

### DAFTAR ISI

Prakata.....	i
Daftar Isi .....	ii
<b>PENGARUH BATIKAN LURUS TERHADAP KOEFISIEN GRIP BAHAN BAN PADA DAN JALAN SEMEN UNTUK KONDISI JALAN KERING DAN BASAH</b> Pramuko Ilmu Purboputro, Muh.Alfatih Hendrawan .....	1-7
<b>MECHANICAL PROPERTIES OF Cu SURFACE IN THE LAMINATED STRUCTURE OF Cr-Cu COATINGS</b> Tri Widodo Besar Riyadi .....	8-14
<b>OPTIMASI PROSES MESIN <i>STRETCH BLOW MOULDING</i> PADA BOTOL 600 ML DENGAN METODE RSM (<i>RESPONSE SURFACE METHODOLOGY</i>) STUDI KASUS DI PT. UNIPLASTINDO INTERBUANA</b> Mochamad Mas'ud .....	15-23
<b>KINERJA TUNGKU GASIFIKASI <i>DOWNDRAFT CONTINUE</i> BAHAN BAKAR SEKAM PADI</b> Subroto.....	24-33
<b>REKAYASA BAHAN KOMPOSIT <i>SANDWICH</i> HIBRID UNTUK STRUKTUR SISTEM PANEL</b> Agus Hariyanto .....	34-43
<b>KARAKTERISTIK PENDIDIHAN DALAM CELAH SEMPIT REKTANGULAR VERTIKAL DENGAN VARIASI TEMPERATUR AWAL PLAT</b> IGN. Bagus Catrawedarma, Indarto dan Mulya Juarsa.....	44-54

## **KATA PENGANTAR**

*Assalamu'alaikum Warohmatullahi Waborakatuh*

*Wassalamu'alaikum Warohmatullohi Wabarokatuh*

Surakarta, Januari 2017

**Redaksi**

# PENGARUH BATIKAN LURUS TERHADAP KOEFISIEN GRIP BAHAN BAN PADA DAN JALAN SEMEN UNTUK KONDISI JALAN KERING DAN BASAH

**Pramuko Ilmu Purboputro, Muh.Alfatih Hendrawan**

Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosuro

*Email : pip272@ums.ac.id*

## ABSTRAK

Penelitian ini adalah penelitian awal yang bertujuan yang pada akhirnya untuk mendapatkan koefisien grip. Pada tahun pertama penelitian ini adalah untuk mendapatkan komposisi bahan yang tepat untuk bahan karet luar ban. Pada tahun kedua penelitian dilanjutkan untuk mendapatkan angka koefisien cengeram (grip) ban.

Metoda yang dilakukan adalah dengan mencampur komponen ban, dengan komposisi yang berbeda. Spesimen tersebut kemudian dilakukan percobaan kekerasan shore dan percobaan keausan. Hasil yang didapat dibandingkan bahan kompon yang sudah ada di pasaran.

Dari hasil penelitian ini didapat dalam pengujian kekerasan *Shore A*, kompon no.3 memiliki nilai kekerasan *shore A* sebesar 77 sedangkan kompon pabrikan hanya memiliki nilai *Shore A* sebesar 71. Untuk kekuatan tarik kompon no.3 mempunyai angka 50,95 kgf atau 499,820 N sehingga menghasilkan keausan kecil dibandingkan dengan kompon yang lain. Keausan kompon pabrikan memiliki nilai keausan yaitu 2,800 mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.1 memiliki nilai keausan yang tinggi yaitu 6,467 mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.2 dan no.3 memiliki nilai keausan masing-masing 5,933mm<sup>3</sup>/detik dan 4,133 mm<sup>3</sup>/detik.

**Kata kunci:** komposit karet, bahan ban luar, kekerasan, keausan.

## ABSTRACT

This study is a preliminary study with the aim is to get a grip coefficient. The aim of the first year is to obtain the right material composition for the outside of the tire rubber material. In the second year, the focus of this tudy is to gain the coefficient value of tires grip.

This study mixes the components of the tire with a different composition. After getting the specimens, shore hardness test and wear test are carried out to them. Then, the test results are compared to the compound material that is already on the market.

This study obtained that in Shore A hardness test, the number 3 compound has a shore A hardness value of 77 while the manufacturing compound only has 71. The number 3 compound has a tensile strength 499.820 N or 50.95 kgf so that it produces little wear compared with the other compounds. The weariness of the manufacturing compound is 2.800 mm<sup>3</sup>/sec, while this number 1 study compound has a high

wearness value which is 6.467 mm<sup>3</sup>/sec. For the number 2 and 3 compounds, they have wearness values 5.933 mm<sup>3</sup>/sec and 4.133 mm<sup>3</sup>/sec respectively.

**Keywords:** rubber composite, outside material of tire, hardness, wearness.

## PENDAHULUAN

Komposisi bahan adalah yang paling berpengaruh langsung terhadap kualitas yang akan dihasilkan. Sampai saat ini karet masih unsur utama dari sebuah ban. Hampir semua ban merupakan produk karet. Ini karena bahan karet tidak cepat menyerap panas. Bahan utama yang digunakan untuk pembuatan ban ini terdiri dari kawat untuk tepi ban (mempengaruhi grip ban. Jenis jalan aspal, semen, batu dank ondisi jalan bead wire), kain ban (terbuat dari tekstile dan jalinan kawat baja), tepung karbon (carbon black), sulfur (belerang) dan kompon [1].

Menurut Riyadhi [2], kompon kareta dalah campuran karet mentah dengan bahan-bahan kimia yang belum divulkanisasi. Proses pembuatan kompon adalah pencampuran antara karet mentah dengan bahan kimia karet (bahan aditif). Karet sintetis adalah karet yang berasal dari hasil samping pengolahan minyak bumi yang kemudian melalui reaksi polimerisasi menjadi suatu material baru yang sifatnya mendekati sifat karet alam. Bahan kimia yang digunakan untuk meningkatkan sifat fisis karet dalam pembuatan kompon adalah bahan anti degran, *filler* (bahan pengisi), Anti oksidan, bahan pelunak dan bahan kimia lainnya. Ban kendaraan terbuat dari karet karena sifatnya yang lentur dan elastis. Elastis adalah keadaan benda dimana jika ditekan akan kembali kebentuk semula.

Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan dalam bidang kompon telah mengungkapkan bahwa penggunaan belerang 30- 50 phr secara garis besar dapat menaikkan tegangan putus dan kekerasan karet ebonit. Sedangkan penggunaan riklim sampai dengan 40 phr atau perbandingan RSS sampai dengan 60/40 dapat meningkatkan sifat tegangan putus dan kekerasan karet ebonit. Baik penggunaan belerang 30-50 phr maupun penggunaan riklim 20-40 menghasilkan perpanjangan putus yang tetap. Komposisi karet ebonit optimum dicapai pada penggunaan belerang 30 phr. Dengan ini maka semakin tinggi prosentase penambahan belerang akan mengakibatkan peningkatan sifat tegangan putus dan kekerasan pada karet ebonit [3].

Grip dapat ditingkatkan dengan dua cara yaitu meningkatkan gaya vertikal dan meningkatkan koefisien gesek antara ban dan aspal. Karena permukaan aspal adalah besaran konstan yang tidak bisa diubah, satu-satunya cara memperbaiki koefisien gesek adalah dengan mempebaiki kualitas kompon ban. Koefisien gesek kompon ban ini fungsi dari temperatur. Kondisi terbaik biasanya dicapai kompon ban pada temperatur antara 85°C sampai 100°C. Kualitas kompon juga tergantung dari jenis karetnya. Semakin keras kompon biasanya kualitas gripnya menurun, tetapi ketahanan terhadap ausnya meningkat. Kondisi ideal tentu saja apabila para pabrikan ban bisa membuat kompon yang keras tetapi mempunyai grip yang baik [4].

Amrani, dkk, 2009 [5] mempelajari pengaruh komposisi dan teknik penambahan filler carbon black (CB) terhadap sifat tensile dan morfologi dalam campuran natural rubber/ polypropylene (NR/PP). Hasil yang didapat adalah penggunaan *Two Roll-Mixer* dapat meningkatkan sifat tensile campuran NR/PP. Kesamaan dengan peneliti adalah pada alat yang digunakan yaitu peralatan untuk pembuatan kompon karet, yaitu *Two-roll Mixing Mill*. Kesamaan bahan yang dipakai adalah penggunaan karet alam. Karet alam yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis SIR-20 dengan *Money Viscosity* 70 pada 100°C. Sedangkan

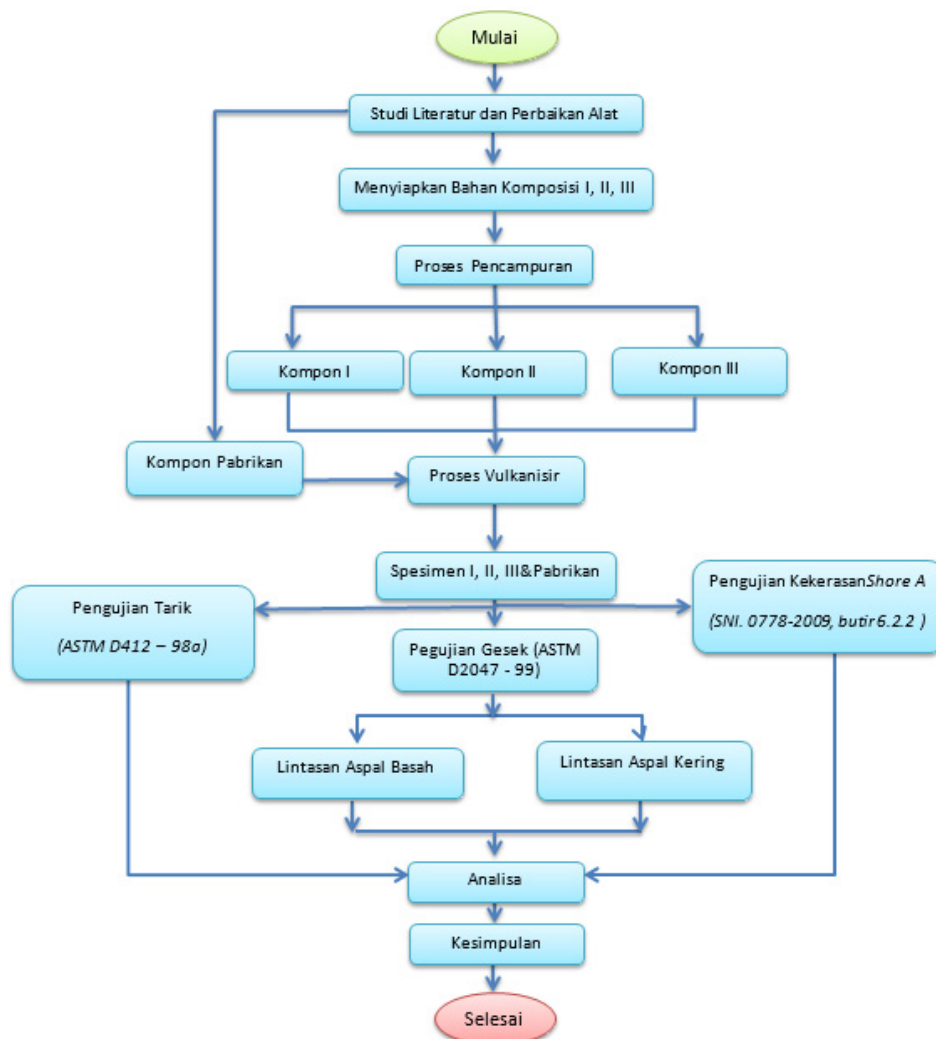
penulis karet alamnya adalah natural rubber jenis RSS. filler CB dimana CB dan NR dicampur terlebih dahulu.

