

## **State of the Art Teknologi Hidrotermal Untuk Pengolahan Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat**

Budi Triyono<sup>1,\*</sup>, Muhammad Hanif Gusman<sup>2</sup>, David Hutapea<sup>2</sup>, Pandji Prawisudha<sup>2</sup> dan Ari Darmawan Pasek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung,  
Jalan Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung 40012, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia

email : budit0904@gmail.com

### **Abstrak**

Penggunaan berlebihan bahan bakar fosil menyebabkan peningkatan kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer yang merupakan salah satu penyebab pemanasan global akibat efek rumah kaca sehingga perlu untuk dilakukan optimalisasi berbagai sumber energi terbarukan, salah satunya adalah pemanfaatan biomassa dan limbah padat lainnya sebagai bahan bakar padat alternatif. Proses torefaksi merupakan proses termal untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat yang meliputi pengurangan kadar air, peningkatan keseragaman ukuran dan densitas energi. Hidrotermal (HT) adalah proses yang menggunakan cairan dengan tekanan dan suhu tinggi sebagai media perpindahan panas, juga dikenal sebagai torefaksi basah (WT) atau hidrotermal karbonisasi (HTC). Makalah ini membahas tentang potensi limbah padat (MSW) untuk dikonversi menjadi bahan bakar padat melalui proses HTC, termasuk uraian tentang sejarah, mekanisme proses HTC, dan studi literatur untuk penelitian yang berkaitan dengan konversi MSW menjadi bahan bakar padat. Hal ini bertujuan untuk memetakan perkembangan teknologi HTC serta mengidentifikasi penelitian lanjutan yang perlu dilakukan. Penelitian terkait HTC mulai berkembang pada tahun 1990 dan berkembang pesat beberapa tahun yang lalu, ditandai dengan peningkatan signifikan jumlah artikel ilmiah yang dipublikasikan. Penelitian yang telah dilakukan umumnya masih dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan sistem reaktor *batch*, meskipun beberapa penelitian telah dilakukan pada skala pilot. Berdasarkan proses dan bahan bakar padat yang dihasilkan menunjukkan bahwa proses HTC adalah teknologi yang potensial untuk produksi bahan bakar padat terbarukan terutama dari biomassa dengan kadar air yang tinggi seperti MSW. Studi komprehensif masih diperlukan untuk mengidentifikasi kemungkinan dan hambatan dalam menerapkan teknologi HTC untuk mengonversi MSW menjadi bahan bakar padat dalam skala komersial.

**Kata kunci :** *Zero CO<sub>2</sub>, high moisture content biomass*, hidrotermal karbonisasi (HTC), *municipal solid waste* (MSW), dan bahan bakar padat terbarukan

### **Pendahuluan**

Bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam merupakan sumber energi primer dunia (sekitar 80% kebutuhan energi dunia bergantung pada bahan bakar fosil). Namun, sumber energi dari fosil ini diramalkan akan habis 40–50 tahun lagi [1]. Selain itu, kerusakan lingkungan seperti pemanasan global merupakan efek samping dari penggunaan

bahan bakar fosil sebagai sumber energi. IPCC melaporkan bahwa emisi dari bahan bakar fosil akan menyebabkan kenaikan temperatur sekitar 1.4 - 5.8°C dalam kurun waktu 1990 sampai 2100 [2].

Dewasa ini, dunia sedang berusaha untuk mengurangi emisi karbon dari bahan bakar fosil dengan menggunakan biomassa sebagai sumber energi alternatif. Saat ini biomassa memenuhi 10-15% kebutuhan

energi dunia. Negara – negara maju menggunakan biomassa untuk memenuhi 9-14% kebutuhan energinya, namun di negara – negara berkembang hampir 20-35% kebutuhan energi dipenuhi oleh biomassa [3]. Ketika biomassa dibakar atau dikonversi menjadi bentuk bahan bakar lain, karbon pada biomassa akan bereaksi dengan oksigen diudara untuk membentuk karbon dioksida yang akan terpapar ke atmosfer. Jika terbakar semuanya, jumlah karbon dioksida yang dihasilkan akan sama dengan yang diambil dari atmosfer pada masa pertumbuhan. Jadi tidak ada penambahan karbon dioksida ke atmosfer sehingga biomassa dapat dipandang sebagai sumber energi yang tidak menghasilkan emisi karbon dioksida [4].

Penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif masih menyisakan beberapa masalah diantaranya: densitas energi yang rendah, kandungan abu yang merugikan, ongkos transportasi yang tinggi, serta biaya *pre-treatment* yang tinggi. Oleh sebab itu diperlukan suatu teknologi untuk meningkatkan kualitas biomassa sehingga dapat mengatasi masalah – masalah yang dihadapi. Salah satu teknologi yang terus dikembangkan hingga saat ini adalah hidrotermal.

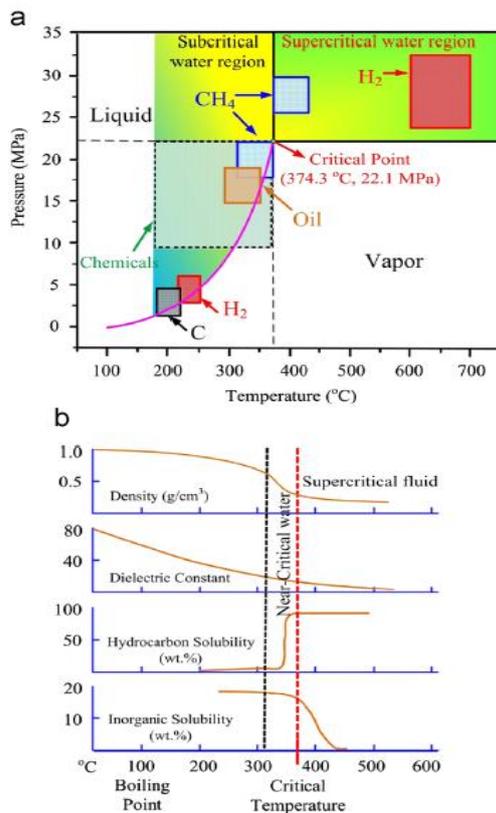
Istilah hidrotermal sebenarnya merupakan istilah dalam disiplin ilmu geologi yang digunakan untuk menjelaskan aktifitas air pada tekanan dan temperatur tinggi pada pembentukan batuan dan mineral [5]. Namun teknologi hidrotermal sudah diaplikasikan secara luas dalam berbagai disiplin ilmu termasuk kimia organik, biokimia, bioenergi, pangan, dan lain-lain. Proses hidrotermal sendiri memiliki keunggulan dibanding teknologi torefaksi. Disamping hidrotermal meningkatkan nilai kalor dari biomassa, hidrotermal juga terbukti mengurangi jumlah komponen organik dan inorganik yang terlarut dalam air sehingga mengurangi potensi pembentukan kerak pada tungku [6].

