak is voornamelijk het toenemende verlies aan massa, want de verbrandingswaarde van het residu neemt toe. Het is een punt van zorg dat in vervolgonderzoek nader uitgezocht moet worden.

4.5 Verbrandingswaarde

TORWASH levert net als torrefactie een verhoging van de verbrandingswaarde op. Tabel 3.4 geeft de getallen van de bovenwaarde op droge basis. Het uitgangsmateriaal, graszaadhooi heeft een verbrandingswaarde van 16.4 kJ/g. Residuen hebben waarden van 18.2, 19.9 en 22.1 kJ/g na TORWASH op respectievelijk 170, 200 en 230°C. Deze waarden zijn vergelijkbaar met die van turf. In zekere zin kan TORWASH gezien worden als een versnelde omzetting van biomassa naar turf⁷. Dit wordt ook weergegeven door veranderingen in het gehalte vluchtig materiaal, wat ook afneemt met toenemende TORWASH temperatuur.

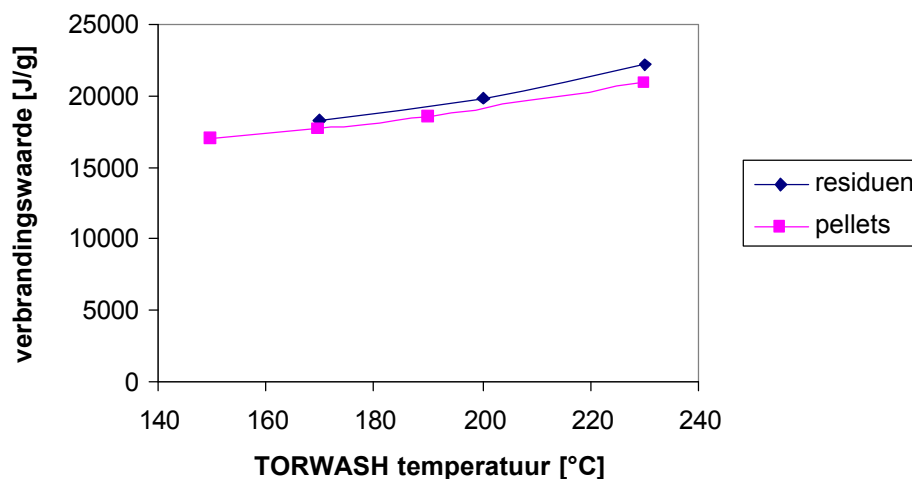
Er is een duidelijke trend naar hogere verbrandingswaardes bij hogere temperaturen. Dit geeft aan dat de energie-inhoud niet evenredig afneemt met verlies aan materiaal. Enerzijds verdwijnen er vooral zouten en CO₂, die wel massa hebben, maar niets bijdragen aan de

⁷ Er bestaan ook processen, die eveneens in water en onder druk plaatsvinden, waarbij turf omgezet wordt in een product gelijkend op steenkool; een soort versnelde, kunstmatig inkoling.

verbrandingswaarde. Anderzijds kan gesteld worden dat het organische materiaal wat verdwijnt voornamelijk uit stoffen bestaat met een relatief lage verbrandingswaarde, zoals azijnzuur.

Regulier getorrefieerd graszaadhooi, bij 240°C, heeft een verbrandingswaarde van 17.5 kJ/g en is daarmee hoger dan het uitgangsmateriaal, maar lager dan elk geTORWASHt materiaal. Ook hier geldt dat er naar verhouding minder energieverlies dan massaverlies optreedt. Water en CO₂ zijn ontweken net als andere stoffen met een lage verbrandingswaarde. De zouten zijn echter gebleven en tellen nog steeds mee voor de massa. Dit effect is significant, want wanneer getorrefieerd materiaal uitgewassen wordt resulteert dat in een verhoging van de verbrandingswaarde van 17.5 naar 18.4 kJ/g.