Untuk menaikkan koefisien gesek maka perlu diperbaiki kualitas dari komposisi kompon ban dengan memadukan kompon dengan sulfur dan karbon hitam [2] untuk memperoleh hasil yang diinginkan

## METODOLOGI PENELITIAN

### Rancangan Penelitian

Dalam rancangan penelitian ini akan dijelaskan dalam diagram alir Gambar 1. Adapun rancangan penelitian diterangkan dalam diagram alir.

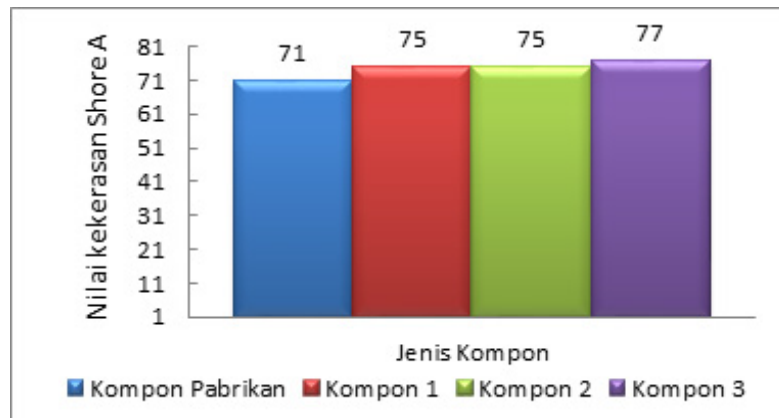


Gambar 1. Skema Diagram Alir Penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Studi Uji Kekerasan rata-rata

Di bawah ini adalah tabel yang memuat hasil dari pengujian kekerasan yang telah dilakukan dengan standar metode uji SNI. 0778-2009, butir 6.2.2 sebagai berikut.

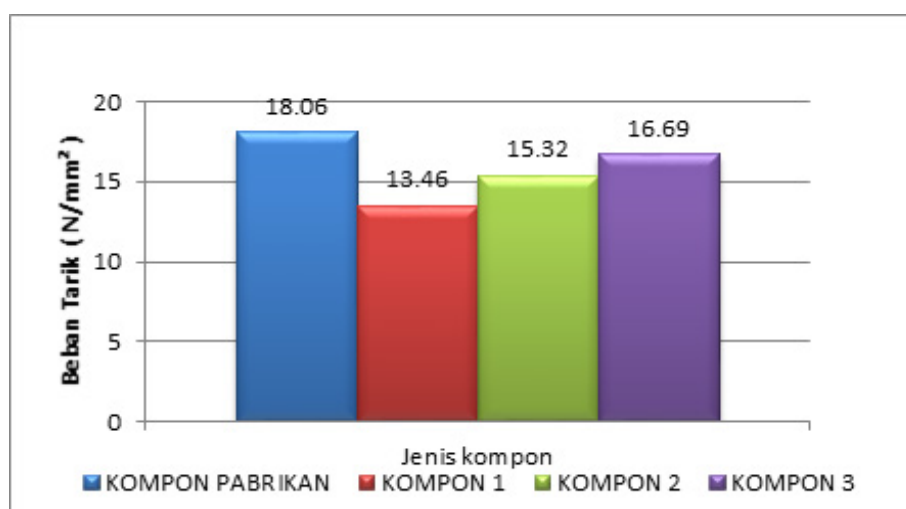


**Gambar 2. Histogram Hubungan Antara Kompon terhadap nilai kekerasan Shore A**

Histogram hubungan antara Jenis kompon terhadap nilai kekerasan Shore A dengan Standar metoda uji SNI. 0778 – 2009, butir 6.2.2. Didapatkan hasil sebagai berikut: nilai kekerasan untuk Kompon Pabrikan sebesar 71, nilai kekerasan Kompon Buatan no.1 sebesar 75, nilai kekerasan Kompon Buatan no.2 sebesar 75 dan nilai kekerasan kompon Buatan no.3 sebesar 77. Maka dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kompon buatan 1,2 dan 3 memiliki nilai kekerasan diatas kompon pabrikan sedangkan dari ke-empat hasil pengujian didapatkan hasil yang terendah pada kompon pabrikan dan tertinggi yaitu pada kompon buatan no.3 dengan nilai kekerasan 77. Hasil pengujian kekerasan kompon buatan diatas menunjukkan bahwa semakin besar prosentase penambahan sulfur akan mengakibatkan kompon semakin keras (setyowati, dkk, 2004). Sedangkan yang terjadi pada kompon pabrikan kemungkinan penambahan sulfur lebih sedikit dibandingkan dengan kompon buatan.

### Hasil Uji Tarik

Berikut ini yaitu tabel yang memuat hasil dari uji tarik dengan standar ASTM yang telah dilakukan.



**Gambar 3. Histogram Hubungan Antara Jenis Kompon terhadap Nilai Beban Tarik**

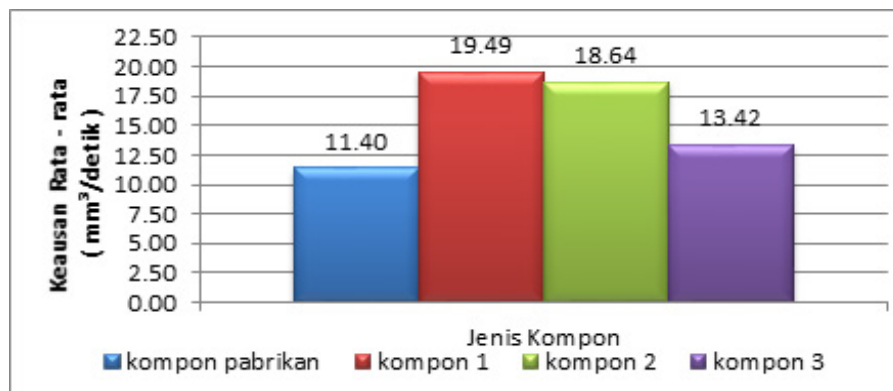
Histogram hubungan antara jenis kompon terhadap nilai beban tarik didapatkan hasil studi dengan penjabaran sebagai berikut : untuk hasil uji tarik kompon Pabrikan didapatkan

