



**PEMANFAATAN ZEOLIT ALAM PADA PEMBAKARAN SERBUK
GERGAJI KAYU SENGON**

DISERTASI

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN
MINAT KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Doktor



Mokh. Hairul Bahri

NIM. 127060200111008

UNIVERSITAS BRAWIJAYA MALANG

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019



Daftar Isi

LEMBAR PENGESAHAN	i
Pernyataan Originalitas Proposal Penelitian Disertasi	iii
RINWYAT HIDUP	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
Ringkasan	vii
Summary	viii
Kata Pengantar	ix
Daftar Tabel	xii
Daftar Gambar	xiii
Daftar Lampiran	xiv
Daftar Simbol/ Singkatan	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Pembatasan Masalah	2
1.5 Tujuan Penelitian	3
1.6 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Peneliti – Peneliti Terdahulu	5
2.2 <i>Athiria Falcata</i> (AF)	8
2.2.1 Analisa Komposisi Struktur	8
2.2.2 Analisa Ultrawate	9
2.2.3 Analisa Proximate	10
2.3 Analisa Termal DSC-TGA	11
2.4 Analisa Unsur Kimia	11
2.5 Zeolit Alam	11
2.5.1 Komposisi Kimiawi Zeolit Alam	13
2.5.2 Sifat-Sifat Zeolit	14
Sifat Pertukaran Ion	14
Sifat Adsorpsi	14
Sifat Katalis	15
2.5.3 Morfologi dan Kristal Zeolit	15
2.6 Pembakaran Biomassa AF	16
Mekanisme Pembakaran Bahan Bakar Biomassa	17
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN	19
3.1 Kerangka Pikir	19
3.2 Hipotesa	23
3.3 Bagan Kerangka Konsep	24
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	25
4.1 Variabel Penelitian	25
4.2 Tempat dan Jenis Pengujian	26
4.3 Bahan Dan Alat	26
4.3.1 Bahan yang digunakan	26
4.3.2 Alat yang digunakan	27



4.4 Data Yang Diambil	29
4.5 Pengolahan data	30
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	31
5.1 Hasil	31
5.1.1 Komponen dan struktur kimia AF	31
5.1.2 Pengaruh NZ terhadap laju degradasi pembakaran AF	32
5.1.3 Efek NZ terhadap dekomposisi dan temperatur nyala AF	35
5.2 Pembahasan	42
5.2.1 Pengaruh NZ terhadap pembakaran AF	42
5.2.2 Pengaruh NZ pada komposisi kimia abu	45
5.2.3 Kapasitas Aliran Kalor Pembakaran Akibat Penambahan NZ	45
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	49
6.1 Kesimpulan	49
6.2 Saran	50



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Saat ini pemakaian energi fosil semakin meningkat padahal persediaan semakin hari semakin berkurang. Energi fosil yang ada di Indonesia seperti minyak bumi, batubara dan gas alam diperkirakan akan habis beberapa tahun lagi karena pemakaian yang terus menerus. Sumber energi fosil membutuhkan waktu jutaan tahun proses pembentukannya. Energi fosil seperti minyak bumi, batubara dan gas alam yang berasal dari hewan - hewan dan tumbuh - tumbuhan mati yang terpendam selama jutaan tahun. Selama waktu itu proses yang terjadi secara alami (fermentasi), sehingga ada gas yang dihasilkan yang disebut gas alam (Survey 1990).

Mengingat hal tersebut diatas maka pencarian energi alternatif selain energi fosil sedang dilakukan. Bioenergi menjadi salah satu alternatif dengan banyak ragam pilihannya, antara lain: *Municipal Solid Waste*, *Sewadge Sludge* dan Biomasa. Pemanfaatan biomasa sebagai sumber energi alternatif mulai dilaksanakan, karena sumber daya alam di Indonesia yang melimpah. Biomasa adalah sumber energi yang berkelanjutan karena ketersediaannya selalu ada di alam. Saat pohon di tebang tidak lama setelah itu akan di tanam lagi tanahnya dengan bibit pohon yang baru. Salah satu sumber biomasa yang melimpah itu adalah limbah dari usaha penggergajian kayu.

Pada perusahaan penggergajian kayu ada limbah biomasa yang dihasilkan berupa serbuk kayu (*sawdust*) dan sisa – sisa potongan kayu. Saat ini yang sedang diproduksi secara masal adalah kayu jenis Sengon, mulai industri kecil penggergajian sampai industri penggergajian skala menengah. Menurut laporan dari (Berita Daerah, 2012) hasil tanaman kayu sengon di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur, sebesar 750.000 m³ setiap tahun yang diperoleh dari luasan hutan rakyat sekitar 56.000 (ha). Hasil samping berupa serbuk gergaji kayu sengon akan semakin banyak, karena industri penggergajian kayu sedang tumbuh pesat. Ada beberapa cara pemanfaatan biomasa sebagai energi yaitu melalui pirolisis, gasifikasi dan pembakaran langsung. Dalam penelitian ini akan memanfaatkan serbuk gergaji kayu sengon dengan tambahan zeolit alam sebagai bahan bakar. Zeolit alam merupakan kristal anorganik padat dengan struktur aluminosilikat yang tersusun bersama antara AlO_4 dan SiO_4 secara tetrahedral. Salah satu fungsi dari Zeolit alam adalah sebagai



penukar ion dan mempunyai kemampuan sebagai katalis dalam reaksi kimia.

Pemanfaatan serbuk gergaji kayu menjadi penting jika dihubungkan dengan kebijakan pemerintah untuk mencari energi alternatif, menurut penelitian pembakaran langsung biomasa terjadi reaksi sebagai berikut : Pemanasan, Pengeringan Pirolisa (*Volitiles*, Uap) Reaksi awal pembakaran Pembakaran primer Pembakaran sekunder Abu residu (Demirbas, 2004).

Sehubungan dengan ada proses pirolisa pada pembakaran biomasa maka dalam penelitian ini akan mencoba biomasa (Serbuk Gergaji Kayu Sengon, AF) yang dicampur dengan Zeolit alam (NZ) untuk dianalisa karakteristik pembakarannya menggunakan teknik analisa termogravimetri

1.2 Identifikasi Masalah

Pengujian AF dengan analisa termogravimetri pada percobaan ini telah dapat mengetahui karakteristik pembakarannya. Penambahan NZ yang dilakukan untuk mengetahui kinetika pembakaran dan kandungan abu dari hasil pembakaran. Penggunaan *Thermogravimetric Analyzer* sebagai alat analisa uji karakteristik pembakaran sudah dilakukan oleh sejumlah peneliti (Zhaosheng, Xiaoqian, and Ao 2008; Magdziaz and Wilk 2013; Valverde 2013). Untuk analisa abu menggunakan SEM-EDAX seperti yang telah dilakukan oleh (Madhiyanon et al. 2012).

1.3 Rumusan Masalah

Sehubungan dari penjelasan latar belakang masalah diatas maka dapat dirumuskan permasalahan dari penelitian ini adalah mengkaji karakteristik pembakaran yang meliputi:

1. Dekomposisi termal
2. Degradasi termal
3. Laju reaksi pembakaran Serbuk Gergaji Kayu Sengon (AF) dengan tambahan Zeolit alam (NZ)
4. Karakteristik unsur abu hasil pembakaran.

1.4 Pembatasan Masalah

Kandungan biomasa yang kompleks seperti juga AF menjadikan pengujian ini membatasi penambahan NZ sebesar 0%, 15% dan 25% terhadap berat awal AF. Pembatasan ini dilakukan berdasar pada penelitian dari (Shadangi and Mohanty 2014; Jae et al. 2014).



1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh tambahan zeolit alam pada pembakaran serbuk gergaji kayu Sengon terhadap perilaku pembakaran dan karakteristik temperatur seperti temperatur dekomposisi awal, temperatur puncak, temperatur nyala dan temperatur akhir serta memperoleh informasi karakteristik fisik dan kimia sampel sebelum dan sesudah pembakaran.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat praktis penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pembuatan pelet biomasa dengan tambahan zeolit terkait dengan seberapa besar perbandingan campurannya.

Manfaat teoritis penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penelitian biomasa lebih lanjut khususnya serbuk gergaji kayu Sengon.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Peneliti – Peneliti Terdahulu

Para peneliti terdahulu telah melakukan percobaan pirolisa biomasa yang dicampur dengan Zeolit. Percobaan pirolisa yang di gunakan oleh para peneliti di variasi dengan berbagai macam perlakuan untuk memaksimalkan hasil diantaranya adalah oleh (F. Miccioa, 2009) yang melakukan penelitian menggunakan 4 macam katalis yaitu *inert quartzite, olivine, dolomite* dan *Ni-Al* dengan biomasa *Spruce Wood pellet* hasilnya katalis Ni-Al mampu meningkatkan produksi H_2 28,7%. Sementara peneliti (Liu Haibo, 2010) melakukan penelitian kemampuan penambahan zat aditif Fe 8% pada katalis Ni/PG konsentrasi 6 % dalam gasifikasi sekam padi yang hasilnya mampu meningkatkan konversi tar dan H_2 98,2%. Peneliti dari Jepang (Keiichirou Mitsuoka, 2011) melakukan penelitian pada gasifikasi *Japanese cypress (hinoki) char* dengan penambahan *potassium (K)* dan *calcium (Ca)* yang hasilnya Ca dapat mempercepat proses gasifikasi daripada K. Lain lagi yang dilakukan oleh (Kung-Yuh Chiang, 2012) yang melakukan penelitian efek katalis berbasis CaO terhadap produksi gas sintesis yang hasilnya menyatakan bahwa pada temperatur gasifikasi antara 600 – 900 °C mampu meningkatkan rasio H_2/CO_2 dari 0,23 – 0,72 pada penambahan katalis sampai 20 %. Selain itu ada (Yanqing Yu, 2013) yang memanfaatkan Zeolit tipe ZSM5 pada CFP (*Catalytic Fast Pirolisys*) untuk tongkol jagung yang di perlakuan penjamuran dan di pirolisa pada temperatur reaktor 650 °C. Hasilnya pirolisa tanpa Zeolit meningkatkan hasil gas sedangkan pirolisa dengan Zeolit lebih mampu mengkonversi hasil gas menjadi aromatik hidrokarbon dari 10,03 wt% menjadi 11,49 wt% dan sebaliknya hasil arang menjadi lebih rendah, dari 14,29 wt% ke 11,93 wt%. CFP juga dilakukan oleh (Sung Ho Jin, 2014) pada *Geod ae-Uk sae 1* (sejenis rumput gajah) dengan tambahan Zeolit tipe HZSM-5 ($Si/Al_2 = 23$), H ($Si/Al_2 = 25$) dan HY ($Si/Al_2 = 30$) dengan temperatur reaktor 900 °C yang hasilnya katalis mampu merubah secara signifikan komposisi minyak nabati sebagai akibat deoksigenasi aktif dan reaksi – reaksi peretakan (*cracking reactions*) dan memungkinkan keluarnya CO_2 , CO dan $C_1 - C_4$ hidrokarbon pada fase gas. Lain halnya, yang dilakukan oleh (Kazuhiro Uemura, 2015) yang juga melakukan CFP pada biomasa lignoselulosa dengan reaktor silinder 2 tingkat temperatur 550 °C dan hasilnya katalis HZSM-5 mampu meningkatkan lebih dari 30% karbon pada selulosa menjadi aromatik hidrokarbon.



Peneliti (Kantarelis, Yang, dan Blasiak 2014) menggunakan HZSM5 untuk pirolisis pinus dan cemara yang hasilnya dijelaskan bahwa fungsi asam katalis mampu meningkatkan konsentrasi aromatik. Sedangkan (Horne and Williams 1995) (Horne and Williams 1996) melakukan pirolisis campuran serpihan berbagai macam kayu dengan menambahkan ZSM5 secara diskontinu dan tambahan *stainless steel ball bearing* untuk mengefektifkan pirolisis. *Stainless steel ball bearing* ditambahkan untuk menghambat uap pirolisis dan memperluas permukaan panas saat *thermal cracking*. Hasilnya persentase gas H₂, CH₄, C₂H₄, C₃H₆ meningkat dengan tambahan zeolit. Studi (Azeez *et al.* 2011) Melakukan pirolisis *beech wood (Fagus sylvatica L.)* dengan tambahan 5 jenis zeolit (SN-27, MSN-15, MSM-15, H-ZSM-5-28 and H-ZSM-5-80) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap lignoselulosa. Hasilnya katalis asam zeolit meningkatkan kuantitas *fulfural* dan *levoglucosan*. H-ZSM-5 dengan konten alumina lebih rendah terbukti paling efektif dalam meningkatkan *furfural* karena difusi molekul yang lebih baik melalui pori-pori. Secara keseluruhan penelitian tersebut diatas menunjukkan bahwa katalis asam mampu meningkatkan hasil akhir degradasi termal lignoselulosa. Percobaan yang membakar biomasa dengan campuran katalis dilakukan oleh (Abbasi-Atibeh dan Yozgatligil 2014) dengan membakar *Turkish lignite* dengan tambahan katalis Potasium Karbonat, Kalsium Hidroksida dan Besi Oksida hasilnya laju reaksi devolatisasi meningkat dengan urutan Fe > K > Ca material murninya. Sementara itu jika pirolisa dengan tambahan zeolit bisa menghasilkan gas dan minyak lebih banyak maka jika dibakar langsung mestinya karakteristik pembakaran akan lebih bagus. Hal ini yang mendasari penulis untuk melakukan riset pembakaran biomasa yang dicampur zeolit.

Analisa pembakaran biomasa dengan teknik thermogravimetric penting dilakukan untuk mengetahui konversi termokimia pembakaran. Campuran serbuk gergaji pinus dan batubara dibakar menggunakan *thermogravimetric analyzer* dilakukan oleh (Gil *et al.* 2010). Hasilnya pada awal dekomposisi adalah serbuk gergaji pinus lalu diikuti batubara dan arang pinus yang terbakar bersamaan waktunya. Studi oleh (Kai *et al.* 2011) mencampur selulosa, xylan dan lignin dengan batubara lalu di bakar menggunakan *thermogravimetric analyzer*. Hasilnya lignoselulosa mampu meningkatkan laju devolatisasi, menurunkan temperatur nyala dan mempercepat pembakaran arang. Penelitian (B. Shen dan Qinlei 2006) yang melakukan pembakaran *Municipal Solid Waste (MSW)* dengan tambahan katalis (KOH, NaOH, KCl, CuCl₂/KCl, CaCl₂/CaO) dengan *thermogravimetric analyzer* yang hasilnya katalis mampu



menurunkan temperatur nyala. Pada temperatur 200 °C (MSW) dengan tambahan katalis KOH, CuCl₂/KCl dan CaCl₂/CaO sudah tergradasi 5% sementara yang lain masih dibawahnya.

Penelitian analisa termogravimetri dengan membakar jerami padi dan jerami gandum dengan tambahan katalis (NiO, CuO, CaO dan MgO) dilakukan oleh (Ã, Xiaoqian, dan Ao 2008). Hasilnya katalis MgO pada temperature 200 °C sudah membakar lebih dari 5% jerami padi sedangkan yang lain masih dibawahnya. Artinya katalis mampu meningkatkan laju volatisasi biomasa. Hal yang sama dilakukan oleh (Zhang, Duan, dan Huang 2015) menginvestigasi pembakaran termogravimetri kulit kacang, sekam padi dan jerami gandum dengan tambahan senyawa kalsium organik. Hasilnya indeks perfoma pembakaran kulit kacang dan jerami gandum meningkat sedangkan sekam padi menurun. Hal ini disebabkan kandungan C dan H dari sekam padi terendah dibandingkan yang lain sehingga persentase katalis harus lebih banyak.

(Konsomboon *et al.* 2011) melakukan penelitian tentang efek kaolin pada pembakaran tandan kosong kelapa sawit. untuk mengurangi terbentuknya K₂SO₄ pada sisa abu. Hasilnya penambahan kaolin yang dicampur mampu mengikat unsur K. Biomasa dari kayu menurut (Saidur *et al.* 2011) termasuk kategori biomasa dengan kandungan unsur abu K dan Ca tinggi. Kandungan unsur abu seperti hal ini sangat dihindari jika digunakan sebagai bahan bakar ketel uap karena akan menyebabkan *fouling* yang akan mempercepat terbentuknya karat (Riedl *et al.* 1999). Biomasa mengandung logam logam yang terpenting adalah potassium, pada pembakaran akan keluar membentuk senyawa anorganik yang akan terkondensasi dan menumpuk di ruang bakar menjadi terak yang akan menyebabkan kotor dan akhirnya korosi (A . Williams, 2012). Data ilmiah tentang penggunaan katalis alami sangat terbatas sehingga dibutuhkan lebih banyak penelitian. Penelitian ini menjelaskan pembakaran serbuk gergaji AF dengan penambahan Natural Zeolite (NZ) menggunakan analisa termogravimetri. Pemahaman yang bagus tentang dekomposisi biomasa selama proses konversi termokimia sangat penting untuk efisiensi proses dan teknologi pemanfaatannya (D. K. Shen *et al.* 2009).