Een groot verschil tussen geTORWASHt en getorrefieerd materiaal is, dat deze laatste kurkdroog is en daardoor een goede brandstof is, terwijl geTORWASHt materiaal na filtratie nog meer dan 75% water bevat; te veel voor daadwerkelijke toepassing als brandstof. Het ontwaterend pelletiseren is hiervoor toegepast, zodat het watergehalte terugloopt naar ca. 40%. Dit mag geen effect hebben op de gepresenteerde verbrandingswaarde, omdat deze op droge basis is. Figuur 4.1 laat zien dat de pellets een iets lagere verbrandingswaarde hebben, maar het is de vraag of dat significant is, want er zit maar een paar procent verschil tussen beide curves. De monsters zijn erg klein, op de grens van wat minimaal nodig is voor een betrouwbare analyse.



Figuur 4.1 Verbrandingswaarde van residuen en pellets van geTORWASHt graszaadhooi als functie van de temperatuur; bovenwaarde op droge basis

4.6 Verwijdering van zouten

Het slagen van het “Proof of Principle” van TORWASH is afhankelijk van de distributie van elementen tussen residu en extract. Hierbij zijn vooral de alkalimetalen en halogeniden van belang, omdat die aanleiding geven tot problemen met agglomeratie, corrosie en laag-smeltende assen. De verschillende behandelingstechnieken, TORWASH, droge torrefactie en wassen, leveren verschillende gradaties van verwijdering van elementen op. Daartoe zijn elementbalansen opgesteld voor graszaadhooi, geTORWASHt is bij 170, 200 en 230°C. Ter vergelijking zijn eveneens elementbalansen opgesteld voor graszaadhooi, gewassen bij 20°C en voor graszaadhooi, wat eerst droog getorrefieerd is bij 240°C en vervolgens gewassen bij 20°C. Hieruit volgt een distributie van elementen. De resultaten daarvan staan in Tabel 4.3 en 4.4.

4.6.1 Kalium, natrium, chloor en broom

Het is direct duidelijk uit Tabel 4.3 dat K, Na, Cl en Br bij TORWASH vrijwel volledig in het extract komen. Van dit extract blijft een klein deel in het residu achter. Zonder verdere maatregelen (maar ook bij thermisch drogen van het residu) zou dan toch nog 10-20%

achterblijven in de brandstof. Dit is geen volledige ontzouting, maar wel een aanzienlijke vermindering van het zoutgehalte. Het is een beter resultaat dan koud wassen (al dan niet na droge torrefactie).

Tabel 4.3 Verdeling van elementen in TORWASH experimenten

	TORWASH 170°C		TORWASH 200°C			TORWASH 230°C			
	droge stof in residu	vloeistof vrij extract	droge stof in residu	vloeistof in residu	vrij extract	droge stof in residu	vloeistof vrij extract	vrij extract	
Cl	-4%*	18%	86%	-1%*	11%	90%	1%	7%	92%
Br	-3%*	18%	85%	-1%*	11%	90%	5%	7%	88%
Al	98%	0%	2%	98%	0%	2%			
Ca	42%	10%	47%	38%	7%	55%	75%	2%	23%
Fe	96%	1%	3%	94%	1%	5%			
K	-1%*	18%	83%	-1%	11%	90%	0%	7%	93%
Mg	12%	15%	72%	13%	10%	78%	34%	5%	62%
Na	0%	18%	82%	0%	11%	89%	2%	7%	91%
P	24%	13%	63%	28%	8%	64%	73%	2%	25%
S	33%	12%	55%	30%	8%	62%	29%	5%	66%
Si	50%	9%	41%	83%	2%	15%	36%	4%	59%
Zn	80%	3%	16%	82%	2%	16%	87%	1%	12%

* negatieve waarden zijn het gevolg onnauwkeurigheden in de waarden van de massadistributie

Tabel 4.4 Verdeling van elementen in referentie experimenten

	wassen 20°C		droge torrefactie bij 240°C + wassen bij 20°C			
	droge stof in residu	vloeistof vrij extract	droge stof in residu	vloeistof in residu	vrij extract	vrij extract
Cl	17%	12%	72%	16%	12%	71%
Br	10%	12%	78%	5%	14%	81%
Al	100%	0%	0%	95%	1%	4%
Ca	76%	3%	21%	90%	1%	8%
Fe	99%	0%	1%	90%	1%	8%
K	31%	10%	60%	36%	9%	55%
Mg	63%	5%	31%	83%	2%	14%
Na	37%	9%	55%	36%	9%	55%
P	58%	6%	37%	83%	3%	15%
S	58%	6%	36%	58%	6%	36%
Si	99%	0%	1%	98%	0%	1%
Zn	80%	3%	17%	94%	1%	5%