Kadar air yang ada pada MSW Indonesia lebih besar dari 60%, sehingga dibutuhkan proses *pre-treatment* untuk mengurangi kadar airnya sebelum digunakan sebagai bahan bakar padat pada *WTE plant* [7]. Teknologi hidrotermal cocok diaplikasikan untuk jenis biomassa yang memiliki kandungan air yang tinggi, salah satunya adalah sampah kota atau *municipal solid waste* (MSW), karena proses ini tidak memerlukan pengeringan awal seperti teknologi torefaksi [8].

Melalui *paper* ini akan dijelaskan berbagai penelitian terkait bidang hidrotermal yang sudah dilakukan untuk berbagai jenis sampah kota atau MSW di beberapa negara agar dapat terpetakan perkembangannya serta dapat teridentifikasi penelitian lanjutan yang perlu dilakukan.

### Proses Hidrotermal

Hidrotermal (HT) adalah proses termokimia untuk membentuk kembali biomassa pada air panas bertekanan. Dalam kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi, terlebih ketika melebihi titik kritisnya (373.3°C dan 22.1 MPa), rapat massa, konstanta dielektrik, dan konstanta disosiasi ion turun secara drastis, yang mana dapat mempercepat laju reaksi [9]. Hidrotermal sendiri sudah digunakan secara luas untuk *recovery* bahan bakar dan produk kimia dari biomassa yang memiliki kandungan air yang tinggi. Sebagaimana pada Gambar 1, konversi hidrotermal dapat dibagi menjadi Hidrotermal karbonisasi (180 – 250°C) untuk memproduksi hidrochar, Hidrotermal likuifaksi (sekitar 200-370°C, dengan tekanan antara 4 dan 20 MPa) untuk memproduksi minyak berat dan Hidrotermal gasifikasi (dekat temperatur kritis sampai 500°C) untuk menghasilkan gas kaya hidrogen [10].



Gambar 1. (a) Kondisi operasi konversi hidrotermal (b) sifat fisik air pada daerah sub-kritik, kritis, dan super kritis ditekanan 25.3 MPa<sup>[10]</sup>

Proses karbonisasi secara hidrotermal atau hydrothermal carbonization (HTC) merupakan proses termokimia pada temperatur yang relatif rendah untuk meningkatkan fasa padatnya yang biasa disebut HTC. Proses ini dapat mengkonversikan berbagai jenis biomassa menjadi serupa lignit bahkan sub-bituminous dengan massa tertinggal sekitar 35-60%. Karbon yang hilang sangat tinggi pada proses ini dikarenakan senyawa organik terlarut pada fasa cair dan hanya sedikit gas yang diproduksi. Proses ini sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa serta kondisi operasi yang meliputi waktu tinggal serta temperatur [11].

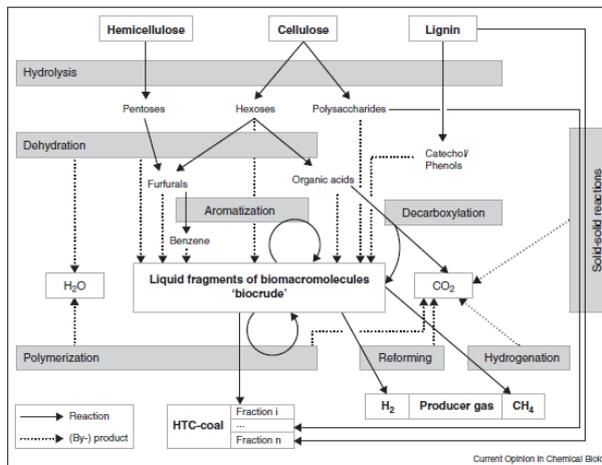
Temperatur operasi HTC sekitar 180-250°C di tekanan subkritik dengan waktu tinggal yang pendek. Proses hidrotermal

menggunakan kondisi air subkritik, artinya air dijaga dibawah titik kritisnya yaitu temperatur 374°C dan tekanan 22.1 MPa. Air subkritik dalam fasa cair memiliki sifat pelarutan yang baik disebabkan oleh konstanta dielektriknya dan rapat massa yang tinggi dibanding fasa uapnya. Dengan aplikasi panas, ion asam hidronium (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) dan ion basa hidroksil (OH<sup>-</sup>) terbentuk melalui penguraian. Untuk setiap zat dititik kritisnya, sifat dan strukturnya berubah signifikan, yang menunjukkan ikatan hidrogen putus dan memisahkan gugus dengan struktur rantainya [12].

Peningkatan produk ion dalam kondisi subkritik mempercepat reaksi yang dikatalis oleh asam atau basa. Mekanisme reaksi pada proses hidrotermal dapat dilihat pada Gambar 2. Reaksi awal yang terjadi ketika biomassa dipanaskan dalam air adalah hidrolisis [13]. Selulosa akan mengalami hidrolisis pada kondisi hidrotermal pada temperatur 200°C. Hemiselulosa mengalami hidrolisis sekitar temperatur 180°C, namun reaksi secara detail belum diketahui secara pasti. Lignin akan terdegradasi secara hidrotermal diatas temperatur 200°C disebabkan oleh jumlah ikatan eternya yang banyak.