beban tarik rata-rata 55,3 kgf atau 542,493 N, rata-rata beban per satuan luas sebesar 18,059 N/mm<sup>2</sup> dan pertambahan panjang rata-rata sebesar 13 mm dari panjang awal 160 mm. Kompon Buatan no.1 didapat beban tarik rata-rata 41,1 kgf atau 403,191 N, rata-rata beban per satuan luas sebesar 13,448 N/mm<sup>2</sup> dan pertambahan panjang rata-rata sebesar 6,25 mm dari panjang awal 160 mm. Untuk Kompon Buatan no.2 didapat beban tarik rata-rata 46,9 kgf atau 460,089 N, rata-rata beban per satuan luas sebesar 15,320 N/mm<sup>2</sup> dan pertambahan panjang rata-rata sebesar 8,75 mm dari panjang awal 160 mm. Sedangkan Kompon Buatan no.3 didapat beban tarik rata-rata 51,0 kgf atau 500,31 N, rata-rata beban per satuan luas sebesar 16,685 N/mm<sup>2</sup> dan pertambahan panjang rata-rata sebesar 10,75 mm dari panjang awal 160 mm.

Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa dari pengujian tarik kompon buatan no.1, 2, 3 dan kompon pabrikan untuk beban tarik rata-rata terkecil pada kompon buatan no.1 dengan 41,1 kgf atau 403,191 N dan tertinggi pada kompon pabrikan dengan beban tarik rata-rata 55,3 kgf atau 542,493 N. Untuk rata-rata beban per satuan luas terkecil pada kompon buatan no.1 sebesar 13,448 N/mm<sup>2</sup> dan yang terbesar pada kompon buatan sebesar 18,059 N/mm<sup>2</sup>. Sedangkan untuk pertambahan panjang rata-rata terkecil pada kompon buatan no.1 sebesar 6,25 mm dan terbesar pada kompon buatan sebesar 13 mm. Penambahan *filler black carbon* secara signifikan dapat meningkatkan sifat *tensil*, hasil didukung penelitian sebelumnya oleh Amraini, dkk (2009) dengan judul penelitiannya “Pengaruh Filler Carbon Black Terhadap Sifat dan Morfologi Komposit Natural Rubber/Polypropylene”.

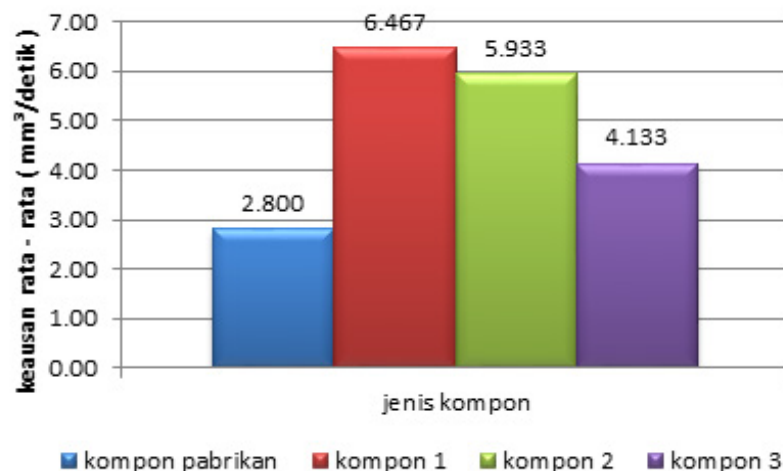
### Hasil Uji Gesekan pada Aspal

Di bawah ini merupakan tabel yang memuat data tingkat keausan produk kompon yang telah dilakukan pengujian gesek pada lintasan aspal dalam kondisi lintasan kering



Gambar 4. Histogram hubungan antara jenis kompon terhadap tingkat Keausan rata-rata pada kondisi kering

Dalam pengambilan data Pengujian gesek lintasan kering, kompon pabrikan memiliki nilai keausan terendah yaitu 11,40 mm<sup>3</sup>/detik. Pada pengujian yang sama, kompon buatan no.1 tertinggi sebesar 19,49mm<sup>3</sup>/detik dan kompon buatan no.2 memiliki nilai keausan 18,64 mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.3 memiliki nilai keausan yang melebihi kompon pabrikan yaitu 13,42 mm<sup>3</sup>/detik.



Gambar 5. Histogram hubungan antara jenis kompon dengan Keausan rata-rata pada kondisi basah

Pada pengujian gesek dimana lintasan dalam keadaan basah sesuai tabel 6 dan gambar 32. histogram tingkat keausan pada lintasan basah, kompon pabrik memiliki nilai keausan yaitu 2,800mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.1 memiliki nilai keausan yang tinggi yaitu 6,467 mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.2 dan no.3 memiliki nilai keausan masing-masing 5,933mm<sup>3</sup>/detik dan 4,133 mm<sup>3</sup>/detik.

Hasil pengujian gesek pada lintasan kering lebih besar daripada gesekan yang terjadi pada lintasan dalam kondisi basah, hal ini selain dipengaruhi oleh variasi formula kompon juga dipengaruhi oleh suhu lintasan yang lebih rendah ketika lintasan terkena semprotan air. Dalam pengujian dua buah elemen yang digesekan kemudian diberi fluida diantara keduanya maka fluida tersebut akan mengakibatkan berkurangnya gaya gesek dan menghambat kenaikan suhu. Suhu yang tinggi akan mengakibatkan karet menjadi lebih lunak sehingga menjadikannya cepat aus.

Hasil pengujian kekerasan kompon buatan diatas menunjukkan bahwa semakin besar prosentase penambahan sulfur akan mengakibatkan kompon semakin keras (setyowati, dkk, 2004). Sedangkan yang terjadi pada kompon pabrik kemungkinan penambahan sulfur lebih sedikit dibandingkan dengan kompon buatan. Penambahan *filler black carbon* secara signifikan dapat meningkatkan sifat *tensil*, hasil didukung penelitian sebelumnya oleh Amraini, dkk (2009) dengan judul penelitiannya “Pengaruh Filler Carbon Black Terhadap Sifat dan Morfologi Komposit Natural Rubber/Polypropylene”.