Zeolit alam banyak tersedia di Indonesia sehingga mudah di dapat dan harganya murah. Tambang zeolit ditemukan di daerah jawa bagian selatan mulai dari Malang, Pacitan - Jawa Timur dan Cikembar, Cipatujah, Bayah - Jawa Barat. Sejauh ini zeolit alam hanya diterapkan untuk dehidrasi etanol dan transesterifikasi minyak sawit mentah (Kusuma *et al.* 2013; Hernawan *et al.* 2015). Studi tentang peningkatan pembakaran biomassa menggunakan zeolit



alam belum ditemukan. Oleh karena itu penelitian ini memberikan diskusi tentang zeolit alam yang diterapkan untuk meningkatkan karakteristik pembakaran biomassa. Karena zeolit alam banyak mengandung mineral, maka pembahasan ditekankan pada peran mineral dalam NZ terhadap proses dekomposisi hemiselulosa secara molekular.

Referensi – referensi tersebut diatas menjadi dasar untuk melakukan percobaan yang akan dilakukan pada tulisan ini.

2.2 *Albizia Falcataria* (AF)

Pohon Sengon (*Albizia Falcataria*,AF) termasuk tanaman golongan *Leguminosae*. AF merupakan jenis pohon yang cepat tumbuh yang segera membentuk kanopi dengan bunganya berwarna putih. Pada kondisi ideal pohon ini akan mencapai tinggi 15 m dalam jangka waktu 3 tahun. Masyarakat desa sering menggunakan tanaman ini sebagai pohon peneduh dan juga kayu bakar. Produktivitasnya yang cepat membuat pohon ini bernilai tinggi secara ekonomis. Menurut laporan dari (Kawahara, T., Kanazawa, Y., dan Sakura 1981) produksi tahunan mencapai 20 MT/tahun, karena itu pohon AF telah dikembangkan menjadi tanaman perkebunan. AF merupakan tanaman hutan dari spesies pohon yang tumbuh cepat di Indonesia dengan umur panen 4-5 tahun (menurut data yang tidak dipublikasikan oleh *Japan International Corporation Agency* dalam (Chiba 1998)). Kayu dari pohon ini digunakan sebagai bahan bangunan, industri mebel, kerajinan tangan, palet ringan, kayu bakar serta pulp dan kertas. Dalam penelitian ini akan menggunakan serbuk hasil penggergajian kayu pohon AF sebagai bahan bakar.

Biomasa seperti juga AF merupakan sumber energi terbarukan yang tersedia secara berkesinambungan. Agar dapat digunakan dengan optimal diperlukan identifikasi, karakterisasi kimiawi dan komposisinya. Pengujian AF yang akan dilakukan untuk mendapat data – data tersebut meliputi: analisa komposisi struktur, analisa *proximate* dan analisa *ultimate*.

2.2.1 Analisa Komposisi Struktur

AF seperti biomasa pada umumnya kandungannya adalah Lignoselulosa yang terdiri dari unit – unit pembentuk utamanya yaitu Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin. Terbentuknya Lignoselulosa karena fotosintesis dan adanya unsur hara didalam tanah. Selain itu terdapat lipid, protein, gula dan zat tepung terdapat dalam jumlah yang sangat kecil serta juga ada kandungan komponen bahan inorganik material dan sedikit air. Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin menyatu dengan kuat dan secara kimiawi membentuk ikatan nonkovenan.

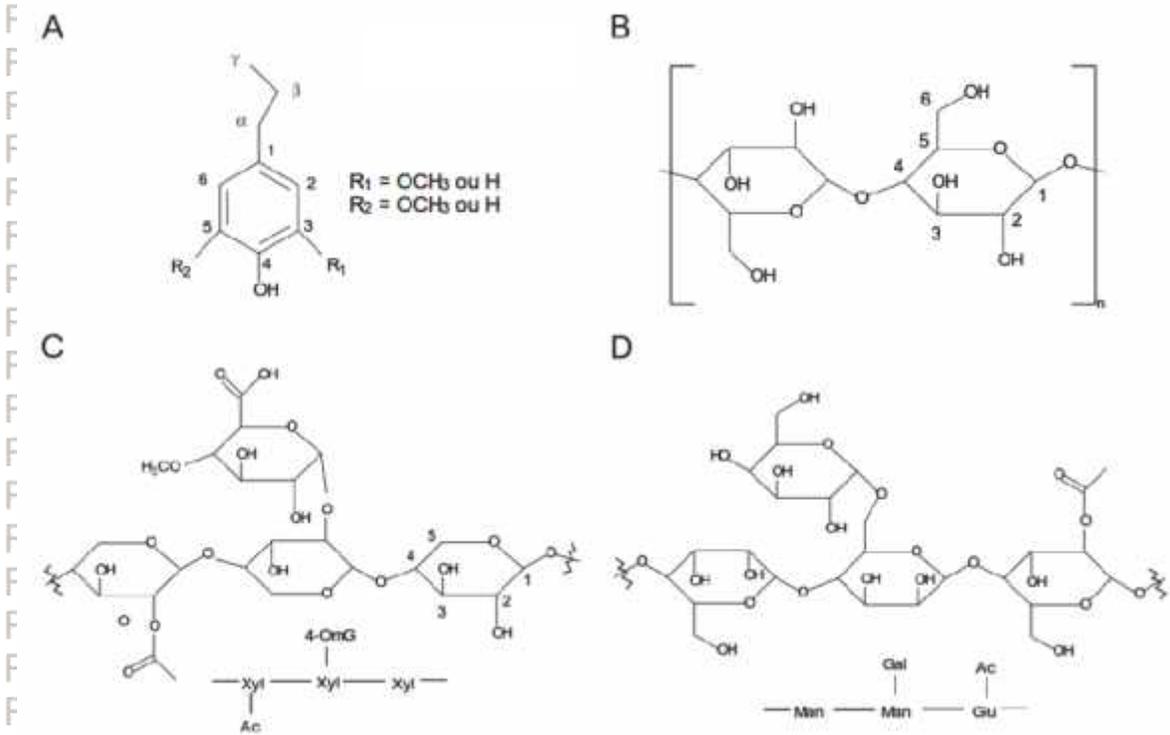


Selulosa merupakan komponen terbanyak pada Lignoselulosa selanjutnya adalah Hemiselulosa dan Lignin. Selulosa merupakan komponen utama dinding sel yang terbentuk dari Polimer glukosa yang tidak bercabang dengan rumus kimia $(C_6H_{10}O_5)_n$. Karena hanya glukosa maka itu selulosa saling menumpuk/terikat menjadi ikatan serat yang kuat. Selulosa memiliki rantai – rantai linier (1 – 4) dan molekul – molekul panjang dan tipis ini akan membentuk ikatan Hidrogen berupa jaringan mikro saraf. Hemiselulosa terbentuk secara makromolekul dari berbagai macam unsur gula sederhana, berbeda dengan selulosa yang hanya satu macam jenis gula. Jenis – jenis gula yang membentuk Hemiselulosa diantaranya adalah monomer gula yang berkarbon 5 (C5) dan 6 (C) misalnya Xylan, glukosa, arabinose, galaktose. Selain itu ada monomer gula dalam jumlah yang sedikit seperti mannopyranose, glucopyranose, *Xylopyranose* dan *Galactopyranose*. Sedangkan Lignin adalah polimer aromatik hasil dari turunan awal *phenilpropanoid*.

Analisa struktural biomasa penting digunakan dalam proses pengembangan untuk memproduksi zat kimia dan studi fenomena pembakaran. Analisa struktur bisa digunakan untuk menentukan secara optimasi nilai kalor biomasa. (Abbasi T, 2010; 14)

2.2.2 Analisa *Ultimate*

Analisa *ultimate* merupakan faktor penting dalam mempelajari sifat – sifat bahan bakar biomasa. Data yang akan didapatkan dengan analisa ini adalah persentase kandungan C, H, O, N dan S yang berguna untuk estimasi nilai kalor. Selain itu juga persentase kandungan N, S dan Cl dapat digunakan untuk studi dampak lingkungan dari penggunaan biomasa. Hasil analisa *ultimate* dari AF ditampilkan dalam bentuk tabel yang ada di bab V.



Gambar 2.1 Komposisi struktur Lignoselulosa, (A) Unit penyusun Lignin; (B) Unit penyusun Selulosa; (C) sebagian structure Xylan; (D) sebagian structure Glucomannan; (Xylopyranose, 4-OmG; 4-O-methylglucuronic, Man: mannopyranose, Glu:glucopyranose, Gal: galactopyranose, Ac: acetyl). Sumber (Collard and Blin 2014)

2.2.3 Analisa Proximate

Penentuan nilai *proximate* pada bahan bakar padat khususnya biomasa perlu dilakukan untuk mendapatkan data kandungan kadar karbon terikat (*fixed carbon*) yang terdapat pada bahan bakar padat setelah terjadinya proses devolatisasi. Kadar zat menguap (*volatile matter*) didapatkan setelah proses pengeringan tanpa ada oksigen. Kadar abu (*ash*) yang diperoleh adalah hasil akhir dari proses analisa ini. Kandungan abu ini berupa residu yang terdiri dari senyawa-senyawa yang tidak terbakar misalnya Silika Oksida (SiO) dan Kalsium Oksida (CaO) Kadar air (*moisture*) adalah kandungan air dalam bahan bakar padat. Jumlah nilai proximate adalah 100 % yang terdiri dari:

$$\text{Proximate (100\%)} = \text{VM} + \text{FC} + \text{M} + \text{Ash} \tag{2.1}$$

Keterangan: VM adalah *Volatile matter* (%)

FC adalah *Fixed Carbon* (%)

M adalah *Moisture* (%)



Ash adalah abu (%)

Kadar Karbon terikat dan kadar zat menguap mempengaruhi besar nilai kalor pada beberapa jenis biomasa. Kandungan kadar abu yang tinggi di bahan bakar biomasa akan menyulitkan pada proses awal pembakaran.

2.3 Analisa Termal DSC-TGA

DSC secara luas digunakan mengetahui gejala yang terjadi jika ada perubahan temperatur pada suatu bahan. Gejala tersebut bisa terjadi secara fisika misalnya proses : adsorpsi, kristalisasi dan perubahan struktur kristal. Secara kimia gejala yang terjadi misalnya berupa proses: oksidasi, reaksi penguraian dan reaksi transisi benda padat. Gejala – gejala fisika dan kimia tersebut diatas terjadi secara eksotermis dan endotermis.

TGA digunakan untuk mengukur perubahan massa sebagai akibat terjadinya perubahan temperatur. Informasi grafik yang bisa disimpulkan dari pengukuran kehilangan massa ini adalah : perubahan – perubahan komposisi bahan, kestabilan termal bahan dan parameter – parameter kinetik pada reaksi kimia bahan

Gejala – gejala yang menyebabkan terjadinya kehilangan massa terjadi secara fisika misalnya : adsorpsi gas, desorpsi gas dan fase – fase transisi : Penguapan, Sublimasi.

Sedangkan gejala – gejala yang terjadi secara kimia adalah : dekomposisi, reaksi – reaksi penguraian, reaksi – reaksi gas dan *Chemisorption* (Adsorpsi karena proses kimia).

Menurut (A.Y. Liang, 2008) pada pembakaran biomasa pada DSC –TGA dapat terdeteksi terjadi tiga tahapan proses, yaitu:

1. Menguapnya kandungan air (*moisture content*) pada awal pemanasan sampai 150 °C
2. Terbakarnya zat yang mudah menguap (*the pyrolytic volatile matter*) antara 150 °C – 400 °C.
3. Terbakarnya karbon tetap (*fixed carbon*) antara 400 °C – 600 °C

2.4 Analisa Unsur Kimia

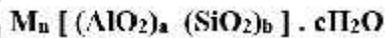
Pengujian kandungan unsur kimia pada serbuk gergaji kayu Sengon dan Zeolit alam dilakukan untuk identifikasi unsur kimia sebelum dan sesudah pembakaran yang hasilnya dapat digunakan untuk identifikasi perubahan senyawa yang terjadi (Barneto *et al.* 2009). Untuk mengetahui unsur dan morfologi serbuk gergaji kayu Sengon dan Zeolit alam menggunakan alat uji SEM/EDX.



2.5. Zeolit Alam

Zeolit alam yang ada di Indonesia dapat diperoleh di beberapa lokasi yang tersebar luas. Lokasi penambangan Zeolit alam antara lain terdapat di kabupaten Malang propinsi Jawa Timur, kabupaten Sukabumi dan Tasikmalaya propinsi Jawa Barat dan kabupaten Lebak propinsi Banten. Zeolit alam yang banyak ditemukan di Indonesia ini perlu dimanfaatkan secara maksimal. Berbagai usaha percobaan dan penggunaan sumber daya mineral berupa Zeolit alam perlu terus dilakukan agar dapat berdampak nyata untuk ekonomi masyarakat.

Zeolit alam adalah mineral dengan kandungan aluminosilikat yang berbentuk kristal tetrahedral. Kristal tetrahedral ini membentuk rangka (*framework*) tiga dimensi, sehingga mempunyai rongga dan saluran. Ikatan O antara Si dan Al diseimbangkan oleh ion-ion logam seperti Na, K, Mg dan Ca. Rumus kimia zeolit secara umum adalah:



M adalah kation logam atau hidrogen dengan valensi n yang akan memenuhi pertukaran kation pada rangka zeolit. AlO_2 dan SiO_2 unit – unit utama untuk mengikat Oksigen yang membentuk struktur tetrahedral AlO_4 dan SiO_4 sehingga membentuk blok bangunan sel unit zeolit. Karena Silikon mempunyai +4 dan Aluminium +3 maka ada kekurangan kation yang membuat senyawa tidak seimbang, sehingga kation logam atau Hidrogen yang akan memenuhi kekurangan itu.

Umumnya Zeolit alam dimanfaatkan sebagai adsorben, penukar ion, katalis. Sebagai katalis Zeolit alam akan melepas ion logam saat dipanaskan akibatnya ion tersebut akan mempengaruhi reaksi pemecahan senyawa daripada material yang direaksikan (reaktan) sehingga proses reaksi akan berlangsung lebih cepat menghasilkan produk. Zeolit alam yang digunakan pada proses katalisis akan melepaskan ion logam Alkali dan alkali tanah sehingga terjadi reaksi kimia dipermukaan saluran – saluran antara kristal tetrahedral tersebut.

Zeolit alam merupakan katalis yang efektif digunakan pada proses pemecahan, isomerisasi, dan pembentukan alkil pada hidrokarbon. Hal ini berdasarkan pada tiga sifatnya, yaitu:

1. Membran molekuler, karena rongga porinya yang sangat kecil maka dapat menyaring molekul yang berukuran mikro sehingga mampu memilah – milah reaktan, hasil sementara dan produk akhir yang ikut dalam proses katalitik.



2. Pusat – pusat asam, adanya pusat – pusat asam pada zeolit dapat membantu menjadi media yang lebih reaktif untuk proses katalitik.

3. Perbandingan Si/Al, semakin tinggi perbandingan Si/Al mengindikasikan penyebab keasamannya tinggi. Pada setiap jenis zeolit alam mempunyai perbandingan Si/Al yang tidak sama.

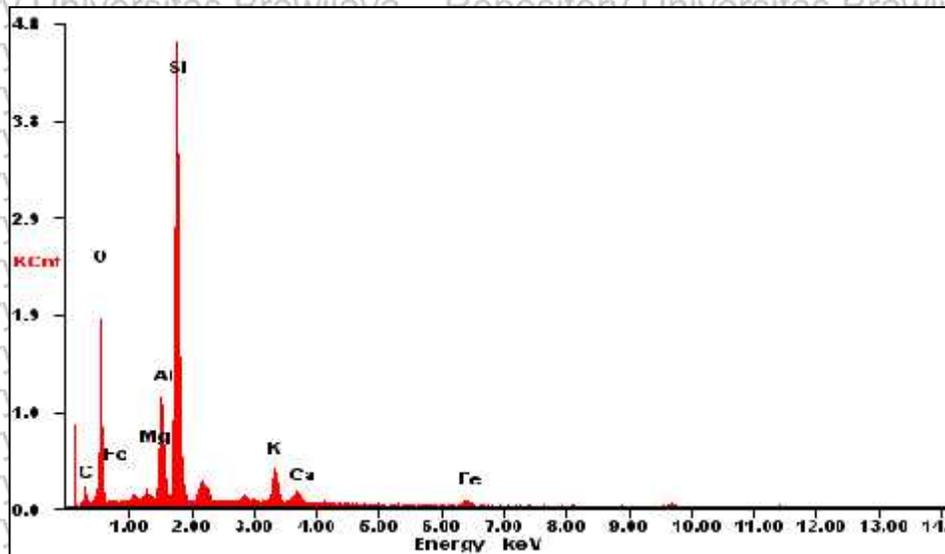
2.5.1. Komposisi Kimiawi Zeolit Alam

Zeolit alam yang ditambang secara tradisional masih memiliki tingkat keteraturan atom – atom pembentuknya rendah, sehingga pori – porinya berukuran tidak seragam, selain itu kemampuan katalitiknya rendah, dan banyak mengandung pengotor. Zeolit alam yang diperoleh dari tambang perlu lebih dahulu untuk dibersihkan dan diaktivasi sebelum dapat digunakan.

Aktivasi yang biasa dilakukan adalah dengan cara fisika atau kimia. Untuk cara aktivasi fisika dengan memperkecil ukuran butir dan membakar sampai temperatur 300 °C.