Setelah mengalami hidrolisis, biomassa akan mengalami reaksi dehidrasi. Dehidrasi pada konversi hidrotermal dapat terjadi secara reaksi kimia maupun proses fisik yang menghilangkan kandungan air dari matriks biomassa tanpa mengubah susunan kimianya. Dehidrasi secara kimia mengkarbonisasi biomassa dengan menurunkan rasio H/C dan O/C. Sederhananya, dehidrasi adalah proses penghilangan gugus hidroksil. Perlakuan hidrotermal juga mengakibatkan sebagian gugus karboksil dan karbonil terurai. Gugus karboksil dan karbonil mengalami degradasi pada temperatur diatas 150°C menyisakan CO<sub>2</sub> dan CO. Beberapa gugus terbentuk dari proses degradasi biomakromolekul pada kondisi hidrotermal

sangat reaktif, hal ini bergantung pada asalnya dan derajat konversinya.



Gambar 2. Prinsip Reaksi Hidrotermal Karbonisasi [13]

Senyawa tak jenuh yang mengalami polimerisasi secara mudah dibentuk dari eliminasi gugus karboksil dan karbonil. Reaksi kondensasi seringkali dipengaruhi oleh pembentukan CO<sub>2</sub>. Dari beberapa eksperimen disimpulkan bahwa pembentukan HTC-coal selama karbonisasi hidrotermal terjadi saat proses polimerisasi kondensasi. Meskipun (hemi) selulosa terdiri atas karbohidrat, struktur aromatik sangat mungkin terjadi pada kondisi hidrotermal. Struktur aromatik ini kemudian dikenal sebagai pembentuk cetakan untuk HTC-coal. Reaksi ini berlangsung pada temperatur 200-300°C [14].

Proses HTC atau torefaksi basah pada kondisi *hot compressed water* akan menghasilkan produk berupa *hydrochar*, kondensat yang menguap dan kondensat yang tidak menguap. Namun demikian, kehadiran kondensat yang menguap harus diminimalisasi karena energi yang dibutuhkan oleh pemanas untuk menguapkan air sangatlah besar dibandingkan dengan mempertahankan air dengan massa yang sama pada zona sub-kritiknya. *Hydrochar* merupakan padatan hasil densifikasi HTC yang dapat dimanfaatkan secara luas, dari pemanfaatan

sebagai bahan bakar padat hingga pupuk. Sedangkan kondensat yang menguap dan tidak menguap dapat dimanfaatkan sebagai penghasil *toxic substance* berupa fenol, furfural, dan turunannya [15].

Pada dasarnya, HTC merupakan pirolisis yang dikondisikan pada temperatur dan tekanan yang tinggi serta hadirnya air pada kondisi subkritik. Kehadiran air sebagai medium memberikan keuntungan, yaitu tidak diperlukannya *pre drying* bagi biomassa yang akan diproses. Apabila dibandingkan dengan torefaksi kering, HTC beroperasi dengan temperatur yang lebih rendah. Parameter proses HTC ada lima, yaitu temperatur, tekanan, pH, *residence time*, dan *solid load*. Temperatur memainkan peran dalam memulai hidrolisis pada lignoselulosa. Semakin tinggi temperatur maka semakin banyak fraksi karbon yang tertinggal. Namun demikian, temperatur yang tinggi dengan *residence time* yang lama dapat berpotensi mereduksi karbon yang terdapat di biomassa. Sehingga perlu dicari *reaction of severity* untuk menentukan temperatur dan *residence time* optimumnya.

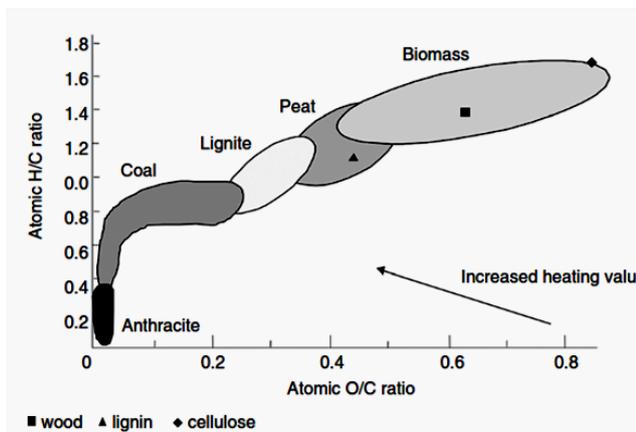
Penggunaan katalis asam dapat mempercepat laju reaksi kimia pada proses hidrotermal. Namun demikian, telah diketahui bahwa selulosa dapat terdekomposisi oleh *lactic acid* dan reaksi katalitik asam lain tanpa adanya tambahan katalis, karena air adalah solvent yang dapat bersifat asam atau basa [16]. Penggunaan katalis basa (NaOH) dan Ca(OH)<sub>2</sub> dapat meningkatkan produksi *lactic acid* [17]. Namun, penggunaan katalis basa jarang digunakan karena akan menghasilkan reaksi sampingan.

*Solid load* merupakan perbandingan volume air dan massa dari biomassa [18]. Untuk memaksimalkan produksi bahan bakar padat, *solid load* harus dikondisikan setinggi mungkin, sehingga waktu pemanasan yang dibutuhkan untuk mencapai polimerisasi dapat

diminimalisasi dan reaksi akan berjalan lebih cepat dibandingkan dengan *solid load* yang rendah.

Proses hidrotermal memiliki kemampuan untuk melarutkan *exchangeable anorganic ions* ke air sehingga jumlah abu bahan bakar padat dapat diminimalisasi. Zat terbang terdiri dari *condensable* atau *non condensable vapor* atau *gases* ketika biomassa dikondisikan pada temperatur tertentu. Melalui proses hidrolisis dan dekarboksilasi pada hidrotermal, kuantitas zat terbang dapat direduksi [19].