Kemudian Pada pengujian gesek lintasan Aspal kondisi basah, kompon yang menghasilkan *koefisien grip* paling tinggi yaitu kompon Pabrik dengan nilai *koefisien grip* sebesar 0,576 sedangkan dari ketiga kompon buatan yang paling mendekati yaitu kompon no.3 dengan 0,574. *Koefisien grip* yang terjadi pada lintasan Aspal basah lebih kecil dari pada *koefisien* yang dihasilkan oleh lintasan Aspal yang kering, Hal ini dikarena adanya lapisan air pada kedua sisi yang bergesekan mempengaruhi suhu serta mengurangi daya rekat kompon terhadap lintasan.

## KESIMPULAN

Dari studi yang dilakukan penulis apat menarik kesimpulan, yaitu :

1. Dalam pengambilan data studi penelitian ini, didapatkan hasil bahwa kompon buatan no.1 dengan variasi karbon black 50 phr atau 29,67gr dan sulfur 3 phr atau 1,78 gr



menghasilkan nilai koefisien gesek kompon pabrikan yaitu 0,589 pada lintasan kering dan 0,575 pada lintasan basah. Sedangkan dalam pengujian kekerasan *Shore A* Kompon no.3 memiliki nilai kekerasan *shore A* 77 sedangkan kompon pabrikan hanya memiliki nilai *Shore A* 71. Untuk kekuatan tarik kompon no.3 mempunyai angka 50,95 kgf atau 499,820 N sehingga menghasilkan keausan kecil dibandingkan dengan kompon yang lain.

2. Keausan kompon pabrikan memiliki nilai keausan yaitu 2,800mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.1 memiliki nilai keausan yang tinggi yaitu 6,467 mm<sup>3</sup>/detik. Sedangkan kompon buatan no.2 dan no.3 memiliki nilai keausan masing-masing 5,933mm<sup>3</sup>/detik dan 4,133 mm<sup>3</sup>/detik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wikipedia, (2012), diakses dari <http://www.google.com>
- [2] Riyadhi, Adi, 2008, *Vulkanisasi karet*. Diakses tanggal 20 juli 2013 jam 19.15 dari: [http://www.chem-is-try.org/artikel\\_kimia/kimia\\_material/vulkanisasi\\_karet/](http://www.chem-is-try.org/artikel_kimia/kimia_material/vulkanisasi_karet/)
- [3] Setyowati, Peni, Rahayu Sutarti, Supriyanto, 2004, *Karakteristik Karet Ebonit Yang Dibuat Dengan Berbagai Variasi Rasio RSS I/ Riklim dari Jumlah Belerang*, Jurnal Majalah Kulit, Karet dan Plastik, Vol 20. Yogyakarta.
- [4] Daroyni Roy, 2008, *Formula One Technology*. Diakses dari: <http://f1-technology.blogspot>.
- [5] Amrani, Said Yul, Ida Zahrina, Baharudi, 2009, *Pengaruh Filler Carbon Black Terhadap Sifat dan Morfology Komposit Natural Rubber/Polypropilene*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, Vol 9. Pekanbaru

## MECHANICAL PROPERTIES OF Cu SURFACE IN THE LAMINATED STRUCTURE OF Cr-Cu COATINGS

Tri Widodo Besar Riyadi

Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura, Surakarta, Indonesia 57102  
*Email : Tri.Riyadi@ums.ac.id*

### ABSTRACT

A laminated structure of Cr-Cu coating was produced by electroplating on a carbon steel substrate. Two baths of chromium and copper electrolyte solutions were prepared to respectively deposit Cr and Cu as the first and second layer. The Cr was plated using the same plating time of 60 minutes, whereas Cu was deposit using plating time of 1 hour, 1.5 hours, 2 hours, 3 hours and 3.5 hours. The effect of plating time on the thickness, hardness and specific wear rate of the Cu surface was investigated. The formed phase, thickness, hardness and specific wear rate of the Cu surface were observed using XRD, optical microscope, Vickers microhardness tester and Ogoshi wear rate tester, respectively. The results show that Cu was formed on the surface. An increase of the Cu plating time increased the thickness and the specific wear rate of the Cu surface, but reduced the hardness of Cu surface. Cu layer was observed denser than that of Cr. This study showed that the use of Cu can be a potential candidate to laminate Cr for use in corrosive environment.

**Keywords:** Cr-Cu, Plating time, Hardness, Specific wear rate

### INTRODUCTION

Hard chromium coatings have long been considered as the most used electrodeposited coatings in several industrial applications such as in petro chemistry, oil and gas industries. This is due to the advantageous properties of chromium coatings such as high hardness, low coefficient of friction, high wear and corrosion resistance [1, 2]. The use of components applying chromium coatings for long storage, as long as million years, in nuclear fuel container, however, requires a property enhancement for corrosion barrier.

In recent years, the use of copper as an exterior coating for corrosion barrier has been considered by several researchers in nuclear waste management [3]. Corrosion may occur by a range of mechanisms such as by localized stress generating cracking, microbial influenced, radiation induced and even atmospheric corrosions. Copper is a well proven corrosion resistance and antimicrobial material which can be used in such corrosive environment. The use of copper as coating can offer a good protection for a touch surface for very long time since it possesses good mechanical properties like scratch resistance and microhardness [4]. Under a maximum shearing stress, a scratch can develop into void or deep crack which subsequently cause a spalling of the coating parts. These damages are unacceptable for component used in corrosive environment since it can lead to the degradation of the mechanical properties of the base metal [5]. Copper is a soft metal which has attracted many attentions for use as under or upper layer of the hard chromium coatings.

Laminating the structures of chromium coating by copper has attracted many attentions because such structures can be used to modify the surface properties [2]. The concept of a

chromium-copper coating is very attractive and its development is required to ensure that the process is technologically feasible and meets the requirements of the safety case. It is therefore necessary to conduct extensive experimental works of the coatings to withstand relevant environmental conditions for long periods of time. The objective of this work was to investigate the electroplating process of a laminated structure of Cr-Cu layer on a carbon steel substrate. The effect of plating times on the thickness, hardness and specific wear rate of the product were observed.