Katalisis dalam konteks ini digunakan terutama untuk memecahkan senyawa dengan berat molekul lebih tinggi menjadi lebih ringan dan lebih banyak gas produk yang bernilai komersial.

Hasil spektrum analisis Zeolit alam menggunakan alat uji SEM/EDX diperlihatkan pada gambar 2.2. Sedangkan komposisi kimiawi kandungan Zeolit alam berupa Alumina (Al_2O_3) dan Silika (SiO_2) sebagai komponen utama pembentuk rangka (*framework*) tetrahedral terdeteksi sebesar 6,53 % untuk alumina dan 27,81 % untuk silika (Tabel 2.1). Perbandingan Si/Al yang dimiliki oleh zeolit alam ini adalah sebesar 4,258 yang berarti kerapatan atom Al dan Si pembentuk struktur kerangka kristal Zeolit alam yang digunakan tergolong sedang.





Gambar 2.2 Hasil uji SEM-EDX spektrum Zeolit Alam yang digunakan.

(Sumber : Pengujian dilakukan oleh penulis sendiri)

Zeolit alam yang digunakan dalam penelitian ini perbandingan Si/Al =4,258. Dari hasil uji XRD (lampiran 1) terdeteksi ada atom Na, Mg, K dan Ca sebagai *counterbalancing ion* sehingga Zeolit alam ini termasuk kategori tipe *Clinotholite* dengan persentase kristalinitas 44,1%.

Unsur	Wt%
C	14.4
O	44.36
Mg	0.82
Al	6.53
Si	27.81
K	3.44
Ca	1.16
Fe	1.49

Tabel 2.1 Hasil Uji SEM-EDX

(Sumber : Pengujian dilakukan oleh penulis sendiri)

2.5.2 Sifat-Sifat Zeolit

Sifat Pertukaran Ion

Salah satu parameter untuk menentukan kualitas Zeolit adalah kemampuannya untuk bertukar ion. Istilahnya Kemampuan Tukar Kation (*Cation Exchange*). KTK didefinisikan dengan kemampuan ion logam yang dapat diserap secara maksimum oleh 1 gram Zeolit alam saat kondisi dalam kesetimbangan. Jumlah ion Al dalam Zeolit menentukan besar kecilnya nilai KTK.

Sifat Adsorpsi

Struktur kerangka Zeolit alam yang padat dan berongga mempunyai kemampuan untuk menyerap zat lain. Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi Zeolit alam harus diaktivasi



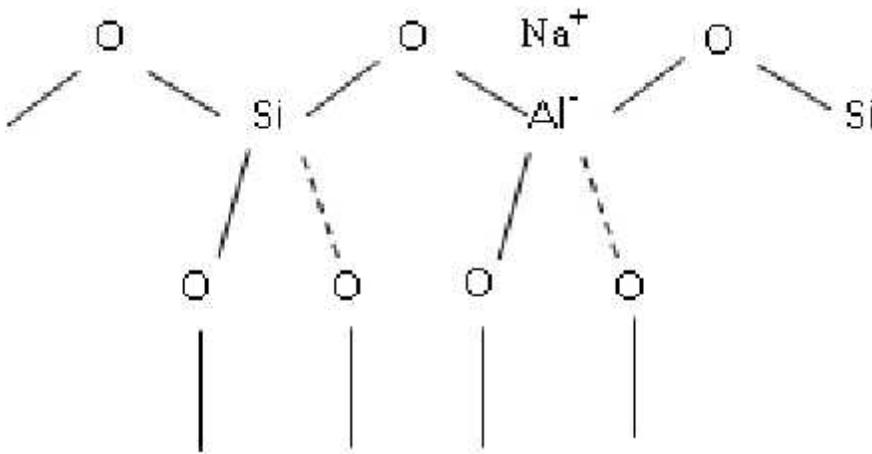
dengan pemanasan. Pemanasan berfungsi untuk menghilangkan kandungan air pada Zeolit alam agar rongga menjadi lebih besar sehingga luas permukaan menjadi lebih tinggi. Luas permukaan dapat juga ditingkatkan dengan memperkecil ukuran partikel Zeolit alam sehingga kemampuan adsorpsinya semakin meningkat.

Sifat Katalis

Sifat katalis yang ada pada Zeolit alam dikarenakan adanya pusat – pusat asam yang akan berubah jika dipanaskan. Kemampuan katalitik ini akan meningkatkan laju reaksi kimia tetapi pada akhir proses akan kembali ke dalam bentuk semula. Pada akhir reaksi Zeolit alam tidak tergabung dengan senyawa produk. Menurut (Augustine 1996) katalis mampu mempengaruhi faktor-faktor kinetik sebuah proses dalam hal ini pembakaran. Sehingga mampu mempercepat laju reaksi pembakaran, degradasi termal dan dekomposisi termal.

Zeolit alam berbentuk padatan yang mempunyai pusat – pusat asam. Saat dipanaskan pusat asam ini akan berubah dari asam Lewis menjadi 2 asam Bronsted (lihat gambar 2.5), pada temperatur 500 °C ion logam alkali dan alkali tanah (Na, Mg, K dan Ca) akan terlepas dan digantikan oleh ion H⁺. Perubahan asam Lewis menjadi asam Bronsted sampai melepaskan ion logam alkali dan alkali tanah akan mempengaruhi proses reaksi sehingga Zeolit alam bersifat katalitik.

Selain daripada itu kemampuan katalisis dari Zeolit alam juga dipengaruhi oleh perbandingan Si/Al serta kandungan dan unsur *ion counterbalancing* yang terkandung didalamnya.

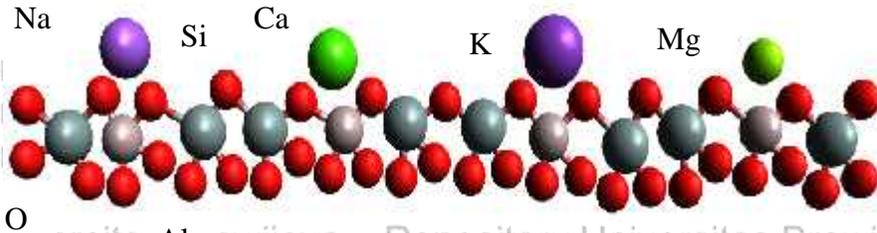


Gambar 2.3 Struktur kerangka zeolit



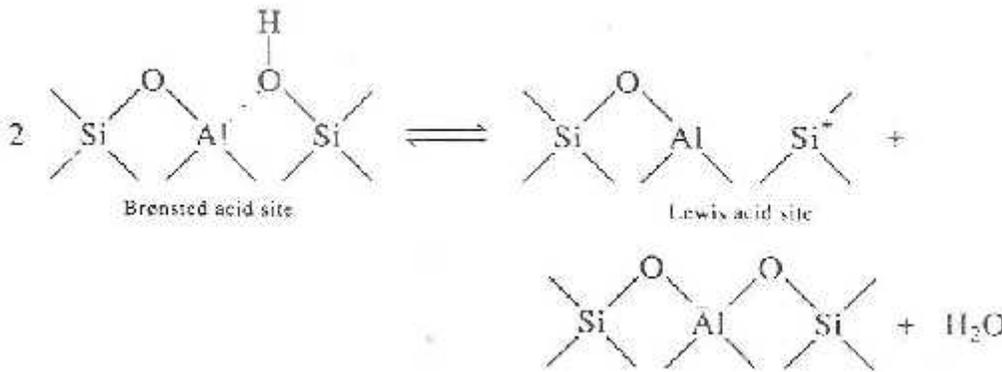
2.5.3 Morfologi dan Kristal Zeolit

Menurut (Hay, 1966) Zeolit alam terbentuk oleh senyawa aluminosilikat yang terkristalisasi akibat dehidrasi dan mengandung ion logam alkali dan alkali tanah sebagai penyeimbang. Pada setiap unit tetrahedral ada Oksigen yang menghubungkan (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Struktur sederhana NZ

Ketika NZ dipanaskan pada temperatur tinggi maka kandungan logam atau hidrogen akan terlepas sebagai ion penyeimbang kation dan terbentuk ion Al^{3+} tak jenuh yang merupakan asam Lewis yang kuat. Formasi sisi asam Lewis digambarkan secara skematis seperti dibawah ini:



Gambar 2.5 satu asam Lewis terbentuk dari 2 asam Bronsted (sumber :Gates, Bruce C.1992)

2.6 Pembakaran Biomassa AF

Biomassa AF adalah sumber energi terbarukan yang berasal dari tumbuhan. Siklus hidup tumbuh yang pendek sekitar 5 -7 tahun untuk pohon Sengon membuatnya dimanfaatkan untuk bisnis yang akan mengakibatkan limbah semakin menumpuk. Pada industri yang berbahan baku dari kayu sekitar 60% - 70% saja yang dapat menjadi produk, sisanya 30% - 40% menjadi limbah yang berupa serpihan kayu dan serbuk gergaji. Secara umum tumbuhan mengandung



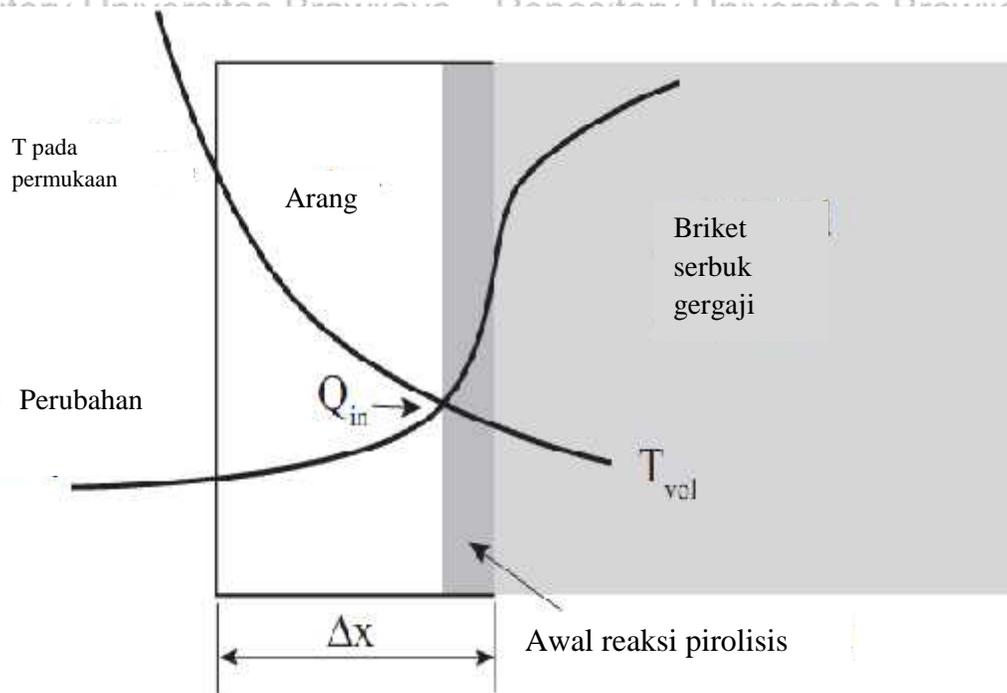
Karbon, Hidrogen dan Oksigen, menurut (Abbas T, 2004) kandungan serbuk gergaji adalah Karbon 46,9%, Hidrogen 5,2%, Nitrogen 0,1%, Sulfur 0,04% dan Oksigen 37,8%

Pada pembakaran biomasa juga menghasilkan potasium yang akan menimbulkan kerak pada komponen penukar panas di ketel uap. Proses terjadinya kerak ini disebabkan oleh kondensasi karena penurunan temperatur yang drastis (Hansen LA, 2000).

• Mekanisme Pembakaran Bahan Bakar Biomasa

Pembakaran biomasa termasuk proses yang kompleks, karena meliputi dua fenomena yaitu fasa gas dan fasa padat. Mekanisme pembakarannya melalui tahapan – tahapan sebagai berikut (A. Williams, 2012):

1. Pemanasan awal
2. Pengeringan
3. Devolatisasi yang menghasilkan arang dan *volatile matter* (gas dan tar)
4. Terbakarnya *volatile matter*
5. Terbakarnya arang



Gambar 2.6 Mekanisme Pembakaran Bahan Bakar Padat
(Sumber : Chaney, 2010)

Untuk mengetahui pengaruh penggunaan katalis NZ pada pembakaran serbuk gergaji



AF digunakan rumus *The Conversion Degree of Combustion* (CDC) yang dapat digunakan untuk menghitung suhu di sekitar serbuk kayu (Zhaosheng, Xiaoqian, dan Ao 2009) (Gai *et al.* 2013).

Hasil perhitungan dapat digunakan sebagai perbandingan efek pembakaran AF dengan dan tanpa penambahan zeolit alam pada saat 5% setelah temperatur nyala. CDC didefinisikan sebagai

$$\text{CDC} = \alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_{oc}} \quad (2.2)$$

Di mana m adalah massa saat ini, m_0 adalah massa awal sampel, m_{oc} adalah massa akhir sampel dan digambarkan sebagai *Conversion Degree of Combustible*.

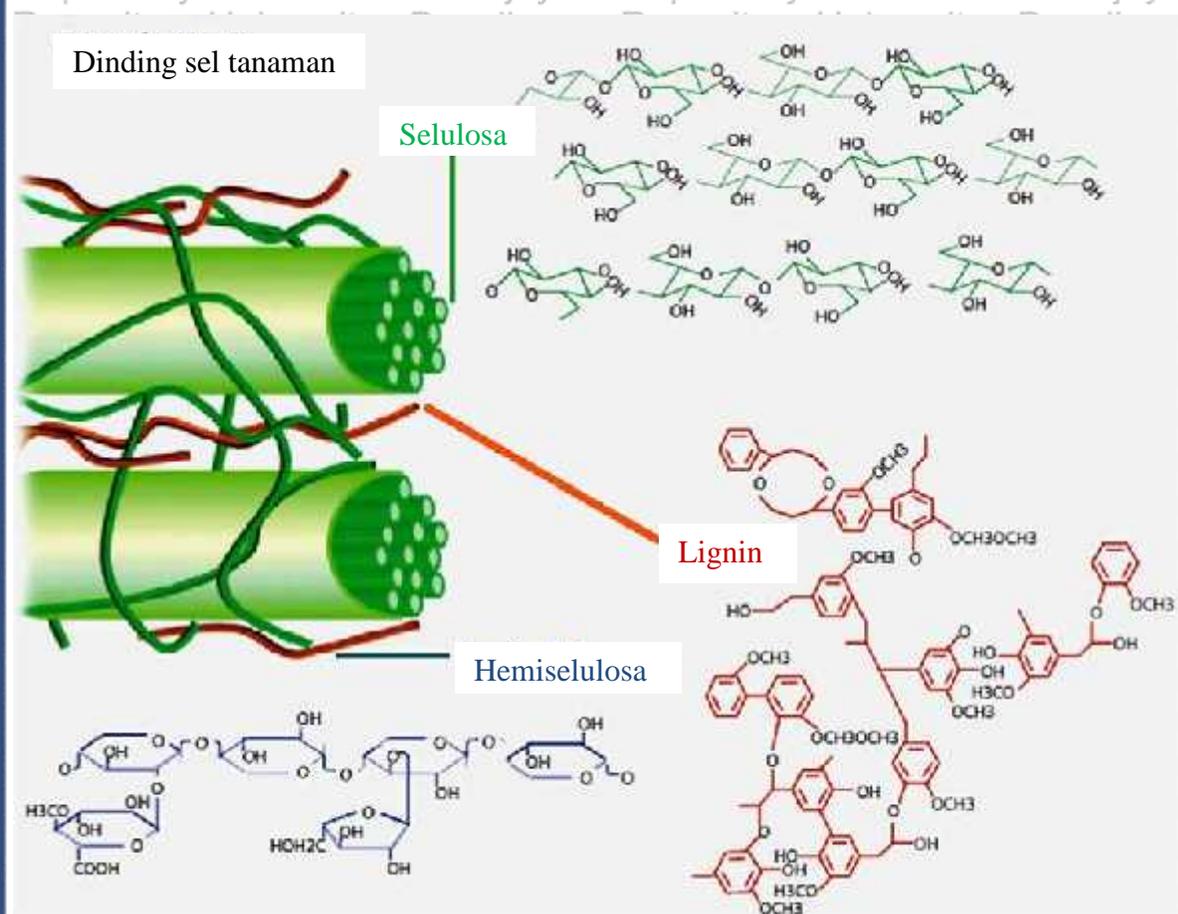


BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Pikir

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan mineral katalis akan meningkatkan hasil H₂ tetapi belum ada yang menggunakan mineral zeolit alam. Proses pembakaran bahan bakar padat biomasa merupakan serangkaian kejadian yang diawali oleh pemanasan untuk mengeluarkan gas yang terkandung. Pada saat gas terlepas dan bertemu dengan oksigen serta ada temperatur yang memicunya (*flashpoint*) maka terjadilah pembakaran. Penelitian ini akan menggunakan zeolit alam yang dicampur dengan serbuk gergaji kayu sengon yang di analisa perubahan berat dan temperaturnya dengan menggunakan STA dari mulai temperatur ruang sampai pada temperatur 900°C.