Bahan bakar padat biomassa yang telah melalui *pretreatment* hidrotermal secara umum akan mengalami penurunan perbandingan H/C dan O/C pada Gambar 3. Hal ini terjadi karena fraksi karbon pada bahan bakar padat biomassa meningkat seiring dengan berjalannya proses hidrotermal. Penurunan H/C terjadi karena pada proses hidrotermal dimana atom hidrogen dapat terlepas dari rantai hidrokarbon dalam bentuk  $H_2$  (gas) dan akan bereaksi dengan oksigen membentuk air. Penurunan O/C dapat disebabkan oleh pembentukan  $CO_2$  pada reaksi dekarboksilasi, pembentukan CO pada reaksi dekarbonisasi, serta terbentuknya  $O_2$  yang berikatan dengan  $H_2$  pada proses pembentukan  $H_2O$  (cair).



Gambar 3. Kurva Van Krevelen [20]

## Proses HTC Untuk Pengolahan Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat

Sampah kota atau *municipal solid waste* (MSW) telah menjadi masalah besar di banyak negara berkembang dan bahkan negara-negara maju karena keterbatasan usia pakai atau kapasitas fasilitas tempat pembuangan akhir (TPA), termasuk di Indonesia. Teknologi pengolahan limbah saat ini dituntut untuk mampu menghilangkan limbah yang memenuhi tiga kondisi: ramah lingkungan, ekonomis, dan kapasitas pemrosesan yang tinggi. Salah satu alternatif solusi adalah mengolah dan memanfaatkan MSW sebagai bahan bakar padat alternatif untuk industri atau rumah tangga.

### 1.1 Potensi Sampah Kota

Saat ini sampah kota atau *municipal waste* merupakan permasalahan pelik yang dihadapi oleh hampir semua kota-kota besar di Indonesia, termasuk kota Bandung. Saat ini sampah dikolektif dari masyarakat yang selanjutnya diangkut dan disimpan ke tempat pembuangan sementara (TPS) yang kemudian akan dibuang di tempat pembuangan akhir (TPA) yang jaraknya cukup jauh dan umumnya diolah dalam bentuk *landfill*. Kementerian Lingkungan Hidup melaporkan bahwa pada tahun 2008 Indonesia menghasilkan 38,5 juta ton sampah dan meningkat 2-4 % pertahunnya [21]. Penelitian mengenai pemanfaatan sampah kota sebagai bahan bakar padat alternatif telah banyak dilakukan, namun peningkatan publikasi terkait HTC secara signifikan terbit sekitar tahun 2000an. Limbah yang umum dimanfaatkan adalah berbagai sampah padat kota dan residu dari pengolahan limbah cair yaitu *sewage sludge*.

Khalil (2005) melakukan penelitian mengenai efektifitas proses HT untuk mendekomposisi kandungan organik dari *sewage sludge* dengan dua scenario,

pertama dilakukan pada temperatur tinggi tanpa oksidan dan kedua adalah pada temperatur yang lebih rendah dengan menggunakan oksidan (*hydrogen peroxide*). Komponen organik dari *sewage sludge* sebagian besar berupa padatan dan hanya sebagian kecil larut dalam cairan. Kandungan organik dari lumpur sekunder terurai ketika mengalami perlakuan hidrotermal subkritis. Oksidasi terjadi ketika hidrogen peroksida ditambahkan, dan laju reaksi meningkat seiring dengan suhu [22]

Pengolahan *sewage sludge* menggunakan teknologi HT akan menghasilkan cukup banyak residu cair sehingga Yoshikawa (2007) mencoba untuk menginvestigasi tentang potensi pemanfaat limbah residu dari proses HT menjadi pupuk cair. Hasil penelitian menunjukkan bahwa residu cair dari proses HT untuk *sewage sludge* cukup memiliki nutrisi utama (N, P dan K) serta nutrisi mikro (Cu, Zn, Mo, etc) sehingga memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pupuk cair [23].

Yoshikawa (2008) memperkenalkan konsep pemanfaatan teknologi HT untuk memproses MSW dan *sewage sludge* menjadi bahan bakar padat dan pupuk cair. Menurutnya, proses HT dapat secara efektif mengkonversi MSW menjadi bahan bakar alternatif seperti *pulverized coal* yang dapat dimanfaatkan sebagai *co-firing* pada boiler di pabrik semen yang secara tidak langsung akan mengurangi emisi CO<sub>2</sub>. Selain itu, proses HT juga dapat menghasilkan pupuk cair bebas logam berat yang berasal dari pengolahan *sewage sludge* [24]. Kim (2008) juga melakukan penelitian yang bertujuan untuk menyelidiki isi padatan dari *excess sludge* yang diproses menggunakan reaksi HT dan mengevaluasi kemungkinan untuk mendaur ulangnya menjadi produk yang stabil dan tidak berbahaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Jumlah kandungan karbon produk yang dihasilkan adalah bervariasi dan tergantung pada komposisi material

aslinya. Selain itu, proses mineralisasi dan solubilisasi tidak berbeda jauh pada suhu yang lebih tinggi dari 250 °C (4 MPa) [25].

## 1.2 Karakteristik Produk HTC dari *Municipal Solid Waste* (MSW)

Kendala terbesar pemanfaatan MSW sebagai bahan bakar adalah yang kadar air yang sangat tinggi dan bentuk tidak teratur. Untuk mengatasi masalah ini, Yoshikawa (2009) mengembangkan teknologi inovatif hidrotermal (HT) sebagai alternatif pemrosesannya. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa produk hasil proses HT memiliki nilai kalor hampir sama dengan batu bara kelas rendah sub-bituminous, terjadi penurunan kandungan klorin dan merekomendasikan untuk penggunaan produk sebagai campuran pada proses *co-firing* sebesar 20% [26].

Prawisudha (2011) juga melakukan penelitian menggunakan reaktor berukuran 3 m<sup>3</sup> yang dapat mengolah sampah sebanyak 1 ton per *batch* yang menunjukkan bahwa Proses HT ini menghasilkan produk *pulp* yang seragam dengan peningkatan kepadatan mencapai empat kali lipat atau 75% pengurangan volume sampah dengan nilai kalor rata-rata produk adalah 18 MJ/kg. Perhitungan keseimbangan energi menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk proses HT adalah sepersembilan dari kandungan energi dalam produk. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan menggunakan HT adalah sistem yang dapat beroperasi secara mandiri yang tidak membutuhkan energi tambahan dari luar. Selain itu, proses HT juga membutuhkan energi yang lebih rendah daripada proses pengolahan limbah konvensional [27].