## EXPERIMENTAL PROCEDURE

The substrate used in the present work was obtained by cutting a long bar of carbon steel ST 40 into a sample with diameter of 16 mm and 3 mm thickness. Preparation stages were carried out prior to electroplating process using grinding by silica papers, polishing and cleaning in an ultrasonic cleaner. Two baths of chrome and copper electrolyte solutions were prepared to deposit Cr and Cu layers, as used in our previous works [6, 7]. The chrome layer was firstly deposited on the steel following by the copper which was subsequently plated as the upper layer. The electrolyte solution used for plating chrome contains chromic acid 250 g/l, sulphuric acid 2.5 g/l, and kalium cyanide KC-15 10 g/l, whereas the electrolyte solution used for copper plating was copper sulphate (20 g/l  $\text{CuSO}_4$ ) and aquadest. The plating time of Cr layer were kept constant at 60 minutes, whereas the plating time of copper was varied using 1 hour, 1.5 hours, 2 hours, 3 hours and 3.5 hours.

The identification of the phase formation on the surface of the electroplated products was observed by XRD. The measurement of the thickness of each layer was carried out after the samples were polished using standard metallographic techniques. The cross sectional appearance of the products was recorded using an optical microscope. The hardness measurement of the surface plating, conducted on the Cu surface, was measured using a Vickers microhardness tester (type TTS unlimited HWMMT-X7) with diamond pyramid ( $136^\circ$ ) using a load of 50 gf and penetration time of 10 second. The mean hardness, its standard deviation and standard error were recorded to the 5 times measurements in arbitrary positions on the Cu surface. The wear test was carried out using Ogoshi high speed universal wear testing machine with a gear ratio of 70/40, a load of 3.18 kg, revolving disc thickness of 3 mm and revolving time of 30 seconds.

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the XRD pattern scanned on the top surface of the sample. Some observed peaks of the XRD pattern show that only Cu phase was formed on the surface of the sample. There was no Cr phase which can be identified. This indicates that the two steps of electroplating process of Cr and Cu have generated a laminated structure of Cr-Cu instead of a chrome-copper alloy. The sharp peaks detected on the XRD pattern should indicate that the Cu has a crystalline structure.

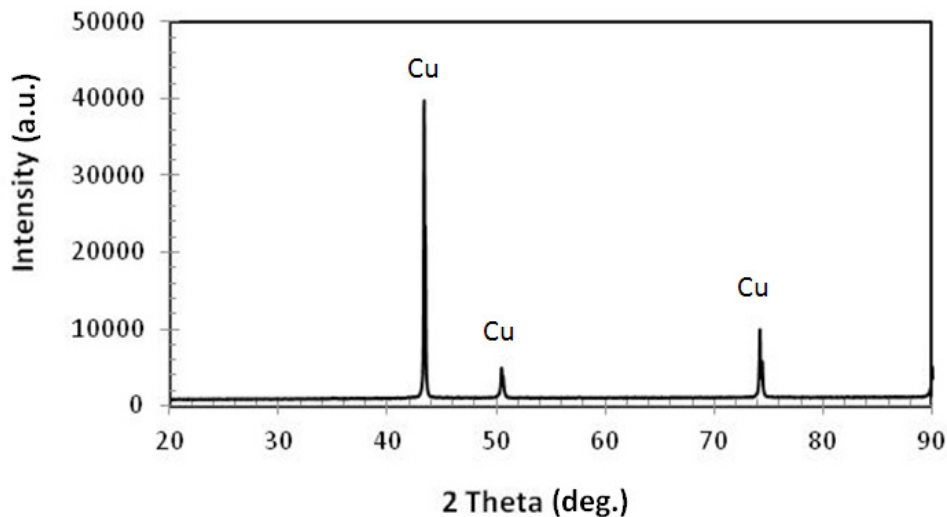


Figure 1. XRD pattern observed on the Cu surface

Figure 2 shows the cross sectional feature obtained by optical microscopes. The figure gives clear evident on the composition of the laminated structure of Cr-Cu and their thicknesses. The steel substrate was in grey colour, the chromium layer was in black one, and the copper located at the upper layer was in bright colour. Since the experimental work was carried out to produce a laminated structure of Cr-Cu with different plating time of Cu deposition, their thickness was varied. Figure 3 shows the thickness of Cr and Cu, where Cr layer in all samples was deposited using 60 minutes, whereas the Cu layer in the sample 1,2,3,4 and 5 was deposited using different plating times of 1 hour, 1.5 hours, 2 hours, 3 hours and 3.5 hours. The result shows that the thickness of chromium layer which was deposited using the same plating time of 60 minutes was almost the same in the range of 36.7 to 44.7  $\mu\text{m}$ . A little discrepancy of the Cr thickness might be caused by uncertainty of the measurement location due to the unevenness layer produced by electroplating. Whereas, the thickness of Cu layer measured on five samples with different plating times indicates that an increase of Cu plating time has linearly increased the thickness of Cu from 48.1 to 74.3  $\mu\text{m}$ . Comparing the morphology of the Cr and Cu layer observed from the figure, it can be shown that Cu layer is much denser than that of Cr. The use of a dense structure for the corrosive environment is much acceptable since the layer can halt the infiltration of gas from its atmosphere.