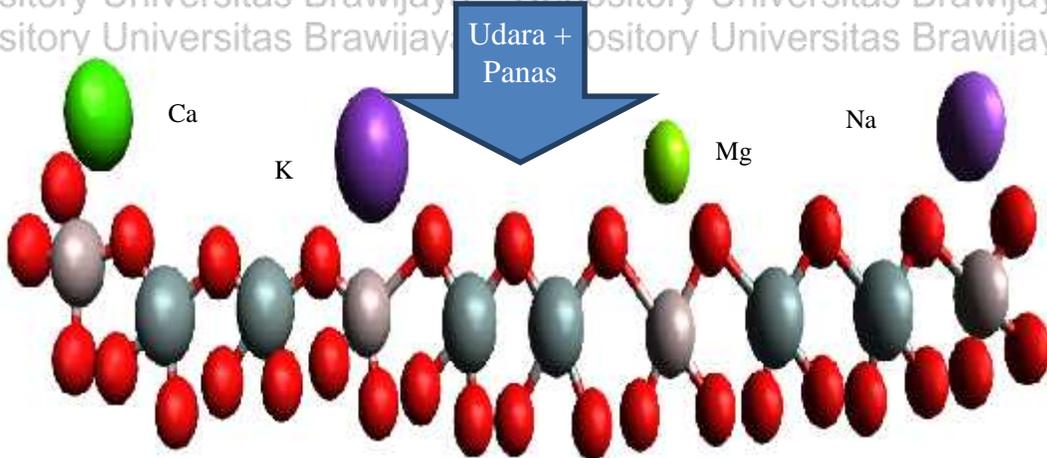


Gambar 3.1. Komponen dan struktur pembentuk biomasa.

Sumber (Möller and Schröder 2013)

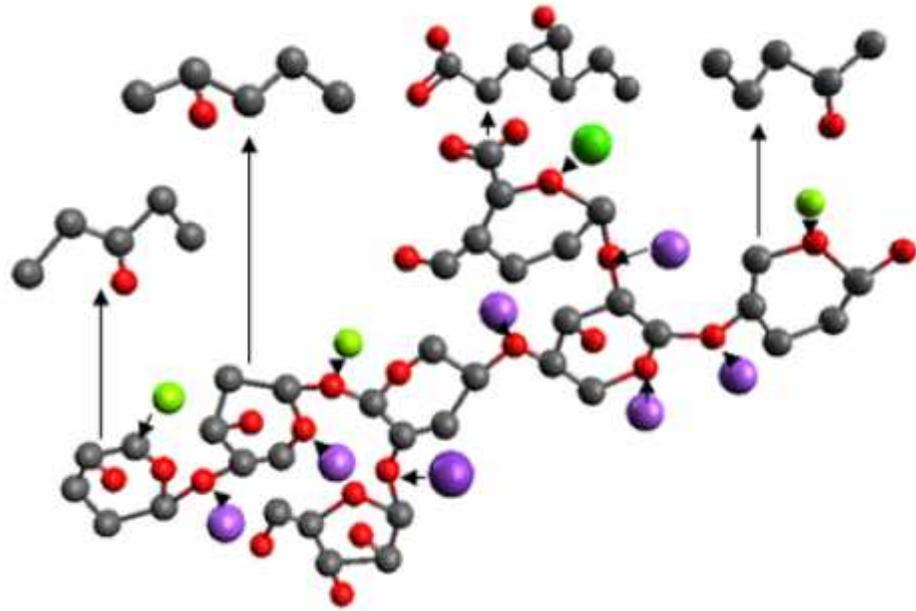
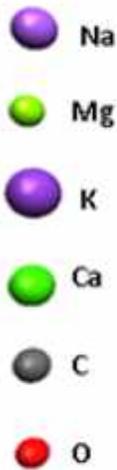


Pada gambar 3.1 struktur komponen biomasa dalam penelitian ini yang digunakan adalah AF yang mudah terurai adalah hemiselulosa karena strukturnya bercabang sehingga ikatan rantainya lebih mudah terputus menjadi senyawa yang lebih pendek. Secara teoritis kemungkinan yang terjadi pada hemiselulosa di ilustrasikan seperti pada gambar 3.2.



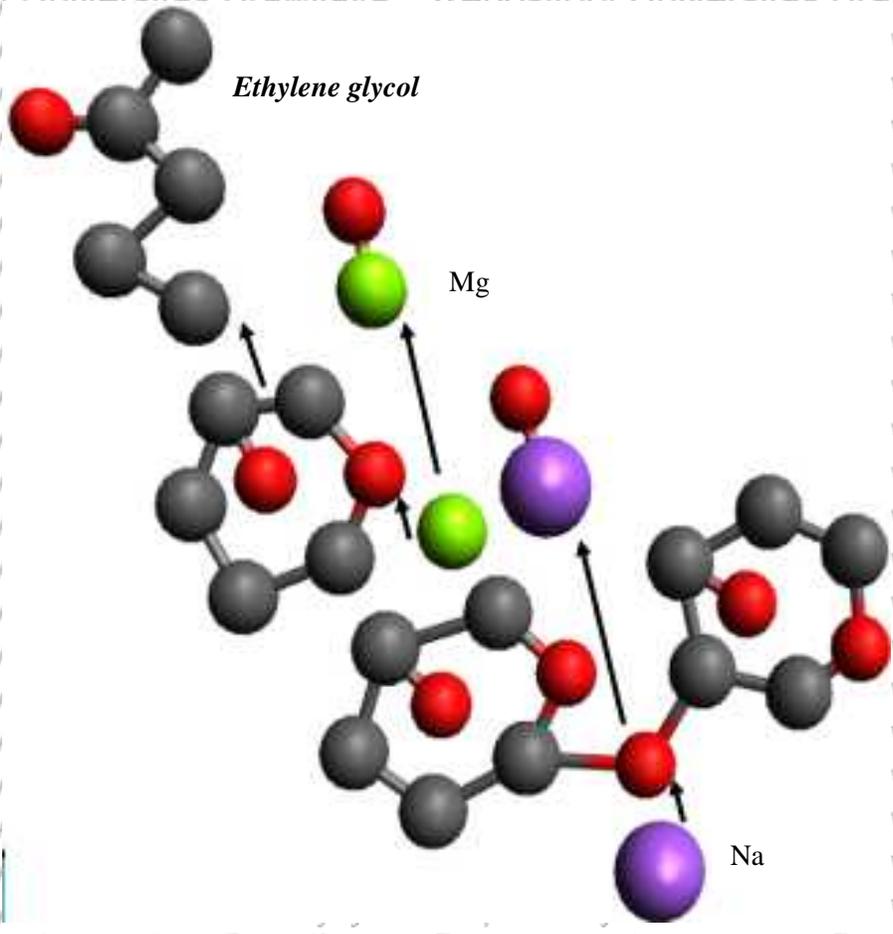
Gambar 3.2 Ilustrasi struktur NZ sederhana yang dipanasi dan dialiri udara

Pada gambar 3.2 di ilustrasikan sebuah unit NZ yang dipanasi dengan laju pemanasan dan laju udara yang telah di tentukan. Akibat dari proses ini maka molekul atom alkali dan alkali tanah akan terlepas dan akan tergantikan oleh molekul atom H. Molekul atom alkali dan alkali tanah akan mempengaruhi ikatan $C - O - C$ pada Hemiselulosa. Selanjutnya pada gambar 3.3 yang diilustrasikan terjadi pemutusan monomer – monomer Xylan, yang merupakan unit pembentuk Hemiselulosa terbesar.



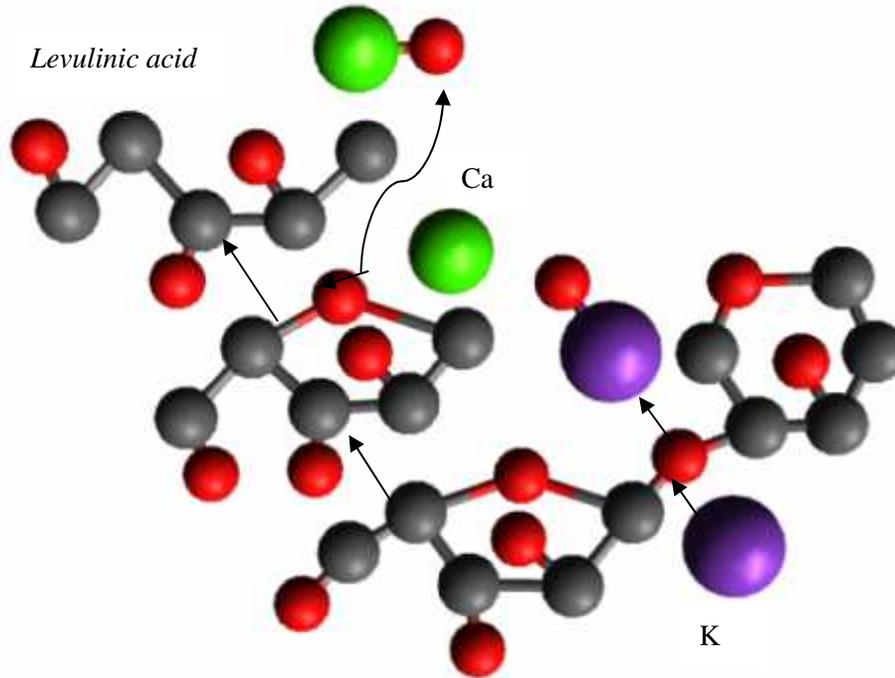
Gambar 3.3 Mekanisme pemutusan rantai oleh unsur alkali dan alkali tanah pada hemiselulosa

Pada gambar 3.4 terlihat molekul atom Na akan mendekati ikatan C – O – C pada polimer *xylopranose*. Molekul atom Oksigen akan melepas ikatan kovalennya dengan karbon sehingga akan terikat dengan molekul atom Na menjadi NaO. Setelah itu *xylopranose* akan menjadi monomer yang mempunyai ikatan C – O – C. Sementara pemanasan masih terjadi molekul atom Mg akan mendekati polimer *xylopranose* sehingga akan mengajak Oksigen pada ikatan C – O – C untuk melepas elektronnya sehingga akan menjadi senyawa MgO. Pada tahap selanjutnya monomer *xylopranose* akan menjadi *Ethylene glycol* dan terbakar.



Gambar 3.4 Ilustrasi tahapan pemutusan ikatan *xylopranose* pada Hemiselulosa

Oksigen mempunyai 2 elektron bebas yang mudah berikatan dengan molekul atom yang lebih besar. Tetapi ikatan ini tidak kuat ditambah karena ada pemanasan dan udara sehingga mudah terlepas, sehingga Na dan Mg akan mencari pasangan elektron lain untuk mencapai kestabilan.



Gambar 3.5 Ilustrasi tahapan pemutusan *xylopranose* dan *L-arabinose* pada Hemi selulosa.

Pada gambar 3.5 di atas molekul atom (Mg, Na, K, Ca) pada campuran NZ dan AF yang dipanaskan akan mendesak ikatan $C-O-C$ pada polimer hemiselulosa (*xylopranose* dan *L-arabinose*) untuk terputus. Oksigen mempunyai 2 elektron bebas yang mudah tertarik oleh molekul atom yang lebih besar. Molekul atom Karbon jika dibandingkan dengan molekul atom K dan Ca lebih kecil sehingga elektron oksigen yang terikat pada ikatan kovalen karbon akan melepaskan ikatannya untuk bergabung dengan molekul alkali dan alkali tanah. Kejadian ini dipicu oleh adanya pemanasan dan aliran udara pada alat uji STA. Waktu berikatan molekul atom oksigen dengan atom molekul KO dan CaO hanya sekejap karena adanya pemanasan dan aliran udara yang kontinyu sehingga menyebabkan molekul atom K dan Ca akan memutus ikatan polimer $C-O-C$ yang lain. Kejadian tersebut akan berulang ulang sampai semua lignoselulosa menjadi ikatan yang lebih pendek. Terputusnya polimer ini dengan cepat akan berubah menjadi monomer dan selanjut menjadi gas yang mudah terbakar.

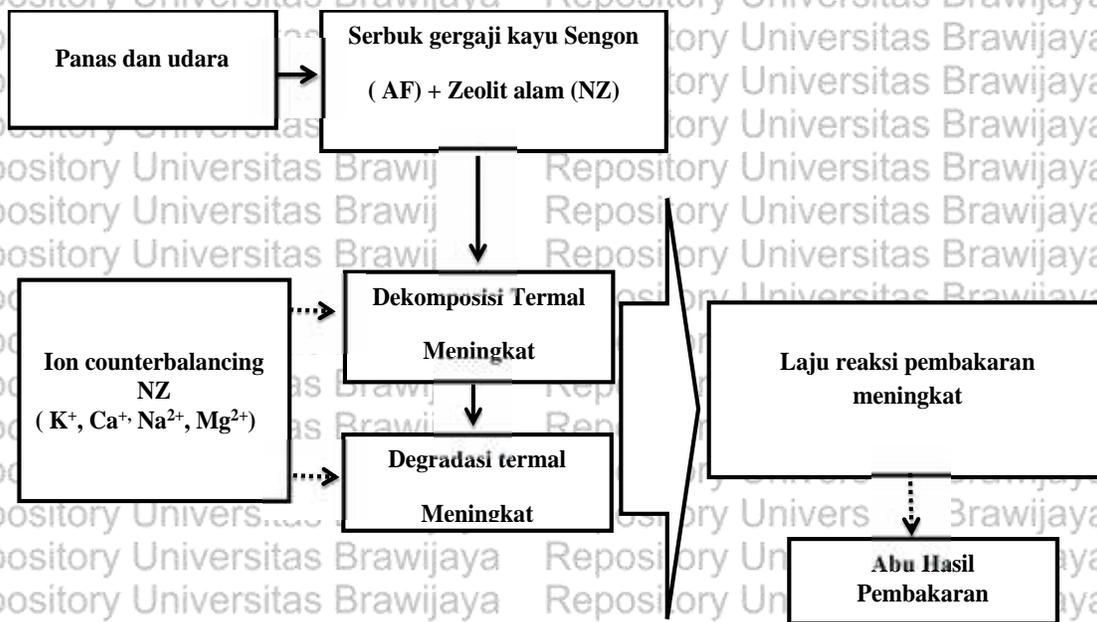


3.2 Hipotesa

Dari kajian tinjauan pustaka dapat diambil beberapa hipotesis yaitu:

- Penambahan mineral zeolit alam pada pembakaran serbuk gergaji kayu sengon akan meningkatkan degradasi termal berat AF karena pemecahan ikatan polimer Lignoselulosa dibantu ion logam Alkali dan alkali tanah yang ada di NZ.
- Mineral zeolit alam juga akan meningkatkan dekomposisi termal AF karena pemecahan ikatan C-O-C dibantu ion penyeimbang (logam Alkali dan alkali tanah) yang ada di NZ.
- Laju reaksi pembakaran berat akan semakin cepat karena semakin cepatnya dekomposisi termal.
- Penambahan NZ pada pembakaran AF akan mengurangi potasium (K) dan Kalsium (Ca) pada abu hasil pembakaran yang menyebabkan gumpalan penyebab korosi.

3.3 Bagan Kerangka Konsep



Gambar 3.6 Bagan kerangka konsep

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dalam disertasi ini adalah jenis penelitian eksperimental sungguhan dengan mengolah data hasil pengujian dari STA (gabungan pengujian DSC-TGA) untuk dianalisa menggunakan metode statistik. Selanjutnya menganalisa kandungan abu dengan menggunakan SEM-EDX untuk mendapatkan data kandungan unsur. Sehingga metode penelitian ini untuk menjawab hipotesa. Adapun tahapan penelitian dibagi menjadi 2 tahap, tahap pertama adalah menguji karakteristik AF dan NZ, sedangkan tahap kedua adalah menguji hipotesa AF dan campuran AF+NZ.

4.1 Variabel Penelitian

Variabel - variabel penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel bebas
 - Temperatur
 - Persentase penambahan 0%, 15% dan 25% NZ.
2. Variabel yang dapat dikontrol yaitu :
 - Besar butiran Serbuk Kayu Sengon
 - Besar butiran Zeolit Alam
 - Laju udara pembakaran
 - Laju pemanasan
3. Variabel terikat yaitu :
 - Laju reaksi pembakaran dengan indicator DTG (Derivative Thermo Gravimetric)
 - Dekomposisi termal dengan indikator CDC (The Conversion Degree of Combustible).
 - Degradasi termal dengan indicator TG (Thermo Gravimetric)
 - Komposisi kimia abu

4.2 Tempat dan Jenis Pengujian

Adapun tempat dan pengujian sampel dilakukan tergantung pada tersedianya alat uji, yaitu:



1. Pengujian AF

Pengujian analisa *ultimate* dan *proximate* dilakukan di Laboratorium Tekmira di Bandung. Sedangkan untuk pengujian analisa komposisi dilakukan di Laboratorium Nutrisi dan Makanan Ternak di Fakultas Peternakan, Universitas Brawijaya Malang.

2. Pengujian NZ

Pengujian karakteristik NZ dilakukan di Laboratorium Sentral, FMIPA, Universitas Negeri Malang Dan Universitas Muhammadiyah Jember

2 jenis pengujian diatas merupakan tahapan pengujian yang pertama.

3. Pengujian AF dan AF+NZ

Pengujian STA yang meliputi DSC-TGA dilakukan di Laboratorium Sentral, FMIPA, Universitas Negeri Malang.