Berge (2011) mengevaluasi implikasi lingkungan yang terkait dengan proses HTC pada MSW (termasuk gas dan produk cair), untuk mengevaluasi fisik, kimia, dan sifat termal dari *hydrochar* yang diproduksi

dan untuk menentukan energetika karbonisasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 49-75% dari karbon dipertahankan dalam *char*, sedangkan 20-37% pada cairan dan 2-11% pada fasa gas. Komposisi dari *hydrochar* yang dihasilkan terjadi proses dehidrasi dan dekarboksilasi selama karbonisasi yang menghasilkan struktur aromatik. Proses energetika menunjukkan bahwa proses karbonisasinya adalah eksotermis [28].

Hasil dari percobaan yang dilakukan Berge (2012) juga menunjukkan bahwa produk HTC yang berasal dari limbah padat sebagian besar karbon (45-75%) masih terkandung dalam *hydrochar*. Produksi gas selama percobaan batch menunjukkan bahwa periode reaksi yang lebih lama mungkin dibutuhkan untuk memaksimalkan produksi produk dengan densitas energi yang lebih baik. Ketika mempertimbangkan penggunaan *hydrochar* sebagai bahan bakar padat, akan lebih banyak energi dapat dihasilkan dalam bentuk *hydrochar* dibandingkan dengan energi gas yang dihasilkan dari degradasi limbah selama penimbunan dan pencernaan anaerobik, dan dari pembakaran langsung (insinerasi) limbah makanan tersebut. Emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan *hydrochar* sebagai sumber bahan bakar lebih kecil daripada proses pembakaran secara langsung (insinerasi), hal ini menunjukkan bahwa HTC dapat berfungsi sebagai alternatif untuk proses pembakaran yang ramah lingkungan [29].

Lu (2011) menjelaskan penerapan teknologi hidrotermal pada berbagai jenis MSW untuk menghasilkan bahan bakar padat untuk *co-firing* dengan batu bara menggunakan tiga jenis *surrogated MSW* yaitu MSW Jepang, MSW India dan MSW Cina yang berbeda dalam komposisi dan karakteristik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses HT mampu untuk mengkonversi MSW menjadi produk berukuran seragam dengan kadar air rendah, bentuk teratur dan *bulk density*

tinggi. Selama HT, reaksi hidrolisis menyebabkan pengurangan *volatile matter* dan peningkatan karbon tetap. HHV dari tiga jenis MSW setelah HT meningkat 1,01-1,41 kali (kandungan energi per massa) dan 6,39-9,00 kali (kandungan energi per volume) [30].

Balasubramanian (2014) terlebih dahulu melakukan proses hidrolisis enzimatis terhadap limbah makanan sebelum perlakuan hidrotermal untuk menghasilkan *hydrochar* dan *bio-oil*. Pra-pengolahan limbah makanan dengan rasio enzim dari 1: 2: 1 (karbohidrase : protease : lipase) terbukti efektif dalam mengkonversi limbah makanan untuk kedua produk (*hydrochar* dan *bio-oil*) dengan hasil yang lebih baik. Kandungan karbon dan nilai kalori berkisar antara 43,7-65,4% dan 17,4-26,9 MJ/kg untuk *hydrochars* yang diperoleh melalui pra-perlakuan enzim, sedangkan *hydrochar* yang diperoleh tanpa pra-perlakuan bervariasi dari 38,2-53,5% dan 15,0-21,7 MJ/kg. Pra-perawatan enzimatis juga mendukung pembentukan *bio-oil* dengan hasil tertinggi diperoleh pada 350 °C [31]

### 1.3 Aplikasi Co-Firing

Muthuraman (2010) melakukan eksperimen untuk mengetahui karakteristik *co-firing* dari produk MSW yang diproses HT yang dicampur dengan batubara India, Indonesia, dan Australia menggunakan analisis TGA. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pencampuran dengan batubara selalu meningkatkan sifat *devolatization* batubara. Pirolisis dan proses *devolatization* memberikan sedikit atau tidak ada informasi tentang pengaruh terhadap karakteristik pembakaran. Penambahan produk HT sangat cocok untuk diaplikasikan pada batubara kualitas rendah seperti batubara India dengan abu yang tinggi. Selain itu, temperatur penyalaan (*ignition temperature*) menunjukkan karakteristik diantara sifat

batubara dan MSW yang dapat diprediksi dari komposisi campurannya [32]. MSW yang diproses Hidrotermal memiliki sifat bahan bakar yang baik setara dengan kayu. Campuran produk HT dapat meningkatkan reaktivitas arang dengan reaktivitas rendah sehingga akan mengurangi karbon yang tidak terbakar. Hasil ini menunjukkan kelayakan menggunakan MSW yang telah diproses HT sebagai bahan bakar campuran dengan batubara. Meskipun campuran dapat meningkatkan tingkat pembakaran batubara, namun tidak menunjukkan penurunan suhu pengapian. Oleh karena itu hubungan terbalik antara konten materi *volatile matter* dan suhu pengapian berlaku hanya untuk bahan bakar murni dan tidak berlaku untuk bahan bakar dicampur [33].

Jin (2013) melakukan percobaan *co-firing* antara MSW yang telah diproses HT dan batu bara pada sebuah *bubbling fluidized bed* (BFB). Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa emisi CO dan NO terendah ditemukan pada campuran 20% dan 30%. Selain itu, emisi SO<sub>2</sub> menurun dengan penambahan campuran MSW dan emisi HCl berada di bawah 5 ppm. Selain itu, karbon yang tidak terbakar (UC) menurun pada pencampuran di bawah 30% dan suhu rendah. Hasil penelitian menunjukkan kemungkinan untuk dapat mengaplikasikan campuran 30% MSW yang telah diproses HT pada pembakaran didalam tungku batubara jenis BFB [34].