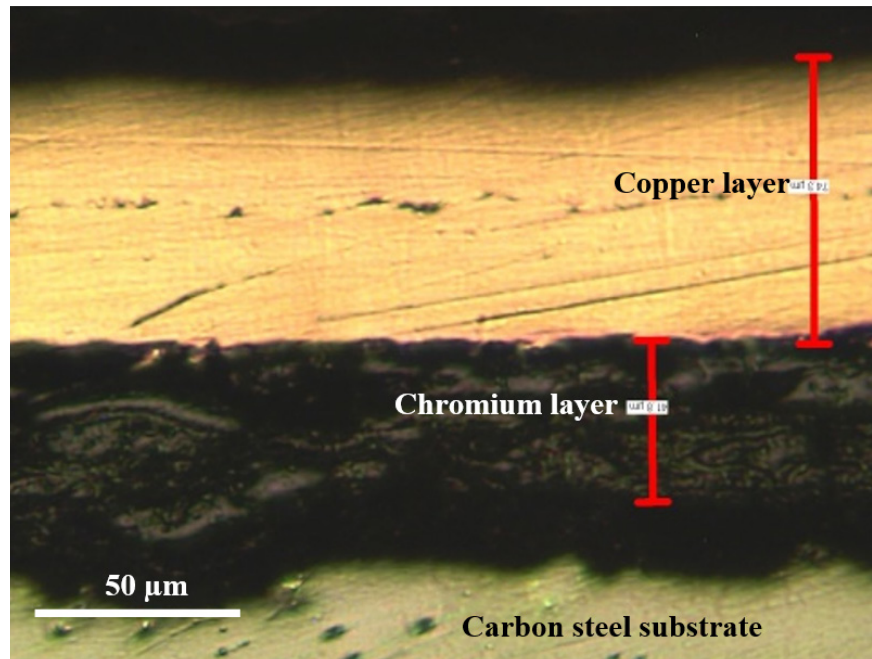


Figure 2. Cross section of Cr and Cu layer in the laminated Cr-Cu coatings

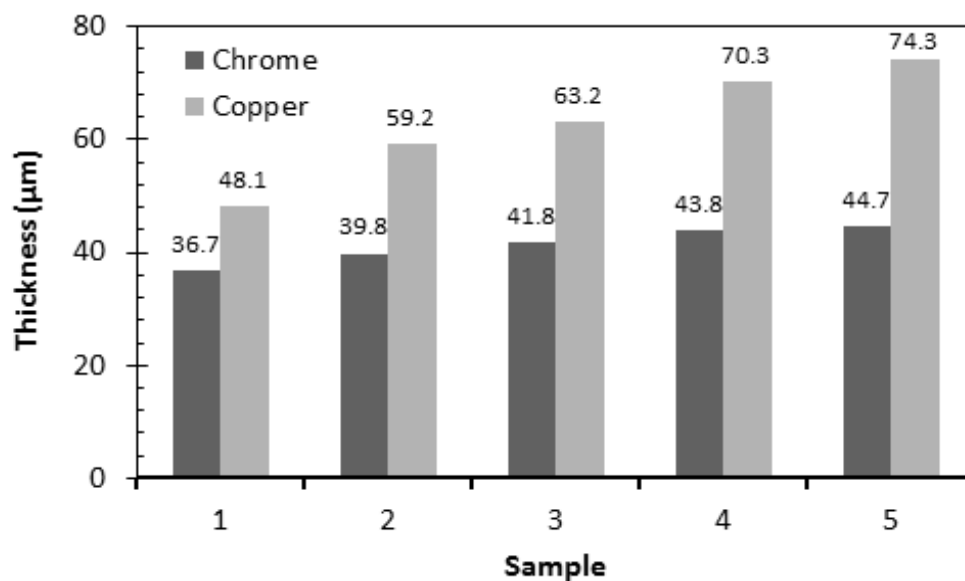


Figure 3. Thickness of Cr-Cu layers: all Cr plated by 60 minutes, Cu plated by (1) 1 hour, (2) 1.5 hours, (3) 2 hours, (4) 3 hours, (5) 3.5 hours

Figure 4 shows the microhardness of the Cu deposit with respect to the plating times. The result shows that the mean hardness of the plated Cu decreased significantly from 126.13 to 58.40 HV as the increase of the plating time from 1 to 3.5 hours. The increase of the plating time from 1 to 1.5 hours has sharply decreased the hardness of Cu surface from 126.13 to 87.40 HV. However, the hardness of Cu surface stayed in a plateau with an increase of plating time from 2 to 3 hours. Further increase of the plating time reduced the hardness of Cu. The decrease of the Cu hardness indicates that the internal stress in the Cu layers gets lower. Since the measurement of the hardness was conducted on the surface, the decrease of Cu hardness was also attributed to the reduced influence of the chrome hardness

which located below the Cu layer. In all samples, the hardness of Cu layer was much lower than that of the chrome layer, where the chrome hardness obtained by our previous study was 181.1 HV in average. This indicates that the internal stress in the Cu plating is lower than that of the Cr layer. A decrease of an internal stress is benefit to avoid the possibility of crack generation resulting in a better corrosion resistance during its long operation.

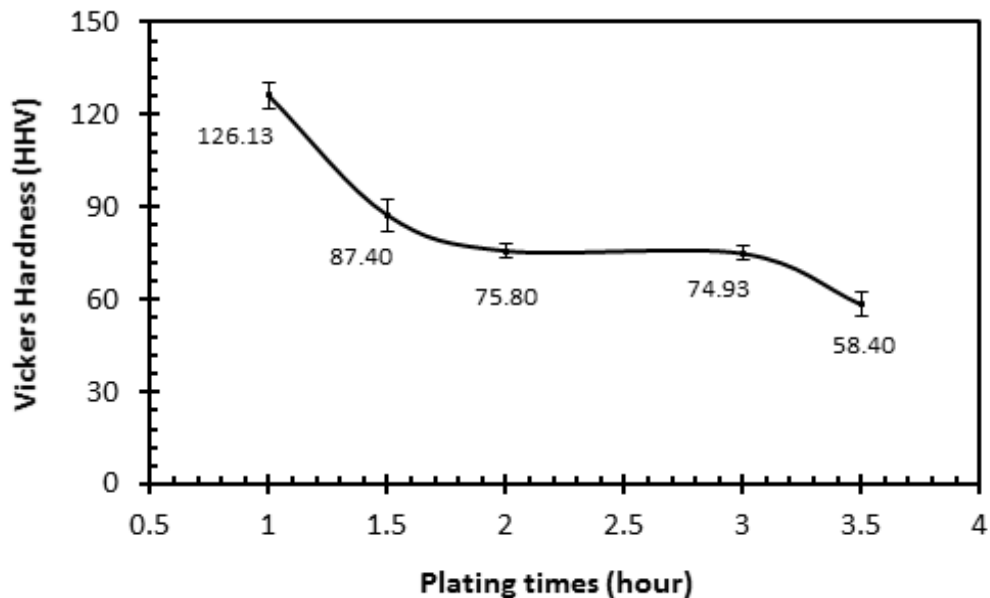


Figure 4. Hardness measured on Cu surface in the laminated Cr- Cu coatings with respect to Cu plating times