Met mechanische ontwatering is het vocht met het restant van de genoemde voor het grootste deel te verwijderen. Mechanische ontwatering is ook nodig om het droge stof gehalte flink omhoog te brengen. Voor inzet als brandstof zal er minstens 50% droge stof in het residu moeten zitten. Met uitpersen is dit niveau net aan haalbaar gebleken. Om een aantrekkelijke brandstof te zijn, zal het droge stof gehalte echt op een niveau van 85% moeten liggen. De consequenties van mechanisch ontwateren voor het zoutgehalte zijn uitgewerkt in Tabel 4.5. en 4.6 staan voor drie gehalten droge stof aangegeven welk percentages van bepaalde elementen nog in het residu achter gebleven zijn.

Bij ontwatering tot ca. 50% blijken voor geTORWASHt materiaal de gehalten Cl en Br al rond de 0% te liggen. Voor K en Na is dit nog maar een paar procent. Persen tot 100 bar zorgt dus voor nagenoeg volledige ontzouting. Verdere mechanische ontwatering van 50% tot 85% is niet nodig om ontzouting na te streven (maar wel voor verbetering van de calorische waarde). Overigens geldt voor alle elementen dat het ontwateren tussen 50% en 85% geen significante

verandering in de verdeling van elementen te weeg brengt. De conclusies zijn niet wezenlijk anders voor TORWASHen op de genoemde temperaturen.

Tabel 4.5 Fractie van bepaalde elementen, die achterblijft in het residu van geTORWASHt graszaadhooi bij verschillende niveaus van mechanische ontwatering.

droge stof	TORWASH 170°C			TORWASH 200°C			TORWASH 230°C		
	16%	46%	85%	22%	56%	85%	26%	54%	85%
Cl	14%	0%	-3%*	10%	2%	0%	8%	3%	2%
Br	15%	1%	-3%*	10%	1%	-1%*	12%	7%	5%
Al	98%	98%	98%	98%	98%	98%			
Ca	53%	45%	43%	45%	40%	38%	77%	76%	76%
Fe	97%	96%	96%	95%	95%	94%			
K	17%	3%	-1%*	10%	1%	-1%*	7%	2%	1%
Mg	28%	16%	13%	22%	15%	13%	38%	35%	34%
Na	18%	4%	1%	11%	2%	0%	9%	4%	2%
P	37%	27%	24%	36%	30%	29%	75%	74%	73%
S	45%	36%	34%	38%	32%	31%	34%	31%	30%
Si	59%	52%	50%	85%	84%	83%	41%	37%	36%
Zn	84%	81%	81%	84%	82%	82%	88%	87%	87%

* negatieve waarden zijn het gevolg van onnauwkeurigheden in de meetwaarden

Tabel 4.6 Fractie van bepaalde elementen, die achterblijft in het residu van droog getorrifieerd en/of gewassen graszaadhooi bij verschillende niveaus van mechanische ontwatering.