#### 1.4 Reduksi Klorin

Prawisudha (2012) melakukan studi eksperimental konversi sampah kota (MSW) di Jepang ke bahan bakar padat dengan menggunakan perlakuan hidrotermal. Sistem pengolahan mampu memproses hingga 1 ton MSW per batch. Setelah diproses, MSW dari berbagai ukuran dan bentuk berubah menjadi *slump* yang mudah dikeringkan menjadi produk tepung dengan kelembaban 10% dan nilai

kalor rata-rata 20 MJ/kg (*dry basis*), yang sama dengan yang kelas rendah batubara subbituminous. Karena MSW digunakan dalam percobaan yang terdapat sejumlah besar plastik, maka penting untuk mengurangi kandungan klorin yang dikenal dapat menyebabkan penyumbatan, korosi, dan pembentukan gas *dioxin* dalam tungku. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa klorin di MSW yang dihasilkan dari kontainer poli vinil klorida adalah sekitar 10.000 ppm (*dry basis*) dan dikurangi menjadi sekitar 2000 ppm (*dry basis*) karena transformasi klorin anorganik yang larut dalam air selama proses hidrotermal. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan hidrotermal adalah cara yang memungkinkan untuk mengolah MSW menjadi bahan bakar padat alternatif dengan kandungan klorin rendah [35].

Hwang (2012) melakukan eksperimen proses HT menggunakan air subkritis (HTSW) pada 234 °C (kondisi LT) dan 295 °C (kondisi HT) untuk menghasilkan bahan bakar padat dari limbah padat perkotaan (MSW) yang menggunakan kertas, makanan anjing (DF), sumpit kayu, dan plastik film campuran dan lembar polietilen, polipropilen, dan polistirena disiapkan sebagai model komponen MSW, di mana *polyvinylchloride* (PVC) bubuk dan natrium klorida digunakan untuk mensimulasikan sumber Cl. Hasil penelitian menunjukkan lebih dari 75% dari karbon dalam kertas, DF, dan kayu itu berbentuk sebagai *char* di bawah kedua kondisi LT dan HT, sementara plastik tidak terdekomposisi dalam kondisi LT ataupun kondisi HT. Nilai kalor (HHV) dari yang diperoleh arang adalah 13,886-27,544 kJ/kg dan sebanding dengan *brown coal* dan *lignit*. Atom Cl yang ditambahkan melalui bubuk PVC dan natrium klorida sebagian masih tetap berada dalam *char* setelah HTSW, namun sebagian besar Cl berasal dari PVC ditemukan larut menjadi senyawa Cl selama HTSW pada kondisi HT

dan bisa dihilangkan dengan proses pencucian [36].

Indrawan (2012) melakukan sebuah studi eksperimental pada mengkonversi limbah padat (MSW) menjadi bahan bakar padat bebas klorin menggunakan kombinasi pengolahan hidrotermal dan pencucian menggunakan air. Setelah produk diekstraksi dari reaktor, percobaan air-cuci kemudian dilakukan untuk mendapatkan produk bebas klorin dengan kurang dari 3000 ppm total konten klorin. Serangkaian analisis termogravimetri juga dilakukan untuk membandingkan karakteristik pembakaran produk sebelum dan setelah proses pencucian. Proses pencucian produk hidrotermal akan meningkatkan karakteristik pembakaran produk untuk *co-firing* karena kandungan klorin dan abu yang rendah, serta profil kehilangan massa yang lebih baik selama pembakaran dibandingkan dengan produk tanpa pencucian. Proses pencucian memerlukan sejumlah besar air; jika mempertimbangkan proses terbentuknya emisi yang berasal dari klorin, maka proses pencucian setelah perlakuan hidrotermal diperlukan hanya jika suhu tungku lebih dari 800 °C [37]

Poerschmann (2014) melakukan penelitian dengan poli vinil klorida (PVC) menjadi objek proses HTC dalam air subkritis bertemperatur 180-260 °C. Dehidroklorinasi meningkat dengan meningkatnya suhu reaksi. Hasil penelitian memberikan bukti kuat bahwa karbonisasi hidrotermal terhadap limbah organik yang berasal dari rumah tangga, yang diantaranya adalah plastik yang mengandung residu PVC, dapat menghasilkan produk ramah lingkungan dan mencegah pembentukan produk organik beracun. Proses hidrotermal dari limbah yang mengandung PVC sebaiknya dilakukan diatas suhu 235 °C untuk memungkinkan pelepasan klorin organiknya [38].

## Pembahasan dan Diskusi

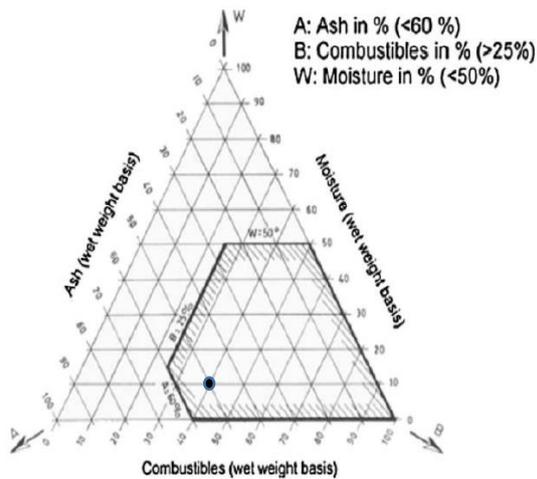
Berdasarkan studi literatur dapat menggambarkan perkembangan teknologi dan penelitian terkait proses pemanfaatan sampah kota (MSW) menjadi bahan bakar padat. Pada penelitian awal diketahui bahwa MSW berpotensi untuk dikonversi melalui proses HTC menjadi bahan bakar padat alternatif, sedangkan *sewage sludge* memiliki potensi untuk dijadikan pupuk yang bebas logam berat. Apabila MSW dapat dijamin bebas dari zat-zat beracun maka memiliki cukup potensi juga untuk diproses menjadi bahan bakar padat dan pupuk cair organik.