4. Pengujian unsur abu

Pengujian unsur abu dengan menggunakan SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Sentral, FMIPA, Universitas Negeri Malang.

Waktu Penelitian : 6 bulan, mulai Pebruari 2014 – Pebruari 2016

4.3 Bahan Dan Alat

4.3.1 Bahan yang digunakan:

- Serbuk gergaji kayu sengon (AF)

AF yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari pabrik penggergajian kayu di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur Indonesia. AF dikeringkan di bawah sinar matahari dan dihancurkan menjadi ukuran 100 mesh.

- Zeolit alam (NZ)

NZ diperoleh dari penambangan di Malang, Jawa Timur Indonesia, dibersihkan dengan air suling dan dihancurkan dengan ukuran yang sama dengan serbuk gergaji AF.

NZ dikarakterisasi menggunakan XRD untuk menentukan kandungan mineral dan struktur kristal. Penentuan besar persentase penambahan NZ berdasarkan pada penelitian dari (Jae et al. 2014). Penelitiannya tentang penambahan katalis ZSM-5 secara kontinyu pada pirolisa lignoselulosa biomasa. Hasilnya pada rasio katalis dibagi biomasa 3-9, pada rasio 3 menghasilkan metana tertinggi tetapi aromatik rendah, sedangkan pada rasio 6 menghasilkan metana rendah tetapi aromatik tertinggi. Karena hal tersebut maka peneliti



melakukan variasi penambahan NZ pada percobaan ini sebesar 15% dan 25% dari berat awal AF.

4.3.2 Alat yang digunakan:

1. XRD (X-Ray Diffractometry)

Pengujian ini dilakukan pada Zeolit untuk mengetahui senyawa yang terkandung di dalamnya. Zeolit dihaluskan kemudian diletakkan di tempat sampel. Sampel diletakkan pada alat XRD kemudian disinari X. Hasilnya berupa spektrum difraksi sinar X yang dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik intensitas puncak.



Gambar 4.1 Alat uji XRD yang digunakan

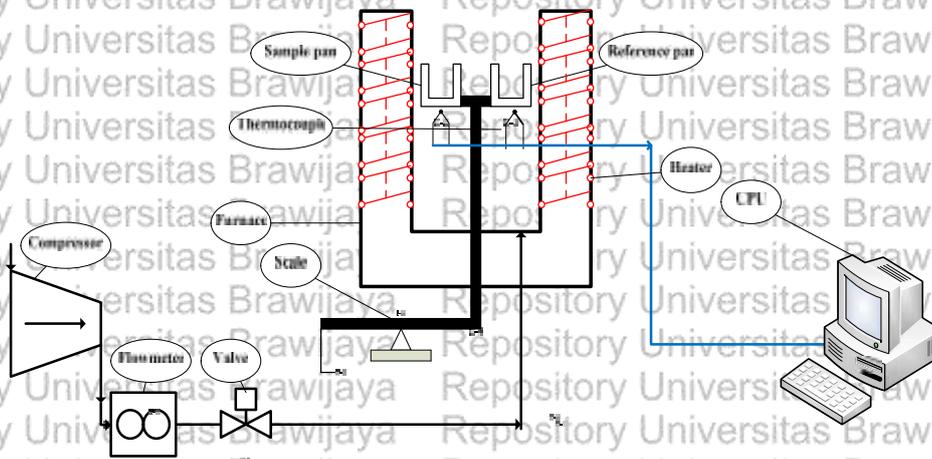
2. DSC – TGA (*Differential Scanning Calorimetry-ThermoGravimetry Analysis*)

Analisis termogravimetri yang digunakan adalah STA Iliensis PT 1600. Alat ini merupakan kombinasi DSC dan TGA yang mampu merekam perubahan massa akibat dari naiknya temperatur. Sehingga dari data tersebut dapat di analisis perubahan apa saja yang terjadi pada sampel.



Gambar 4.2 Alat uji STA PT 1600 LINSEIS

Pada penelitian ini instalasi alat yang digunakan adalah seperti gambar 4.3



Gambar 4.3 Instalasi alat uji STA

3. SEM/EDX (*Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray*)

Analisa unsur kimia yang terkandung didalam AF dan abu menggunakan alat SEM-EDX. Dalam penelitian ini, SEM digunakan dalam mode yang paling umum, yaitu mode emissive. Kepadatan dibatasi hingga 5,0 keV untuk mengurangi kontribusi

substrat silikon dan meminimalkan hilangnya ditanam kembali agregat. Spektrometer EDX adalah instrumen yang secara kuantitatif menentukan elemen-elemen dalam sampel dengan menyinari sampel dengan sinar-X dan kemudian menganalisis sinar-X yang dipancarkan kembali.



Gambar 4.4 Alat uji SEM-EDX

4.4 Data Yang Diambil

1. Setelah pengujian NZ dan AF untuk mengetahui kandungan unsur senyawa, komposisi struktur komponennya dan jenisnya.
2. Pengujian DSC-TGA (*Differential Scanning Calorimetry – Thermogravimetry Analyzer*) untuk memperoleh informasi nilai kalor, suhu transisi fasa, reaksi fisika.

Kombinasi DSC dan TGA sangat membantu menarik kesimpulan tentang peristiwa termal yang terjadi pada bahan. Metode pengujiannya dengan memanaskan massa serbuk gergaji kayu sengon 0%, 15% dan 25% tambahan zeolit sampai temperatur 900 °C dengan laju pemanasan 80 °C/detik dan laju udara 5 liter/menit. Metode ini digunakan untuk mendekati pembakaran ketel uap yang secara cepat seperti yang dilakukan oleh (Supatchaya Konsomboon, 2011)

Langkah pengujian setelah sampel di masukkan didalam pan seberat (AF1 = 10mg, AF2 = 15mg dan AF3 = 20mg) pemanasan dimulai pada temperatur ruang sampai 100 °C dan ditahan selama 10 menit untuk. Setelah itu dilanjutkan sampai temperatur 900 °C dan juga ditahan selama 10 menit.



3. Pengujian abu dengan menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui kandungan unsur – unsur yang tersisa.

4.5 Pengolahan data

- Data hasil pengujian NZ dan AF berupa angka - angka di tampilkan dalam bentuk grafik dan tabel tanpa diolah terlebih dahulu.
- Data hasil uji STA yang berupa penurunan berat relatif (TG) akan di olah menjadi turunan terhadap waktu (DTG) yang nanti akan berguna untuk menganalisa dan di plot menjadi grafik TG dan DTG terhadap temperatur. Selain itu untuk mengetahui efek NZ terhadap AF digunakan rumus CDC yang di tentukan saat 5% setelah pemanasan berapa temperatur yang tercapai. Semakin kecil temperatur yang tercapai artinya efek NZ semakin bagus karena energi aktifasi semakin kecil.
- Data hasil pengujian abu juga berupa angka – angka kandungan unsur – unsur yang terdeteksi ditampilkan dalam bentuk tabel tanpa diolah terlebih dahulu.



BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dalam laporan disertasi ini terbagi dalam 2 bagian, bagian pertama menguji bahan AF dan NZ dan yang bagian kedua menguji AF dan campuran AF + NZ.

5.1 Hasil

5.1.1 Komponen dan struktur kimia AF

Dari tabel 5.1 terlihat bahwa AF sebagian besar terdiri dari *volatile matter* namun juga mengandung sedikit sekali sulfur dan juga nitrogen. Tiga unsur utama pembentuk AF, Karbon terdeteksi yang besarnya hampir sama dengan Oksigen dan Hidrogen terdapat sebagian kecil. Struktur komposisi senyawa pembentuk AF seperti lignoselulosa pada umumnya terdiri dari 3 komponen yang terbanyak Selulosa diikuti Lignin dan Hemiselulosa.

Tabel 5.1 Hasil analisa ultimate, proximate dan komposisi struktur AF

Analisa Ultimate (dry basis, wt%)	
Karbon	45,53
Hidrogen	6,49
Nitrogen	0,31
Sulfur	0,1
Oksigen	46,13
Analisa Proximate	(dry basis, wt.%)
Kadar air	7,2
Kadar zat menguap (<i>Volatile matter</i>)	74,9
Kadar karbon terikat	16,46
Kadar abu	1,44
HHV (cal/g)	4.354
Analisa Komposisi struktur	(%)
Selulosa	41,88
Hemiselulosa	14,55
Lignin	24,78

Dari tabel 5.2 terlihat bahwa rumus kimia NZ didominasi Oksigen dan Si serta Al yang merupakan unsur utama yang membentuk struktur tetrahedral. Terdeteksi juga unsur alkali dan



alkali logam sebagai ion *counterbalancing* ikatan Al-O untuk membentuk struktur tetrahedral, $\text{Na}_4 (\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_9)$, Ca_2

Table 5.2. Hasil analisa XRD dari NZ

Senyawa	Al _{8.16} Si _{27.84} O _{97.52} Na _{4.00} Ca _{1.88} K _{0.28} Mg _{0.08}
Sistem kristal	Monoclinic
Densitas (g/cm ³)	2.17

5.1.2 Pengaruh NZ terhadap laju degradasi pembakaran AF

Setelah hasil pengujian tahap pertama di atas selanjutnya adalah hasil pengujian tahap kedua. Tahap kedua melakukan pengujian menggunakan alat uji STA PT 1600 Liensis maka hasil yang di dapatkan berupa data waktu, laju penurunan berat dan temperatur.

Perubahan berat AF akibat pemanasan menjadi indikasi terjadinya tahap devolatilisasi dan tahap oksidasi seperti pada pembakaran biomasa (López-González *et al.* 2013). Begitu juga pembakaran dari campuran AF dan NZ dapat dibagi menjadi dua tahap. Yang pertama adalah pembakaran volatil, yang kedua adalah pembakaran karbon tetap.

Pada pembakaran serbuk kayu, katalis bekerja lebih efektif ketika ia mampu membuat reaksi pembakaran berlangsung pada temperatur yang lebih rendah. Efek penambahan katalis pada pembakaran AF tinggi, ketika degradasi berat 5% terjadi pada temperatur pembakaran yang lebih rendah. Dalam tulisan ini dibahas efek persentase penambahan NZ dan perbedaan berat awal.

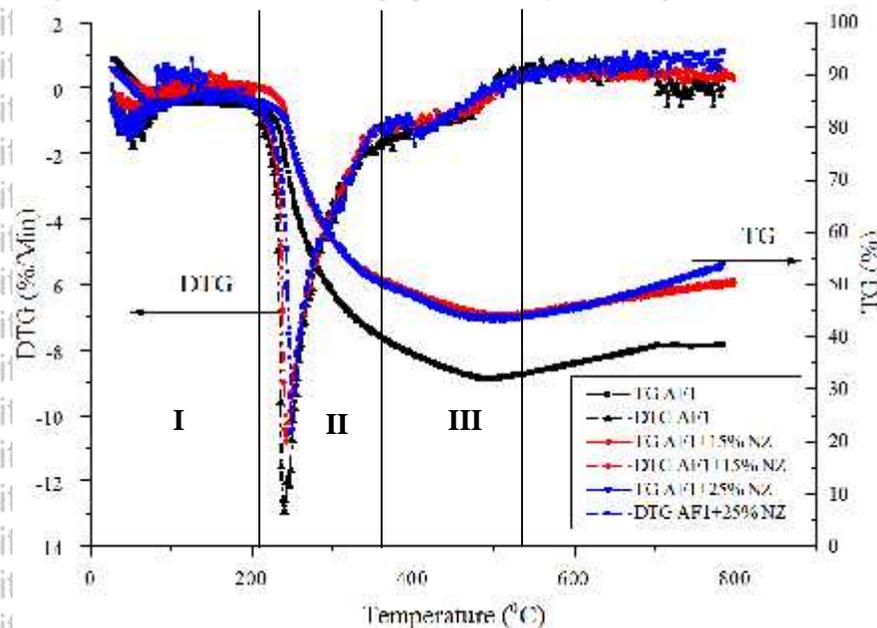
Pada gambar 5.1 – 5.3 menjelaskan tentang TG (*Relative weight loss*, angka sebelah kanan) yang menunjukkan persentase penurunan berat relatif dan DTG (*Derivative weight loss*, angka sebelah kiri) yang menunjukkan laju penurunan berat relatif pada pembakaran AF, AF+ 15%NZ dan AF+25%NZ pada berbagai massa AF. Kandungan lignoselulosa pada AF di tabel 5.1 merujuk pada (Huber and Corma 2007) sesuai seperti kandungan biomasa pada umumnya.

Perbedaan penambahan NZ pada pembakaran AF terhadap temperatur nyala ditunjukkan pada Gambar 5.4-5.6. Gambar - gambar tersebut menunjukkan bahwa persentase NZ yang bervariasi menghasilkan temperatur nyala AF yang berbeda. Pembakaran campuran AF dan NZ yang tepat telah mampu menurunkan temperatur dekomposisi biomasa.

Pada gambar 5.1 menunjukkan TG - DTG pada berat awal 10 mg pembakaran serbuk gergaji (AF) tanpa NZ memiliki degradasi yang lebih cepat. Proses dekomposisi termal pada zona I adalah terjadinya proses pengeringan kadar air yang menguap sampai temperatur sekitar 150 °C.



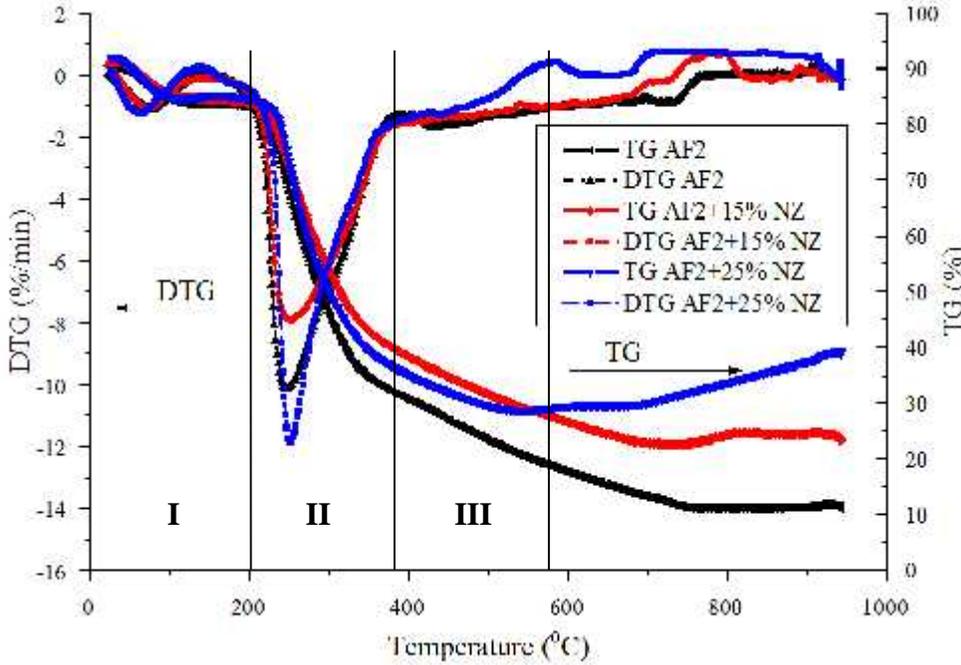
Dilanjutkan pada zona II proses kadar zat menguap dari komponen lignoselulosa terutama selulosa dan hemiselulosa yang teroksidasi terjadi, dengan indikator penurunan berat yang tajam sampai temperatur sekitar 250 °C. Pada zona III proses oksidasi kadar karbon terikat terutama lignin dimulai saat temperatur 350 °C sampai sekitar 515 °C. Abu pembakaran mengandung SiO₂ dan Al₂O₃ sehingga masih ada sisa di pan (Khan et al, 2008). Penambahan NZ ke AF menyebabkan persentase abu semakin besar karena senyawa NZ disusun oleh unsur Si dan Al. Pada gambar (5.1 – 5.3) terlihat di akhir proses, persentase TG sisa abu pembakaran AF dengan tambahan NZ lebih besar daripada yang tanpa tambahan NZ



Gambar 5.1 Grafik TG - DTG AF1

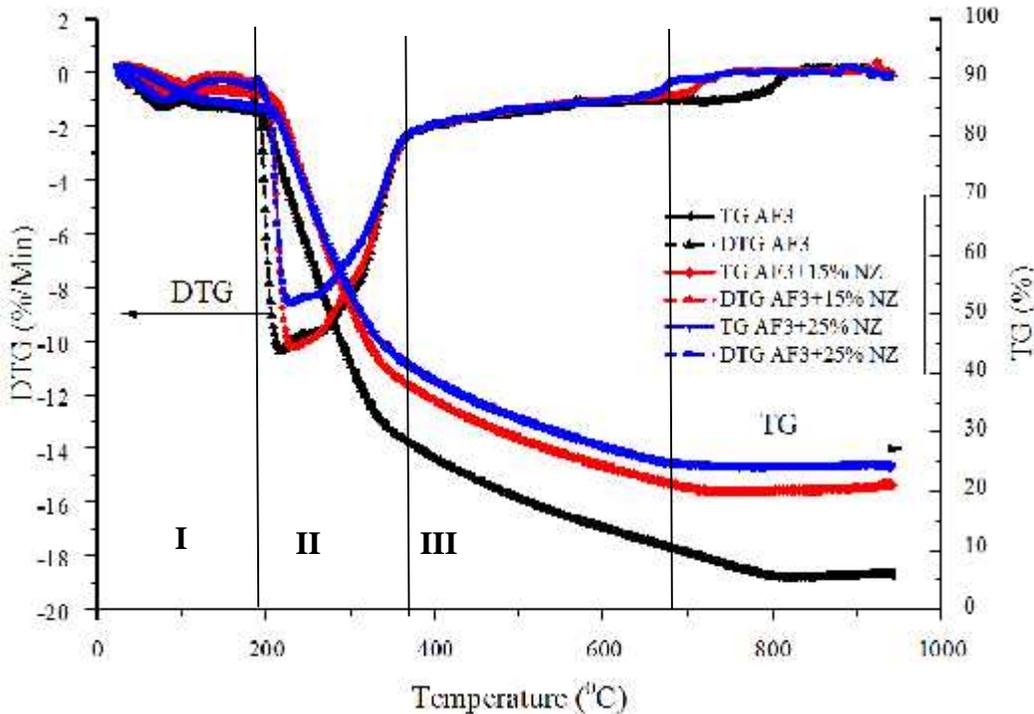
Pada gambar 5.2 laju penurunan berat pada pembakaran AF2 + 15%NZ lebih lambat daripada AF2+25%NZ. Ini disebabkan karena hemiselulosa, selulosa dan lignin terurai secara bersamaan akibat NZ. Terlihat bahwa garis biru lebih curam daripada garis merah tetapi saat temperatur mendekati 600 °C garis biru naik menuju 0 (pada grafik DTG) yang menandakan hemiselulosa, selulosa dan lignin habis terbakar. Pada akhir pembakaran hanya NZ yang tersisa sehingga persentase abu lebih banyak daripada garis merah.