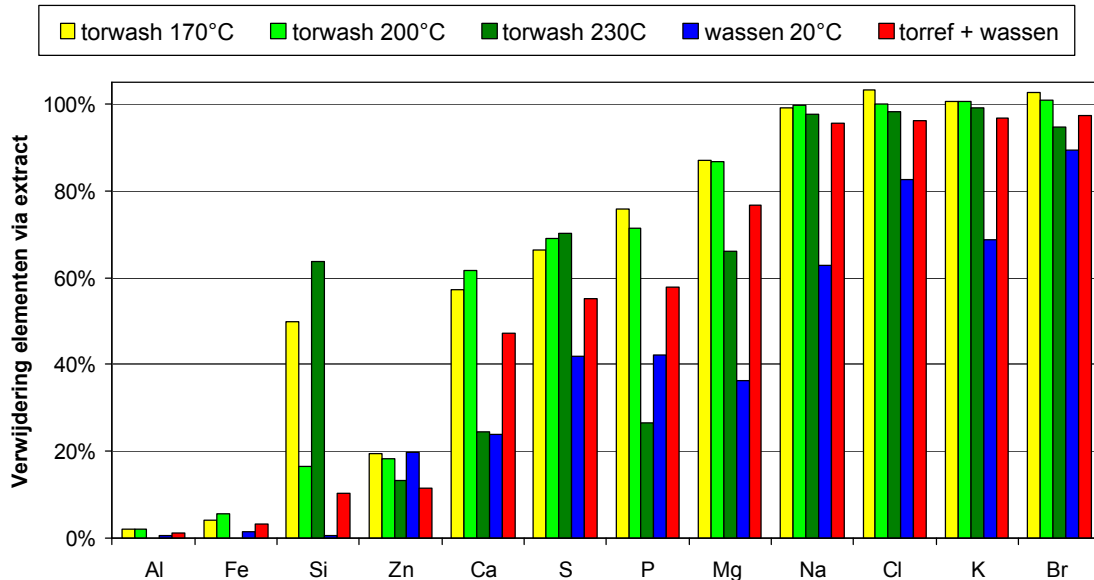
droge stof	wassen bij 20°C			torrefactie bij 240°C + wassen bij 20°C		
	21%	55%	85%	26%	55%	85%
Cl	28%	19%	17%	17%	7%	4%
Br	22%	13%	10%	16%	6%	3%
Al	100%	100%	100%	99%	99%	99%
Ca	79%	77%	76%	59%	54%	53%
Fe	99%	99%	99%	97%	97%	97%
K	40%	33%	31%	17%	6%	3%
Mg	69%	65%	64%	34%	26%	23%
Na	45%	39%	37%	18%	8%	4%
P	63%	59%	58%	50%	44%	42%
S	64%	59%	58%	52%	47%	45%
Si	99%	99%	99%	91%	90%	90%
Zn	83%	81%	80%	90%	89%	89%

Wanneer TORWASH op 190-200°C als meest voor de hand liggende procesuitvoering wordt gezien is ontzouting (Na, Ka, Cl) volledig realiseerbaar. Het restant zouten, wat nog achter kan blijven omdat mechanische ontwatering niet volledig is, mag als verwaarloosbaar worden beschouwd. Het laatste restje vocht kan dus – gezien vanuit het standpunt van ontzouting – gerust thermisch worden verwijderd.

Het doel van zoutverwijdering (K, Na, Cl) wordt ook bereikt bij wassen van getorrifieerd materiaal. Enkel wassen levert een verwijderingsgraad van 60-90% op, wat overeenkomt met data uit de literatuur. Een deel van deze elementen is en blijft gebonden aan de vaste stof. De torrefactie is een chemische conversie, die - nat of droog - er toe leidt dat elementen vrijgemaakt worden, oplossen in water en afgevoerd kunnen worden. Dit gebeurt ondanks het apolaire karakter van het vaste materiaal.

4.6.2 Overige elementen

Verwijdering van andere elementen vindt ook plaats. De elementen Ca, Mg, S, en P worden bij TORWASH ook voor meer dan 50% verwijderd, maar de 100% wordt duidelijk niet gehaald. De elementen Al, Fe, Si en Zn worden nauwelijks verwijderd. De verwijderingsgraad van elementen uitgaande van mechanische ontwatering tot een niveau van 85% droge stof staan grafisch weergegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Verwijderingsgraad van elementen via het extract bij diverse bewerkingen van graszaadhooi.