Proses HT terbukti dapat mereduksi volume MSW hingga 75% dengan kandungan karbon sebagian besar dalam bentuk padatan (*char*) yaitu sebesar 49-75% dan 20-37% pada cairan, sedangkan kandungan karbon yang terkandung dalam fasa gas hanya 2-11%. Selain itu, proses HT juga terbukti dapat meningkatkan densitas energi sebesar 1,01-1,41 kali (kandungan energi per massa) atau 6,39-9,00 kali (kandungan energi per volume), dengan nilai kalor produk sebesar 15-21,7 MJ/kg yang hampir sama dengan nilai kalor batubara sub-bituminous.

Energi yang dibutuhkan untuk proses HTC adalah sepersembilan dari kandungan energi yang terkandung didalam produk yang dihasilkan dan proses karbonisasi pada HTC adalah eksotermik sehingga secara teoritis, ditinjau dari aspek energi, sistem HTC dapat berjalan secara mandiri dan masih dapat menghasilkan surplus energi. Energi yang terkandung dalam padatan hasil HTC juga lebih besar dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam gas hasil penimbunan dan proses anaerobik, juga lebih besar dari pembakaran langsung (*insinerasi*) khususnya untuk biomassa dengan kadar air (*moisture*) yang tinggi.

Rangkaian penelitian yang mencoba untuk memanfaatkan bahan bakar padat hasil

proses HT untuk proses pembakaran yang dicampur dengan batubara menunjukkan bahwa percampuran akan meningkatkan sifat devolatization dan cocok untuk diterapkan untuk batubara dengan kadar abu yang tinggi. Selain itu, campuran 30% juga telah dicoba untuk diaplikasikan pada *bubbling fluidized bed* dan menunjukkan emisi CO, NO, SO<sub>2</sub> dan *unburnt carbon* yang lebih baik. Proses HT juga terbukti efektif untuk menurunkan kadar klorin pada produk yang dihasilkan, sehingga relatif lebih aman jika digunakan sebagai bahan bakar.



Gambar 4. Diagram Tanner untuk *waste combustion*

Hasil studi literatur juga memberikan informasi mengenai produk HTC antara lain yaitu kadar karbon sekitar 38,2 – 75 % dan kandungan air sekitar 10%. Jika digambarkan pada Diagram Tanner seperti diperlihatkan pada Gambar 4, dengan asumsi kadar karbon 40%, maka tampak bahwa produk padatan dari hasil HTC cukup memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai bahan bakar padat dengan kandungan abu atau *ash* sekitar 50%.

## Kesimpulan

Berbagai penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa produk bahan bakar padat yang dihasilkan memiliki nilai kalor hampir sama dengan batu bara kelas rendah sub-bituminous dan cukup baik untuk digunakan sebagai bahan bakar campuran untuk proses *co-firing* batubara dengan campuran hingga 30%. Selain itu, kandungan klorin yang terkandung didalam MSW pun telah terbukti dapat tereduksi secara efektif oleh proses HTC sehingga gas dioxin yang beracun dan korosif yang dihasilkan masih didalam batas yang diijinkan jika diaplikasikan sebagai bahan bakar. Hal ini menunjukkan bahwa proses HTC merupakan proses inovatif yang berpotensi efektif untuk diterapkan dalam menanggulangi permasalahan limbah sampah kota untuk dikonversi menjadi bahan bakar padat alternatif yang ramah lingkungan dan *renewable*.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian yang telah dilakukan umumnya masih sebatas skala laboratorium dan belum ditemukan dalam skala komersial, hanya beberapa penelitian saja yang telah dilakukan dalam skala pilot. Untuk itu perlu dilakukan studi komprehensif mengenai potensi penerapan teknologi untuk merubah MSW menjadi bahan bakar dalam skala komersial dengan mempertimbangkan aspek teknologi, energi dan ekonomi sehingga dapat diketahui kelayakan dan hambatan - hambatan untuk dapat diterapkan dalam skala komersial guna menanggulangi permasalahan sampah yang dialami oleh banyak kota besar, khususnya di Indonesia.

Penelitian HTC terkait MSW umumnya lebih difokuskan pada karakterisasi produk yang dihasilkan dan diasumsikan homogen, sedangkan mekanisme proses yang terjadi belum dijelaskan secara detil dan diketahui secara pasti, khususnya untuk *mixed-MSW*. Pada kenyataannya, MSW di Indonesia merupakan sampah campuran yang

sebagian besar terdiri dari sampah organik dan plastik yang memiliki karakteristik sangat berbeda. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui lebih jelas tentang mekanisme yang terjadi selama proses HTC khususnya untuk *mixed-MSW*.

## Daftar Pustaka

### Daftar Pustaka Bab 1

- [1] Koh MP, Hoi WK. Sustainable biomass production for energy in Malaysia. *Biomass Bioenergy* 2003;25:517–29.
- [2] Mahmoud A, Shuhaimi M, Abdel Samed M. A combined process integration and fuel switching strategy for emissions reduction in chemical process plants. *Energy* 2009;34:190–5.
- [3] Khan AA, Jonga WD, Jansens PJ, Spliethoff H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies. *Fuel Process Technology* 2009;90:21–50.
- [4] Saidur R, Abdelaziz EA, Demirbas A, Hossain MS, Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewables and Sustainable Energy Review* 2011;15:2262–2280
- [5] K. Byrappa and Masahiro Yoshimura, *Handbook of Hydrothermal Technology* (Norwich, New York: Noyes Publications, 2001), Chapter 2: History of Hydrothermal Technology.
- [6] Montano D, Pels JR, Fryda LE, Zwart RWR. Evaluation of torrefied bamboo for sustainable bioenergy production, 9th World Bamboo Congress (WBC), 10–15 April, Antwerp/Merksplas – Belgium, ECN. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2012/m12013.pdf>
- [7] A.D. Pasek, K.W. Gultom dan A. Suwono, Feasibility of recovering energy from MSW to generate electricity, *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 45, No. 3, pp. 241–256, 2013.
- [8] Acharya B, Dutta A, Minaret J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustainable Energy*