Pada zona I proses pengeringan kandungan kadar air sampai pada temperatur 195 °C setelah itu dilanjutkan proses devolatilisasi pada zona II saat kandungan zat menguap yang teroksidasi sampai temperatur 380 °C. Pada zona III penambahan 25%NZ mampu membuat lignin terdekomposisi secara cepat.



Gambar 5. 1 Grafik TG - DTG AF2

Pada gambar 5.3 zona I devolatisasi terjadi sampai temperatur 180 °C, berat AF yang terbakar 20mg membuat proses oksidasi zat menguap lebih lebar dari temperatur 190 OC sampai 380 OC pada zona II. Sedangkan pada zona III pembakaran karbon tetap temperatur mencapai 700 °C.





Gambar 5.3 Grafik TG – DTG AF3

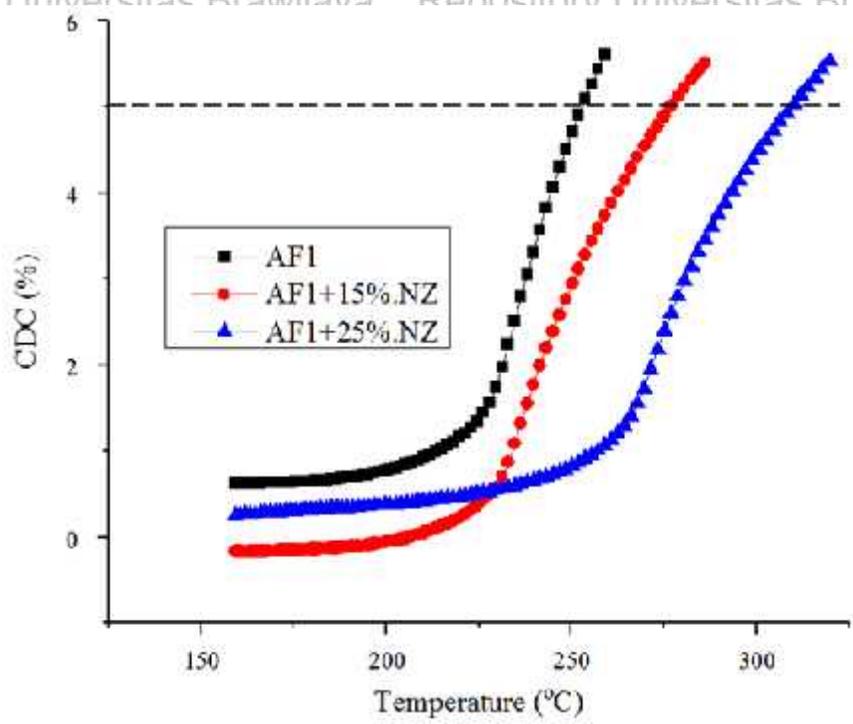
akaran.

Pada pembakaran AF3 20mg, NZ sudah cukup mendapat panas untuk aktif walaupun AF + 25%NZ belum se aktif pembakaran AF + 15%NZ. Terlihat bahwa pada pembakaran lignin (karbon tetap) di temperatur diatas 600 °C, DTG garis biru sudah mendekati 0 diikuti oleh garis merah dan hitam. Ini berarti pada tahap pembakaran arang NZ mampu mengurai lignin lebih cepat daripada tanpa NZ

5.1.3 Efek NZ terhadap dekomposisi dan temperatur nyala AF.

Untuk mengetahui pengaruh NZ terhadap pembakaran AF maka pada gambar 5.4 – 5.6 berikut ini akan diuraikan dengan analisa CDC (*The Conversion Degree of Combustible*).

Gambar 5.4 menunjukkan CDC untuk menjelaskan pengaruh NZ pada pembakaran AF. Indeks CDC untuk membandingkan karakter pembakaran dengan mengukur temperatur saat degradasi berat telah mencapai 5% (B. Shen and Qinlei 2006). Temperatur CDC yang semakin tinggi berarti efek katalis tidak berpengaruh pada pembakaran AF. Sedangkan jika sebaliknya maka katalis memberi pengaruh besar terhadap pembakaran AF.



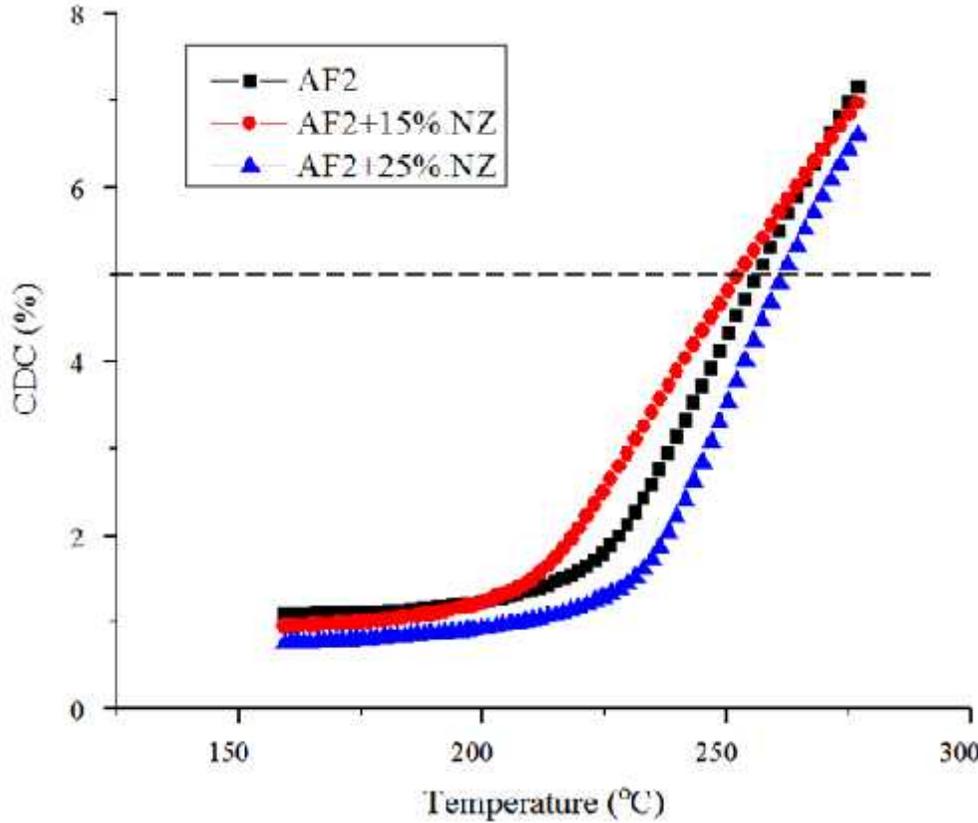
Gambar 5.4 Grafik CDC saat 5 % AF1



Untuk berat awal 10 mg (Gambar. 5.4) penambahan NZ tidak meningkatkan laju degradasi berat. AF tanpa NZ berada pada suhu penyalaan yang lebih rendah, diikuti oleh penambahan 15 dan 25% NZ pada suhu yang lebih tinggi. Temperatur CDC AF terjadi pada suhu 253 °C, sementara penambahan 15% NZ membuat CDC AF terjadi pada temperature 275 °C. Selanjutnya penambahan NZ hingga 25% membuat CDC AF terjadi pada temperature 309 °C. Hal ini terjadi karena berat AF yang dibakar terlalu sedikit dan panas awal yang ada diserap oleh NZ tapi belum cukup untuk membuat mineral dalam NZ menjadi aktif membantu pembakaran dengan kata lain NZ hanya menjadi beban termal. Akibatnya AF memerlukan panas yang lebih besar untuk terbakar.

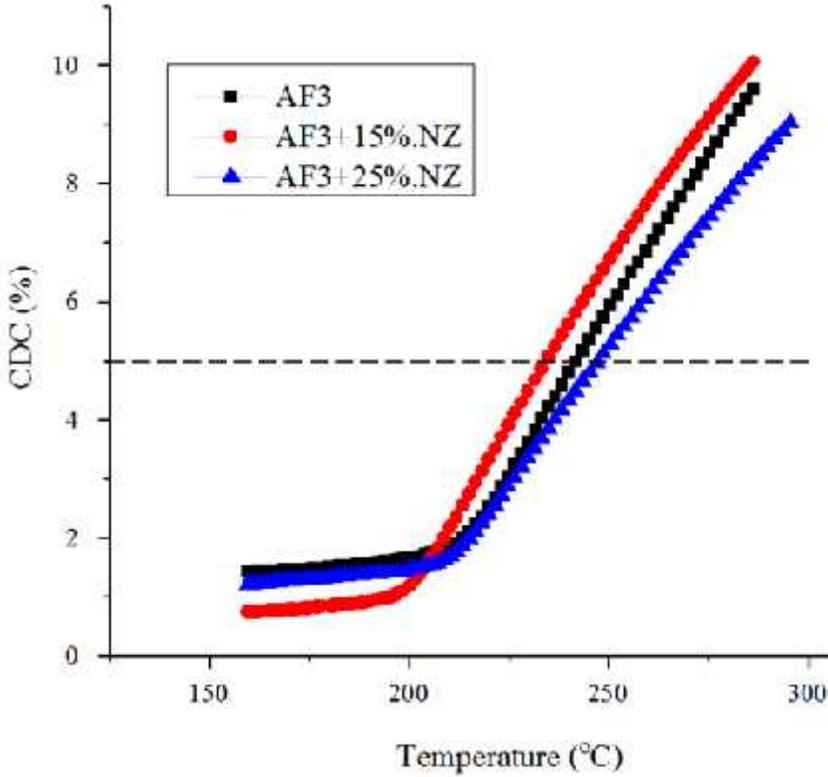
Pada Gambar 5.4 dengan penambahan NZ untuk berat awal 15 mg pada pembakaran AF menunjukkan perbedaan temperatur CDC. Penambahan 15% NZ menyebabkan CDC AF pada temperatur terendah (251, 256 dan 259 °C). Hal yang sama terjadi pada berat awal 20 mg, yang ditunjukkan pada Gambar 5.5. Penambahan 15% NZ memberikan temperatur CDC terendah. Ini menunjukkan bahwa jumlah panas hanya cukup untuk mengaktifkan NZ sampai 15%. Diatas itu NZ menjadi beban termal.

Pembakaran serbuk gergaji AF + NZ dengan berat awal 20 mg memiliki temperatur CDC yang paling rendah (234, 239 dan 248 °C) (Lihat gambar 5.4 – 5.6). Artinya, panas dari bahan bakar sudah mampu mengaktifkan NZ sampai 25% walaupun pada jumlah ini NZ belum seaktif 15%.



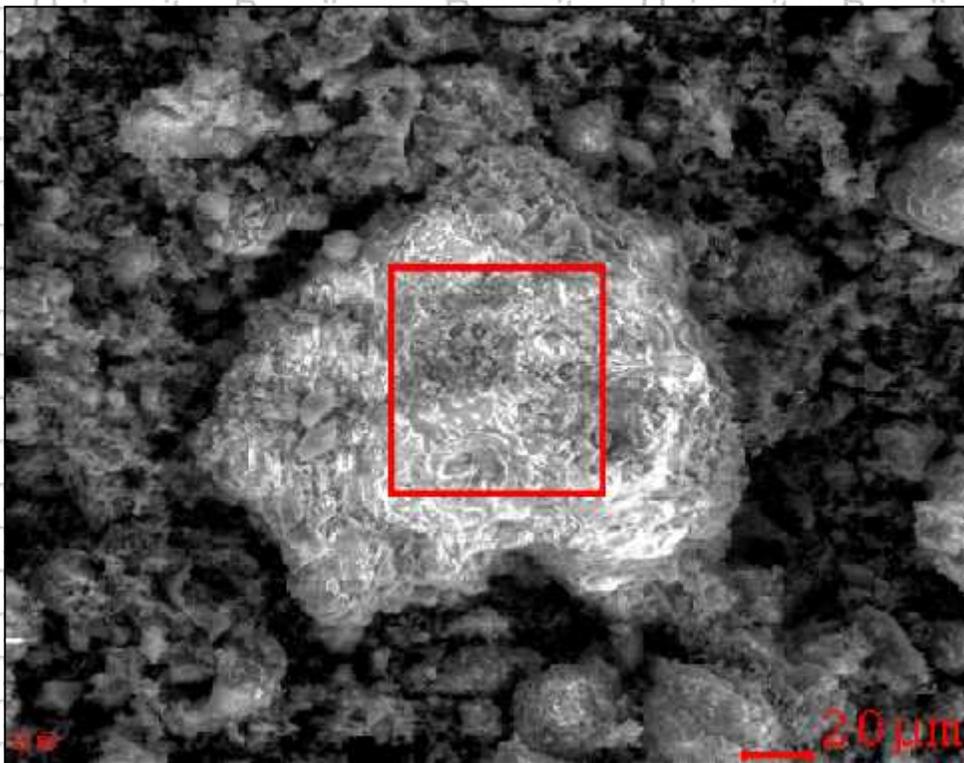
Gambar 5.5. Grafik CDC saat 5% AF2

Pada Gambar 5.5 - 5.6 terlihat garis merah yang merupakan serbuk gergaji AF + 15% NZ meningkat lebih dulu pada temperature 214 °C dan 208 °C. Hal ini disebabkan komposisi campuran yang tepat pada AF +NZ sehingga NZ mampu memecah ikatan AF secara menyeluruh. Serbuk Gergaji AF 14,55% kandungannya adalah Hemiselulosa akan terurai oleh energi panas bersamaan dengan terjadinya perubahan struktur NZ. Hemiselulosa terdiri dari beberapa polimer, salah satunya adalah xylan. Ilustrasi pemutusan polimer di pembahasan ini menggunakan xylan yang dominan menyusun hemiselulosa (Cheng, Winter, dan Stipanovic 2012; Yang *et al.* 2006). Hemiselulosa terdiri dari polimer yang bercabang – cabang sehingga lebih mudah terurai daripada selulosa. Salah satu cabangnya yang terbanyak adalah xylan jadi jika terjadi dekomposisi awal pada pembakaran maka bisa diprediksi itu adalah xylan (Pang *et al.* 2014; Stefanidis *et al.* 2014). Data yang diperoleh setelah diolah membuktikan penambahan NZ lebih mampu menurunkan temperatur dekomposisi lignoselulosa AF jika dibandingkan dengan hasil penelitian (Williams 1996).