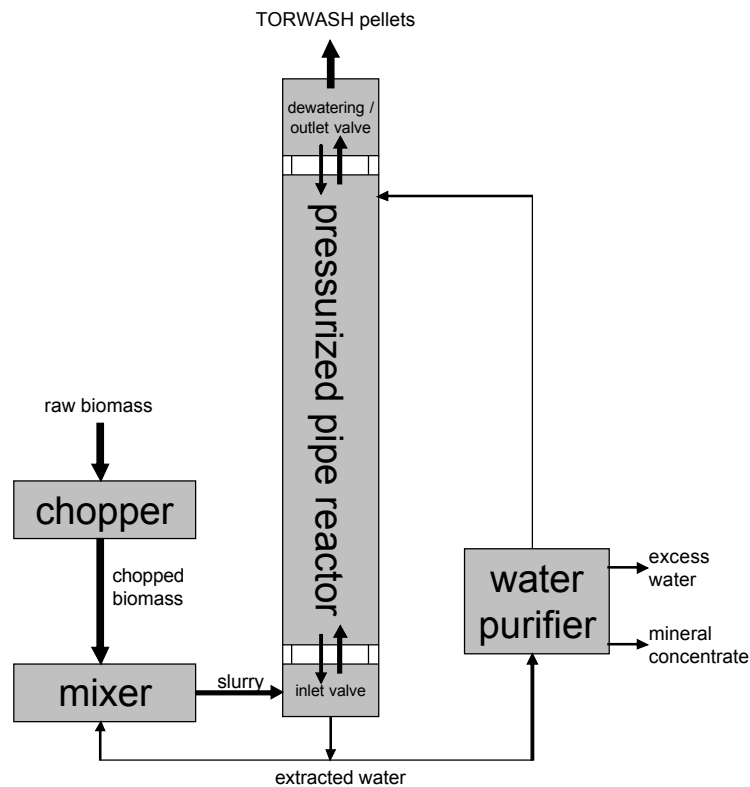
De aardalkali metalen (Mg en Ca) worden gedeeltelijk verwijderd, zodat er een sterk verbeterde verhouding tussen K+Na en Ca+Mg is t.o.v. de uitgangsstof. Het gevolg is o.a. dat het smeltpunt van assen omhoog gaat en het risico van agglomeratie bij toepassing in een wervelbed vermindert. Ook zwavel wordt maar gedeeltelijk verwijderd. Dit resulteert in een sterk verlaagde verhouding Cl/S, wat gunstig is voor het verminderen van de corrosieproblemen die depositie van KCl veroorzaakt.

De elementen Al, Fe, Zn en Si hebben de laagste verwijderingsgraad. Het is opvallend dat Si in aanzienlijke mate oplost bij TORWASH bij 170 en 230°C, maar niet bij 200°C. Het is niet duidelijk of dit te maken heeft met monsternamen of dat er daadwerkelijk sprake is van specifieke (on)oplosbaarheid bij bepaalde temperaturen. Het resultaat is hoe dan ook dat de overblijvende as na verbranding van geTORWASHt materiaal veel minder zouten zal bevatten en meer oxides van Al, Si en Fe. Hierdoor zullen de assen na verbranding veel meer op steenkoolassen gaan lijken. Dat is gunstig voor toetsing aan de eisen van EN-450 voor poederkoolvliegas of voor het Bouwstoffenbesluit, waarbij uitloging van chloride en sulfaat vaak directe toepassing verhinderen van biomassa-assen (naast uitloging van zware metalen).

De verwijdering van asvormende componenten heeft ook nog een gunstig effect op het totale volume van de as die over zal blijven bij verbranding. Het asgehalte (op basis van droge stof) van de brandstof neemt af van 8 naar 4 wt% voor TORWASH bij 200°C. Als er gecorrigeerd wordt voor calorische waarde (asgehalte uitgedrukt in kg/MJ) is de situatie zelfs nog iets gunstiger. Elke ton as die niet geproduceerd wordt levert technisch en economisch voordeel op. Elke ton as die wel geproduceerd wordt is van betere kwaliteit.

4.7 Conceptreactor

Het TORWASH concept kan in principe in een batch, semi-batch of zelfs continue reactor worden toegepast. Voor een uitgewerkt reactorontwerp is het nu nog te vroeg. Wel is een schematische reactorontwerp gemaakt (zie Figuur 4.3) wat in grote lijnen aangeeft hoe een eenvoudige TORWASH reactor gecombineerd wordt met a) hakselen plus aanlengen tot een slurry, b) recycling van gezuiverd extract en c) ontwatering plus watervoorverwarming.