*Technologies and Assessments* 2015;12:26–37

### Daftar Pustaka Bab 2

- [9] Jin F, Wang Y, Zeng X, Shen Z, Yao G. Water Under High Temperature and Pressure Conditions and Its Application to Develop Green Technologies for Biomass Conversion. *Green Chemistry and Sustainable Technology*.2014:3–28
- [10] He C, Chen C, Giannis A, Yang Y, Wang J. Hydrothermal gasification of sewage sludge and model compounds for renewable hydrogen production : A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.2014.:39:1127–1142.
- [11] Hoekman SK, Broch A, Robbins C: Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass. *Energy Fuels* 2011, 25:1802–1810.
- [12] Acharya B, Dutta A, Minaret J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2015;12:26–37
- [13] Kruse A, Funke A, Titirici M. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*.2013:17:515–521.
- [14] Funke A, Ziegler F. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 4.2010:160–177.
- [15] M. T. Reza, J. Andert, B. Wirth, D. Busch, J. Pielert and J. G. Lynam, "Hydrothermal Carbonization of Biomass for Energy," *Appl. Bioenergy* 2014, vol. I, p. 11–29, 2014
- [16] F. Jin, Z. Zhou, T. Moriya, H. Kishida, H. Higashijima and H. Enomoto, "Controlling hydrothermal reaction pathways to improve acetic acid production from carbohydrate," *Environmental Science & Technology*, vol. 39(6), p. 1893–1902, 2005
- [17] X. Yan, F. Jin, K. Tohji, A. Kishita and H. Enomoto,

- "Hydrothermal conversion of carbohydrate biomass to lactic acid," *AIChE*, vol. 56(10), p. 2727–2733, 2010.
- [18] Z. Robbiani, "Hydrothermal carbonization of biowaste/fecal sludge," Dept. of Mechanical Engineering ETHZ, Master Thesis, Zurich, 2013.
- [19] D. Kim, K. Lee and K. Park, "Hydrothermal carbonization of naerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery," Elsevier, *Fuel* 130 (2014) 120-125, Korea, 2014.
- [20] P. Basu, Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Elsevier, 2013.
- Daftar Pustaka Bab 3
- [21] Indonesian Domestic Waste Statistics Year 2008 p. 5, State Ministry of Environment Indonesia.
- [22] Khalil WA, Shanableh A, Rigby P, and Kokot S, Selection of Hydrothermal Pre-Treatment Conditions of Waste Sludge destruction using multicriteria decision-making, *Journal of Environmental management* 75 pp. 53-64, 2005.
- [23] Jambaldorj G, Takahashi M, and Yoshikawa K, Liquid Fertilizer Production from Sewage Sludge by Hydrothermal Treatment, *Proceedings of International Simposium on EcoTopia Science*, pp 605-605, 2007.
- [24] Yoshikawa K, Hydrothermal Treatment of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge to Produce Solid Fuel and Liquid Fertilizer, *The Second International Energy 2030 Conference*, pp. 124-126, 2008.
- [25] Kim K, Fujie K, and Fujisawa T, Feasibility of Recycling Residual Solid from Hydrothermal Treatment of Excess Sludge, *Environ. Eng. Res. Vol. 13, No. 3*, pp. 112-118, 2008
- [26] Yoshikawa K, hydrothermal treatment of municipal solid waste to produce solid fuel, 7th International Energy Conversion Engineering Conference, 2009.
- [27] Prawisudha P and Novianti S, Municipal Solid Waste Treatment Using Hydrothermal Processto Produce a Renewable Energy Source, *Inovasi Vol 19 No 4*, pp.15-22, 2011.
- [28] Berge ND, Ro KS, Mao J, Flora JRV, Chappel MA and Bae S, Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams, *Environmental Science and Technology-American Chemical Society*, pp. 5696-5703, 2011.
- [29] Berge ND, Lu X and Jordan B, Thermal conversion of municipal solid waste via hydrothermal carbonization Comparison of carbonization products to products from current wastemanagement techniques, *Waste management* 32 pp. 1353-1365, 2012.
- [30] Liang Lu, Namioka T and Yoshikawa K, Effects of hydrothermal treatment on characteristics and combustion behaviors of municipal solid wastes, *Applied Energy* 88, pp. 3659-3664, 2011.
- [31] Balasubramanian R, Kaushik R, Pharseetti GK and Liu Z, Enzyme-assisted hydrothermal treatment of food waste for co-production of hydrochar and bio-oil, *Bioresource Technology* 168 pp. 267-274, 2014.
- [32] Muthuraman M, Namioka T and Yoshikawa K, Characteristics of co-combustion and kinetic study on hydrothermally treated municipal solid waste with different rank coals- A thermogravimetric analysis, *Applied Energy* 87, pp. 141-148, 2010.
- [33] Muthuraman M, Namioka T and Yoshikawa K, A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste, *Bioresource Technology* 101, pp. 2477-82, 2010.
- [34] Jin Y, Liang Lu, Ma X, Liu H, Chi Y and Yoshikawa K, Effects of blending hydrothermally treated municipal solid waste with coal on co-combustion characteristics in a lab-

- scale fluidized bed reactor, *Applied Energy* 102, pp. 563-570, 2013.
- [35] Prawisudha P, Namioka T and Yoshikawa K, Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment, *Applied Energy* 90, pp. 298-304, 2012.
- [36] Hwang IH, Aoyama H, Matsuto T, Nakagishi T and Matsuo T, Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water, *Waste Management* 32, pp. 410-416, 2012.
- [37] Indrawan B, Prawisudha P and Yoshikawa K, Chlorine-free solid fuel production from municipal solid waste by hydrothermal process, *Energies* ISSN 1996-1073, pp. 4446-4461, 2012.
- [38] Poerschmann J, Weiner B, Woszidlo S, Koehler R and Kopinke FD, Hydrothermal carbonization of poly(vinyl chloride), *Chemosphere* 119 pp. 682-689, 2015.