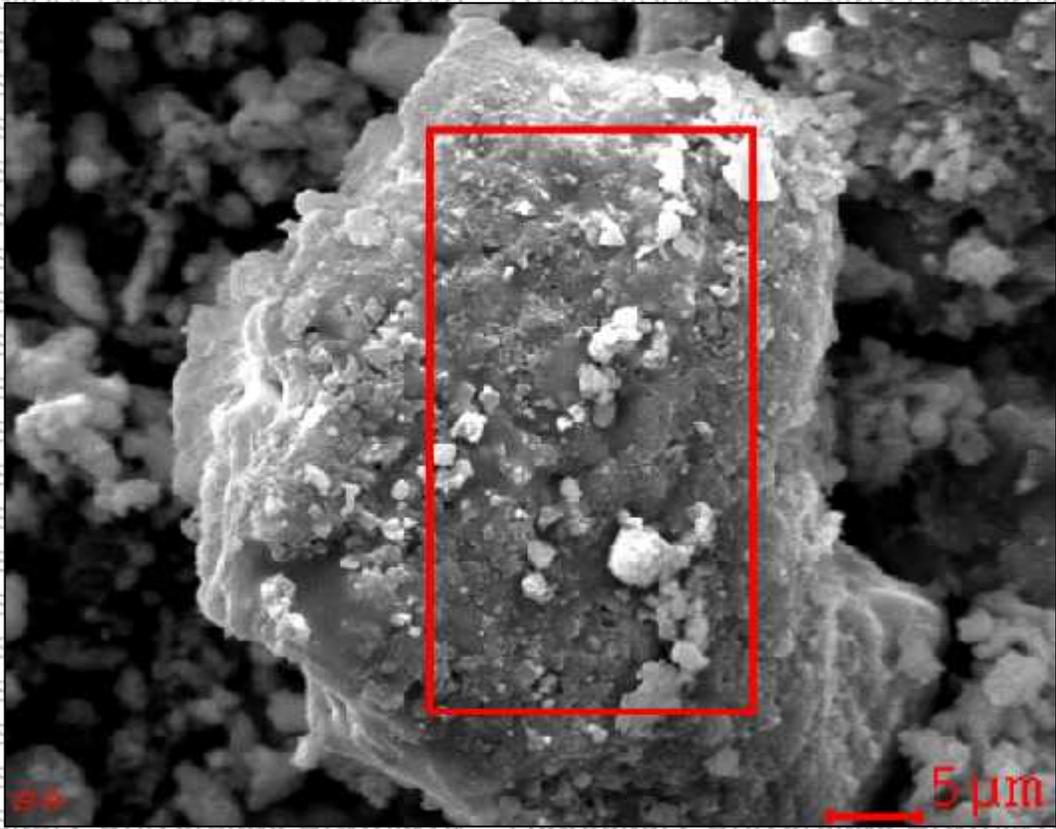


Gambar 5.6 Grafik CDC saat 5% AF3

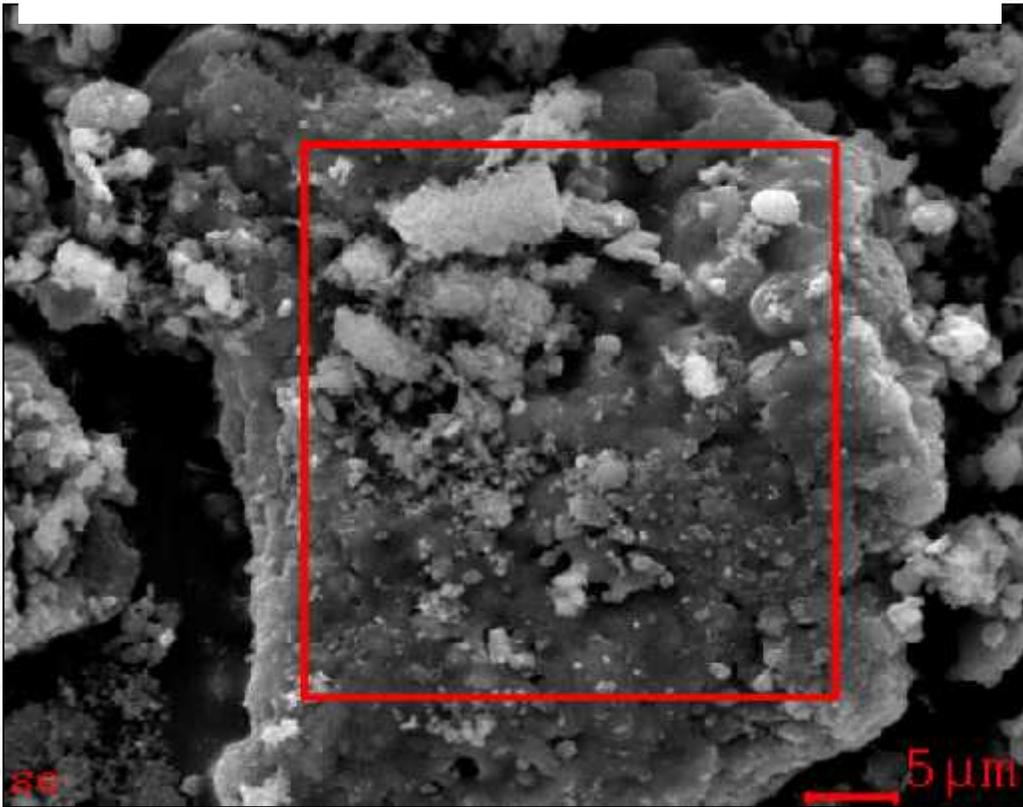
Hasil pengujian SEM-EDX abu berupa foto dan nilai komponen unsur – unsur yang terdeteksi dibuat grafik seperti dibawah ini. Untuk memudahkan dalam membandingkan hasil uji abu maka di buat tabel 5.3.



Gambar 5.5 Hasil uji SEM abu AF



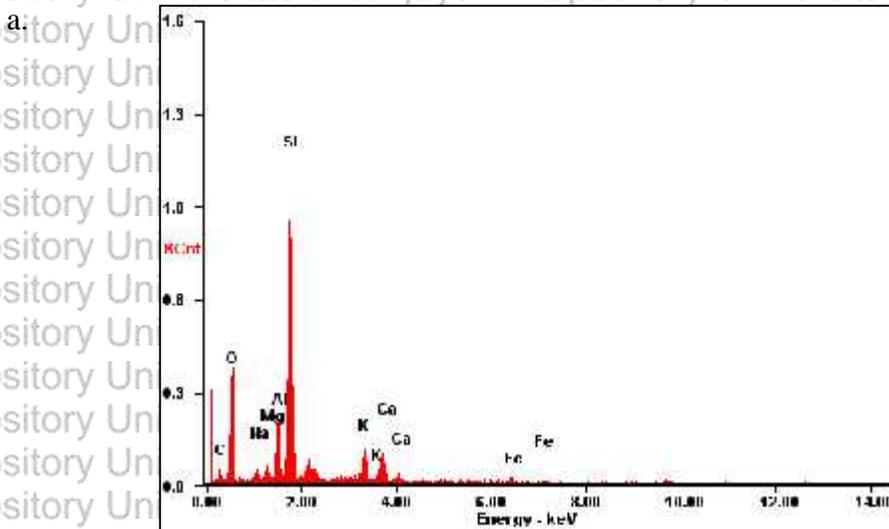
Gambar 5.6 Hasil uji SEM abu AF + 15%.NZ



Gambar 5.7 Hasil uji SEM abu AF + 25%.NZ

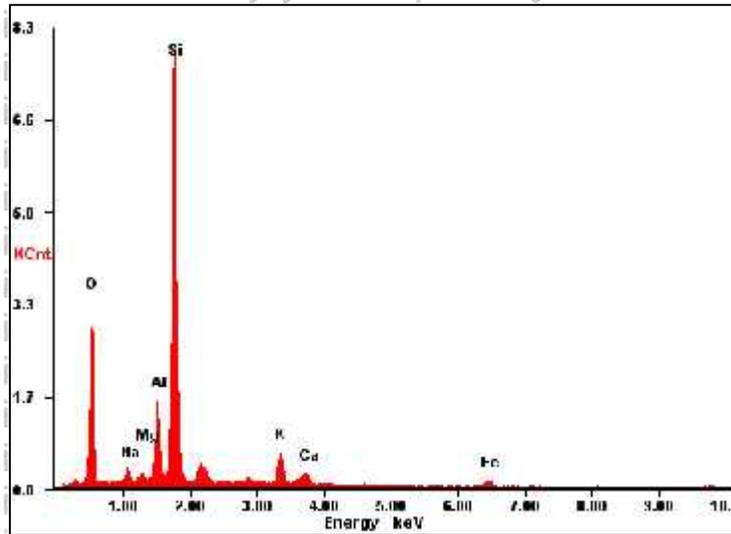


Gambar 5.7 – 5.9 memperlihatkan bahwa abu AF dengan tambahan NZ lebih mudah pecah, baik yang dengan tambahan 15% maupun 25%. Pada abu dengan tambahan NZ terdapat partikel – partikel kecil yang mudah pecah. Pada abu AF tanpa tambahan NZ tidak terlihat partikel – partikel karena sifatnya yang lebih lunak. Gambar 5.7 terlihat lebih terang karena kandungan K rendah dan Ca yang tinggi dan pada gambar 5.9 terlihat sedikit lebih terang karena kandungan K tinggi dan Ca lebih rendah. Kandungan K dan Ca ini menyebabkan penggumpalan pada abu. Sedangkan pada gambar 5.8 kandungan K dan Ca hampir sama sehingga gumpalan dan partikel kecil lebih mudah pecah (*fragile*). Dari hasil foto terlihat gumpalan abu AF lebih lunak yang berarti material ini mampu menyatu jika ada tumpukan – tumpukan abu. Sehingga akan sulit dibersihkan karena lengket (Grimm et al. 2012).

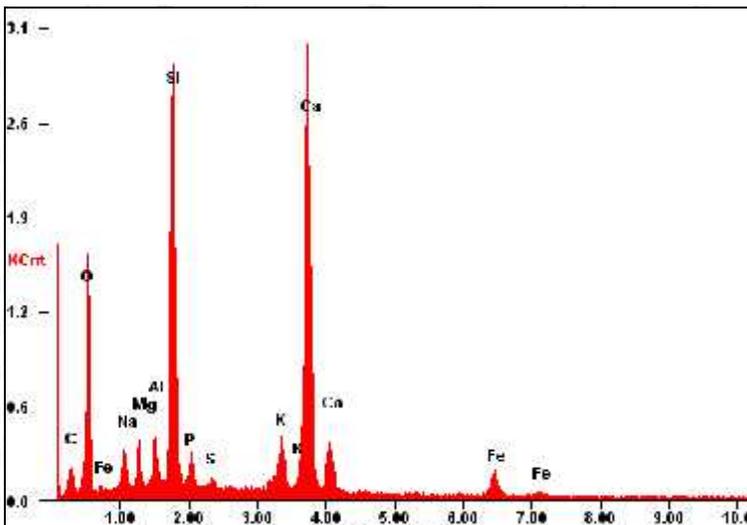




b.



c.



Gambar 5.10 Hasil EDX (a) Abu AF. (b). Abu AF + 15%.NZ. (c). Abu AF + 25%.NZ

Pada gambar 5.10 terlihat bahwa komposisi unsur – unsur abu yang tertinggi adalah Si, Al dan O yang terikat di keduanya (SiO_2 dan Al_2O_3). Demikian juga unsur yang lain sama sama mengikat O dalam jumlah yang lebih sedikit, misalnya Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , CO_2 dan SO_3 . Hal ini yang membuat kandungan O masih tertinggi pada abu pembakaran (Miles et al. 1996).



Tabel 5.3. Hasil analisa abu (%)

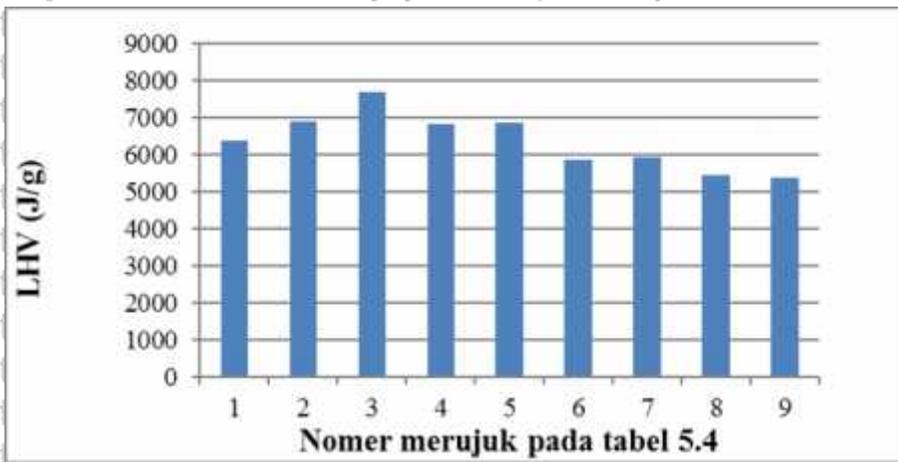
Element	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
AF	10.5	35.2	2.8	2.0	1.8	14.5	1.3	0.3	2.9	24.5	3.8
AF+15%NZ	16.5	39.3	0.4	0.2	4.3	29.4	-	-	3.9	4.6	1.0
AF+25%NZ	-	45.2	1.5	0.8	7.2	37.0	-	-	4.3	1.8	1.8

Hasil pengujian DSC – TGA ada dilampiran, untuk nilai kalor ditampilkan pada tabel 5.4.

Tabel 5.4 Hasil LHV pembakaran AF

No.	AF1=10mg			AF2=15mg			AF3=20mg		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0%	15%NZ	25%NZ	0%	15%NZ	25%NZ	0%	15%NZ	25%NZ
Preheat (J/g)	56.13	21.14	33.75	72.85	51.72	69.3	54.52	57.51	34.84
MainHeat (J/g)	6365.16	6873.44	7690.46	6820.55	6845.2	5855.69	5930.45	5454.2	5376.67
Onset point °C	240.4	244.3	249.6	206.4	212.6	235.1	190.1	203.7	205.9
Offset point °C	560.3	599.7	611.5	795.5	744	642.3	844.4	762.6	732.9

Sedangkan untuk membantu analisa perbandingan nilai kalor dibuat grafik di gambar 5.11. Nilai LHV didapat dari perhitungan grafik yang ada dilampiran 3.



Gambar 5.11 Grafik LHV pembakaran AF



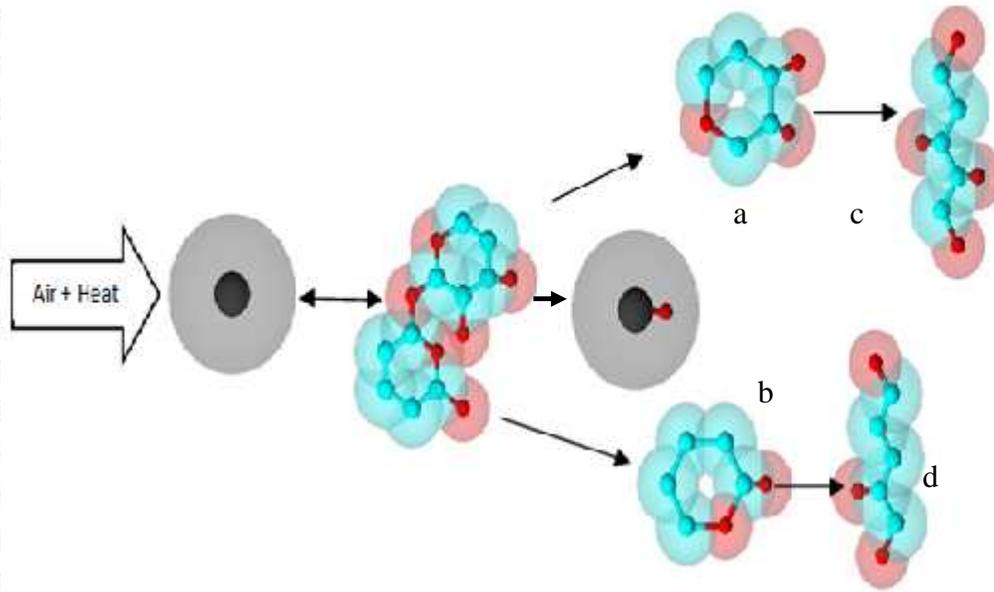
5.2 Pembahasan

5.2.1 Pengaruh NZ terhadap pembakaran AF

Selama proses pembakaran, sebagian energi panas membuat NZ melepas Na^+ , Mg^{2+} , K^+ dan Ca^{2+} (Logam Alkali dan Alkali tanah) sebagai ion *counterbalancing* (gambar 5.12). Atom logam Alkali dan Alkali tanah yang lebih energik mengoyak oksigen penghubung antar monomer hemiselulosa di AF. Sehingga hemiselulosa akan terputus menjadi ikatan yang lebih pendek (gambar 3.2).