Figuur 4.3 Schematische voorstelling van een TORWASH reactor; dikke pijlen geven het pad van de biomassa aan, dunne pijlen stellen vloeistoffen voor

Biomassa wordt versnipperd en via een inlaatklep als slurry in de drukreactor gebracht. De reactor is niets anders dan een verticale buis, waar de biomassa omhoog gaat en in contact staat met heet water dat naar beneden stroomt. De reactor kan isotherm zijn en heeft geen andere faciliteiten, dan een inlaat en een uitlaat. De inlaatklep dient om slurry in te voeren en een gelijk volume extract af te voeren, wat verontreinigd is met zouten en organische componenten. Een deel van het extract kan op temperatuur blijven en wordt direct gebruikt om de slurry mee te maken. Een ander deel wordt gereinigd. In de top van de reactor wordt schoon water gebruikt om zoveel mogelijk zout uit te spoelen en ze te koelen naar de optimale temperatuur voor mechanische ontwatering. Het warme water uit de ontwatering kan de reactor ingebracht worden.

Bovengeschetst systeem is een conceptreactor, die op basis van technische gegevens en aannames is ontworpen. In vervolgonderzoek zal dit systeem gedimensioneerd en geoptimaliseerd dienen te worden.

4.8 Verwerking van afvalwater

Een belangrijk aandachtspunt bij het TORWASH proces is de kwaliteit van het afvalwater. Het gehalte aan mineralen is minder dan 3 wt% en bestaat vooral uit alkalimetalen en halogeniden, aangevuld met aardalkalimetalen, fosfaat en sulfaat. Zware metalen zijn in kleinere

hoeveelheden aanwezig. De karakteristieken van TORWASH extract geven echter aan dat het niet zonder meer op het riool geloosd kan worden, ondanks het feit dat er slechts geringe hoeveelheden mineralen en organische moleculen in zijn opgelost.

In een opgeschaald TORWASH-proces zal het afvalwater sterk geconcentreerd worden. Via het opwerken van het geconcentreerde afvalwater zijn wellicht een aantal vermarktbaar stoffen te verkrijgen. Een deel van de organische verbindingen in het afvalwater is geïdentificeerd. Het is vooral azijn- en mierzuur (samen ca. 0.3 wt%). Verder zijn er nog kleine (< 0.5 gew%) hoeveelheden furfural, hydroxymethylfurfural (HMF) en hydroxy-aceton aanwezig. Overige organische moleculen worden in sporenhoeveelheden (< 0.05 wt%) aangetroffen. Ca. 50% van de geanalyseerde organische stoffen in het afvalwater (nog) niet geïdentificeerd is. De verwachting is dat het grotendeels suikers zijn.

De meest elegante oplossing zou zijn om de nutriënten uit het water te gebruiken in de vorm van meststoffen. Het bevat organische en anorganische componenten (vooral kalium) die uit biomassa gehaald zijn.

4.9 Vervolgonderzoek

In Nederland zal er een toenemende behoefte zijn om ook de natte biomassastromen beschikbaar te maken voor opwekking van energie. Verdere ontwikkeling van TORWASH kan in deze behoefte voorzien. De mogelijkheden om d.m.v. TORWASH ontzouting en energieverdichting te realiseren zijn zonder meer duidelijk. Droging vindt niet spontaan plaats, zoals was aangenomen. Door de veranderde materiaaleigenschappen wordt mechanische en thermische ontwatering wel eenvoudiger.

Vervolgonderzoek zal zich moeten concentreren op de volgende zaken:

- Verdergaande ontwatering, met als doel 85% droge stof.
- Evaluatie van de gewenste niveaus van ontzouting.
- Andere relevante brandstoffen moeten onderzocht worden, rioolslib en rietplaggen.
- Verwerkingsroutes van het extract. Dit is tot nu toe bewust buiten de scope gehouden, maar het extract vormt een potentiële showstopper.
- Een praktische reactor zal moeten worden ontworpen, die in eerste instantie misschien nog als batch of pseudo-batch bedreven kan worden, maar die toch uitzicht biedt op een continue productie.
- Vergelijkende literatuurstudie die de positie van TORWASH t.o.v. concurrerende technieken moet bepalen.

5. Conclusies

De doelstelling van het TORWASH project was het realiseren van een "Proof of Principle" van een nieuwe opwerkingstechniek, die torrefactie, ontzouting en droging van biomassa integreert. Het principe van TORWASH is gedemonstreerd door graszaadhooi in water op verhoogde druk en temperatuur te brengen en vervolgens mechanisch te ontwateren. Zodoende is er een nieuwe brandstof gegenereerd, die een zekere gelijkenis met turf en bruinkool vertoont.

Twee van de drie bewerkingen, die in TORWASH zijn geïntegreerd zijn volledig realiseerbaar:

- **Torrefactie** heeft plaatsgevonden. Het graszaadhooi heeft een deel van zijn massa verloren, maar een geringer deel van zijn energieinhoud, zodat er sprake is van energieverdichting. Het materiaal is gedensatureerd, zodat het slecht water vasthoudt (apolair) en steriel is.
- **Ontzouting** van alkalimetalen en halogeniden is gerealiseerd. Genoemde stoffen zijn volledig opgelost in de vloeistoffase. Het restant vloeistof in de brandstof bepaalt het zoutgehalte. Aardalkalimetalen, zwavel en fosfor worden voor ruwweg de helft verwijderd.
- **Droging** van behandeld materiaal vindt niet spontaan plaats. Dit is een tegenslag, want er was aanvankelijk gedacht dat water spontaan zou "uitzweeten". Toch is er sprake van een gedeeltelijk succes, want geTORWASHt materiaal is eenvoudig te ontwateren door uitpersing en ook door thermische droging.

Overige conclusies:

- De optimale TORWASH temperatuur is voor graszaad hooi 190-200°C. Dit ligt een stuk lager dan de temperatuur die benodigd is voor een vergelijkbaar resultaat bij droge torrefactie; een verschuiving van ca. 75°C.
- De druk waaronder gewerkt moet worden is in de orde van 20 bar. Dat is aanzienlijk lager dan de 60 bar die aanvankelijk nodig leek.
- De verbrandingswaarde (op basis van droge stof) van het TORWASH product ligt boven die van het uitgangsmateriaal en zelfs boven die van droge torrefactie. Na TORWASH bij 200°C is de HHV ca. 19 kJ/g.
- Een aanzienlijk gedeelte van de oorspronkelijke grondstof, ruwweg 30%, gaat in oplossing. Bij droge torrefactie is dit ruwweg 20%. De helft van het verschil bestaat echter uit asvormende componenten, die niet bijdragen aan de calorische waarde.
- In het geproduceerde materiaal zit nog ca. 80% van de calorische waarde van de grondstof. Bij droge torrefactie is dit ca. 90%. Maar er is geen energie verloren gegaan in droging van de grondstof.
- Ontwatering van het product tot een niveau van 50% droge stof is eenvoudig te realiseren door persen (pelletiseren) bij 100 bar. Voor ontzouting is 50% droge stof afdoende. Vanuit energetisch oogpunt dient dit getal nog omhoog te gaan tot 85%.
- De verhoudingen Ca+Mg versus K+Na en S versus Cl zijn sterk verhoogd. Bij gebruik als brandstof vermindert dit het risico van agglomeratie, corrosie en fouling.
- Assen van geTORWASHt materiaal hebben betere kansen voor hergebruik.
- Er blijft een waterige afvalstroom over, waarin een aanzienlijk deel van de organische massa zit en veel zouten. Voor het succes van TORWASH zal het noodzakelijk zijn om een geschikte verwerking van de waterige afvalstroom te vinden, b.v. als meststof.

Vervolgonderzoek zal zich moeten richten op:

- verbeterde mechanische ontwatering
- uitbreiding naar andere grondstoffen, b.v. rioolslib
- vaststellen van het gewenste of noodzakelijke ontzoutingsniveau

- verwerking - bij voorkeur nuttig - van het extract
- reactorontwerp, bij voorkeur simpel en voor lokale toepassingen

De eindconclusie is dat het TORWASH concept werkt. De benodigde reactiecondities vallen mee, maar het ontwateren valt tegen. Het concept heeft potentie voor (natte) biomassastromen, waarbij ontzouting en ontwatering een voorwaarde zijn voor gebruik als brandstof. Voor het TORWASH concept is een octrooiaanvraag ingediend.