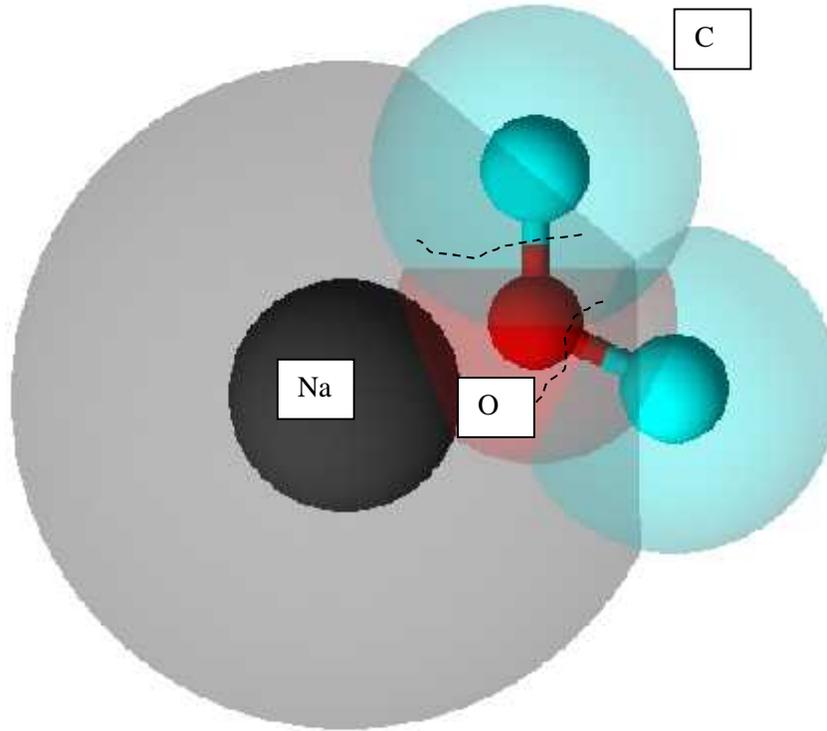
Terlihat pada struktur NZ di gambar 2.4 bahwa logam Alkali dan Alkali tanah di dalam NZ yakni Na, Mg, K, dan Ca berperan sebagai *counterbalancing* Al-O dan Si-O untuk membentuk struktur tetrahedral dalam NZ. Ketika dipanaskan struktur tersebut berubah menjadi asam Bronsted dengan melepas Na^+ , Mg^{2+} , K^+ dan Ca^{2+} . Ion-ion tersebut akan membuat oksigen penghubung ikatan polimer hemiselulosa mengalami gaya dorong terus menerus yang akhirnya terlepas ikatannya. Akibatnya polimer akan berubah menjadi monomer (gambar 3.2). Hal ini yang mengakibatkan AF 15mg lebih cepat terbakar pada temperatur yang lebih rendah karena ikatan yang lebih cepat terputus sehingga menjadi ikatan pendek dan lebih mudah terbakar. Hasil penelitian ini didukung oleh hasil penelitian (Liu, Che, dan Xu 2002; Shenqi *et al.* 2011) yang menjelaskan bahwa unsur alkali dan alkali tanah adalah katalis yang efektif untuk pirolisa, pembakaran dan gasifikasi.

Massa molekul logam Alkali dan Alkali tanah yang lebih besar mengganggu oksigen yang mengikat karbon polimer sehingga ikatan polimer akan terputus. Untuk massa bahan bakar awal kecil (10mg), penambahan NZ menyebabkan AF terbakar lebih lambat pada suhu yang lebih tinggi karena energi panas dari pembakaran AF tidak cukup untuk mengaktifasi zeolit untuk melepaskan ion-ion alkali dan alkali tanah sehingga hanya berfungsi sebagai beban termal. Hal berbeda untuk massa awal 15 dan 20 mg terutama pada tambahan zeolit alam 15% dapat memutus rantai hemiselulosa lebih cepat. Mekanisme ini disebabkan oleh volatilitas AF sebelum terbakar. Pada saat yang sama, logam Alkali dan Alkali tanah dalam zeolit alam sudah mendapat cukup panas untuk teraktivasi dan melepaskan molekul atom alkali dan alkali tanah sehingga menarik oksigen dan memutus rantai polimer (garis merah pada gambar 5.5 dan 5.6). Sedangkan pada penambahan 25% zeolit alam ada perlambatan suhu nyala karena panas diserap oleh zeolit alam yang lebih banyak daripada AF sehingga selama proses volatilitas AF lebih lambat (garis biru pada gambar 5.5 dan 5.6).



Gambar 5.12 Pemutusan ikatan polimer oleh Na^+ (a)L-Arabinose,(b)valeric acid,(c)Levulinic acid, (d)Ethylene glycol

Pada gambar 5.13 mengilustrasikan bahwa aliran udara dan panas membuat alkali dan alkali tanah, salah satunya Na yang berwarna hitam terlepas dari zeolit. Na menarik oksigen berwarna merah pada ikatan polimer sehingga ikatan terputus menjadi lebih pendek (a) dan (b). Ikatan Na dan O berlangsung sekejap, membuat Na (atau ion *counterbalancing* lainnya) menjadi atom bebas lagi untuk memutus cincin (a) dan (b) dengan mekanisme yang sama sehingga menjadi ikatan rantai pendek yang lebih mudah terbakar



Gambar 5.13. Ilustrasi gaya tarik menarik Na dan ikatan C-O-C

Pada gambar 5.13 mengilustrasikan Elektron Na pada kulit terluar menarik elektron O karena ikatan C-O-C melemah karena panas. Akibatnya ikatan C-O-C terputus sehingga polimer berubah menjadi monomer. Elektron Na (atau ion *counterbalancing* lainnya) yang menginduksi atom O dan gaya tarik O-C melemah akibat pemanasan mempercepat proses dekomposisi Lignoselulosa. Akhirnya temperatur nyala pembakaran menurun.

Tabel 5.4 menunjukkan pelepasan panas (LHV) dengan pembakaran AF di berbagai penambahan persentase NZ. Perubahan entalpi yang dihasilkan akibat penambahan NZ disajikan pada Gambar. 5.9. Dapat dilihat bahwa pada sampel kecil (10 mg) penambahan NZ meningkatkan LHV karena laju dekomposisi berlangsung sepanjang proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 5.1 . Namun pada sampel yang lebih besar (15mg dan 20mg) meningkatnya penambahan persentase NZ mengurangi sedikit LHV. Hal ini disebabkan oleh karena dekomposisi AF diselesaikan jauh lebih awal pada suhu yang lebih rendah (lihat Gambar 5.2 dan 5.3) sehingga seiring berjalannya waktu NZ tidak bekerja untuk menguraikan selulosa tetapi sedikit menyerap panas dari pembakaran sehingga mengakibatkan LHV sedikit menurun.



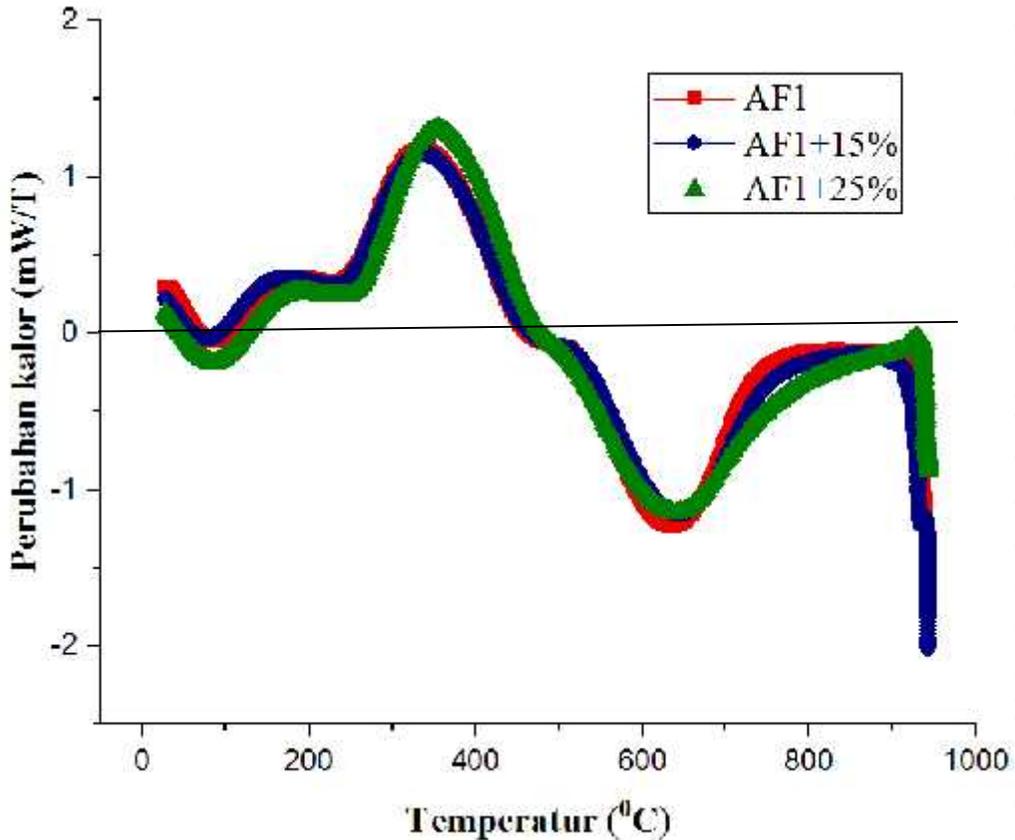
5.2.2 Pengaruh NZ pada komposisi kimia abu

Seperti yang disajikan dalam tabel 5.3 komposisi kimia dalam abu (Wt%) dari perubahan AF atas penambahan NZ. Semua mineral yang bukan komponen dari NZ berkurang. Unsur Ca yang berkontribusi untuk proses aglomerasi dan akhirnya korosi (Pi et.al, 2012) berkurang secara drastis. Si yang meningkat tinggi bersama-sama dengan O karena penambahan NZ yang komponen utamanya terdiri oleh silika dan alumina. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan NZ membuat AF cocok untuk bahan bakar boiler.

5.2.3 Perubahan kalor Pembakaran Akibat Penambahan NZ

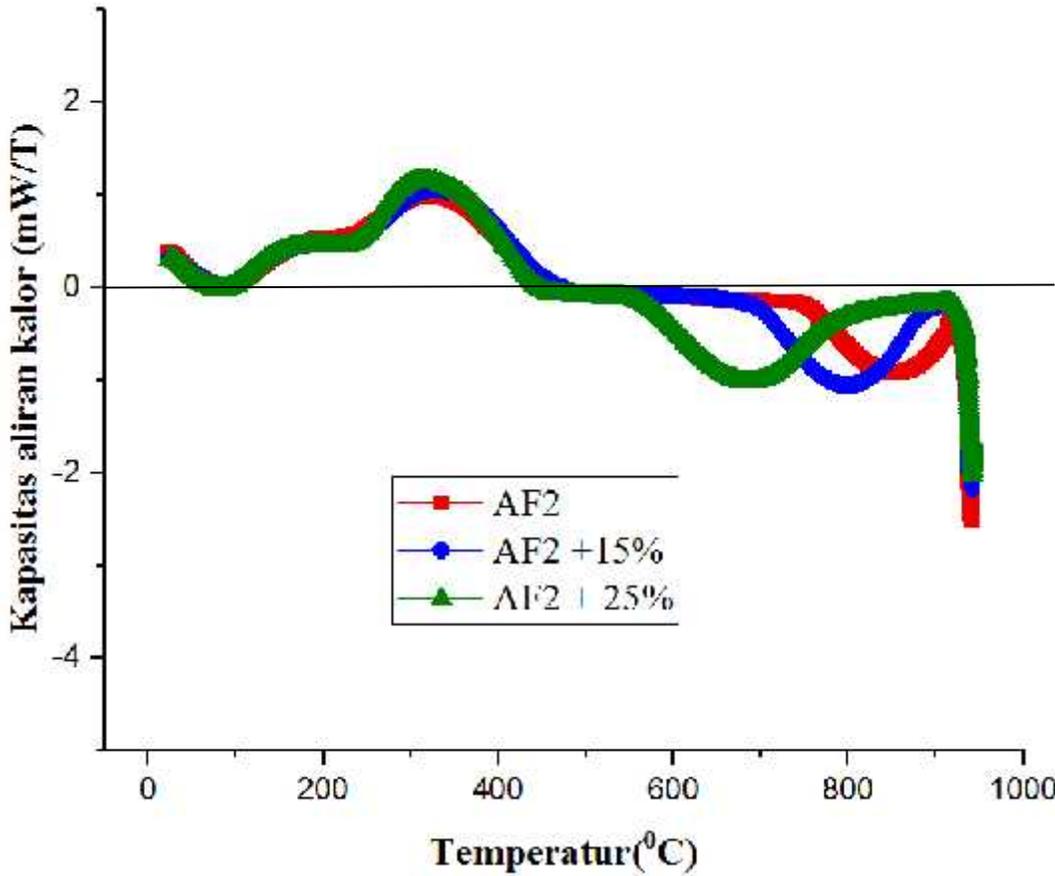
Penambahan NZ mengakibatkan perubahan kalor pembakaran. Pada pembahasan ini akan di perlihatkan grafik – grafik yang menunjukkan bukti perubahan tersebut. Pada gambar 5.14 terlihat bahwa pada penambahan NF pada AF dengan berat yang kecil tidak mempengaruhi perubahan kalor pembakaran. Garis perubahan kalor hampir berdekatan antara AF tanpa penambahan NZ lebih cepat terjadi perubahan (garis merah) sedangkan penambahan 15% hampir sejajar (garis biru). Pada penambahan 25% NZ terjadi penyerapan panas yang lebih banyak oleh NZ yang terlihat saat garis hijau diatas garis nol lebih tinggi daripada garis – garis yang lain.

Pada grafik perubahan kalor garis nol adalah pembatas antara reaksi endoterm dan reaksi eksoterm.



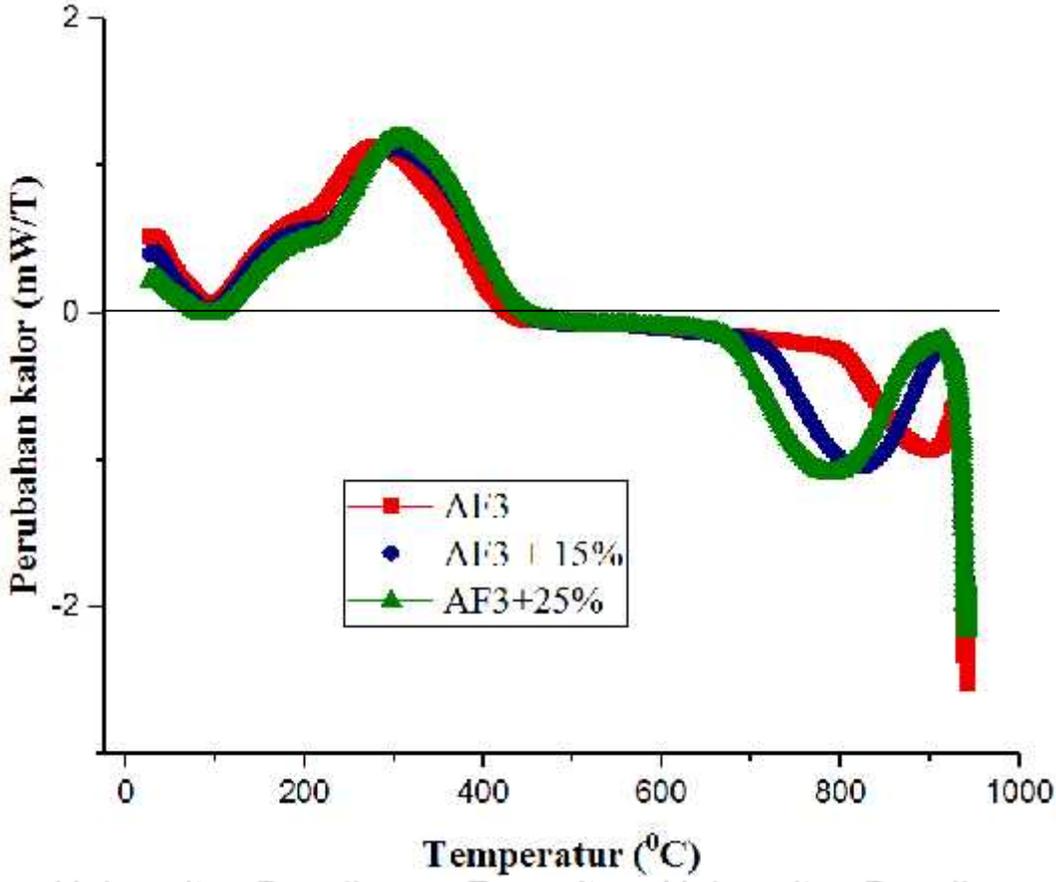
Gambar 5. 104 Grafik perubahan kalor pembakaran AF1

Pada gambar 5.15 terlihat sudah terjadi pengaruh penambahan NZ pada perubahan kalor pembakaran. Saat awal pemanasan terjadi reaksi endoterm yang hampir sama pada semua sampel uji akan tetapi saat mulai terbakarnya *volatile matter* penambahan NZ mulai berpengaruh. Terlihat bahwa AF dengan penambahan 25% NZ (garis hijau) lebih awal terjadi reaksi eksoterm dan diikuti oleh 15% NZ (garis biru) selanjutnya terakhir AF tanpa penambahan (garis merah)



Gambar 5. 115 Grafik perubahan kalor pembakaran AF2

Untuk pembakaran AF3 yang merupakan berat terbesar pada sampel yang diuji, terjadi penyerapan kalor yang lebih lambat dari NZ akan tetapi pelepasan kalor terjadi lebih awal. Terlihat pada gambar 5.16 di atas garis nol sampel AF (garis merah) menyerap kalor lebih dahulu di ikuti oleh AF dengan penambahan NZ sebesar 15% dan selanjutnya AF dengan penambahan NZ sebesar 25%. Penambahan 25% NZ membuat penyerapan kalor terbesar (garis hijau) lebih tinggi daripada garis yang lain. Walaupun penyerapan kalor terbesar oleh penambahan 25% NZ pada akhirnya reaksi eksoterm lebih dahulu terjadi pada sampel ini. Hal ini berarti penyerapan kalor yang lebih besar pada penambahan 25% NZ sudah efektif melepas elektron – elektron alkali dan alkali tanah pada NZ untuk mempengaruhi elektron Oksigen melepaskan ikatan kovalennya di ikatan C – O – C. Pada gambar 5.16 hampir sama seperti gambar 5.15 juga terlihat penambahan 25% menunjukkan tren perubahan kalor yang sama.



Gambar 5.126 Grafik perubahan kalor pembakaran AF3