Figure 5 shows the specific wear rate observed on the Cu layer deposited using different plating times of 1 hour, 1.5 hours, 2 hours, 3 hours and 3.5 hours. The result of the wear test shows that the specific wear rate increased nearly linearly from  $3.33 \times 10^{-4}$  to  $4.8 \times 10^{-4}$   $\text{mm}^3/\text{kg.m}$  as the increase of the plating times from 1 hour to 3.5 hours. The result of this study indicates that the wear volume of the Cu surface increased as the increase of the Cu thickness. This might be related to the reduced hardness of the surface as the increase of the plating time. The wear resistance of the Cu surface therefore reduced with the increase of the plating times, as also occurred with the hardness of the Cu surface.

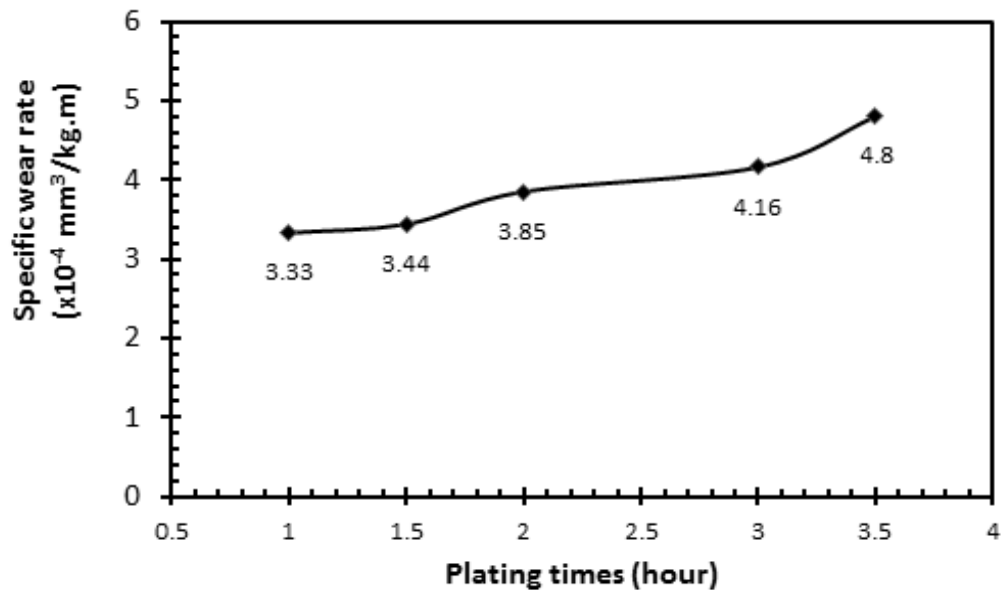


Figure 5. Specific wear rate observed on Cu surface in the laminated Cr-Cu coatings

## CONCLUSIONS

A laminated structure of Cr-Cu was successfully deposited using electroplating process with the same plating time of Cr and different plating times of Cu. The formation of Cu layer in the upper layer was confirmed by XRD test. The micrograph observed on the cross sectional area of the samples showed that an increase in the Cu plating times increased the thickness of Cu layer. The thickness increase of Cu layer produced a decrease in the hardness and an increase of the specific wear rate of the Cu surface. A dense structure accompanied by a decrease of the Cu hardness offered good corrosion resistance coatings.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the ‘Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM)’, the ministry of research and technology for higher education (Kemenristekdikti), the Government of Indonesia, and LPPM Universitas Muhammadiyah Surakarta for supporting the research funding. Special thanks would also dedicate to my student Yusuf Nur Afandi who has spent much of his time to help some experimental works.

## REFERENCES

- [1] Ching An Huang, Chao Yu Che. *Hardness variation and annealing behavior of a Cr-Ni multilayer electroplated in a trivalent chromium-based bath.*, Surface & Coatings Technology, pp. 203, 3320–3324, 2009.
- [2] Ching An Huang, Chao Yu Chen, Chun Ching Hsua and Chao Sung Lin. *Characterization of Cr-Ni multilayers electroplated from a chromium(III)-nickel(II) bath using pulse current.*, Scripta Materialia, pp. 57, 61–64, 2007.
- [3] P. G. Keech, P. Vo, S. Ramamurthy, J. Chen, R. Jacklin and D. W. Shoesmith, *Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel*, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 49 No. 6, pp. 425-430, 2014.
- [4] Jiaping Zhang, Xiaomei Feng, Yifu Shen, Cheng Chen, and Cuiyuan Duan, *Microstructures and properties of Cr-Cu/W-Cu bi-layer composite coatings prepared*

- by mechanical alloying*, International Journal of Materials Research 107, 6, 544-552, 2016.
- [5] E. Menthe, K. T. Rie, *Plasma nitriding and plasma nitrocarburizing of electroplated hard chromium to increase the wear and the corrosion properties*, Surface and Coatings Technology, pp. 112, 217–220, 1999.
- [6] Masyrukan, Tri Widodo Besar Riyadi, Bibit Sugito, dan Yudit Novianto, *Effect of Immersion Time on the Defect Formations and Properties of the Electroplating Chrome*, Proceeding of The 2<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Technology and Industrial Application (ICETIA 2015), Engineering for Creative Industry, page 111-115, 15 Oktober 2015.
- [7] Tri Widodo Besar Riyadi, Masyrukan, Bibit Sugito, dan Tri Widodo, *Pengaruh Waktu Tahan Celup Terhadap Nilai Kilap dan Ketebalan Lapisan Tembaga pada Proses Elektroplating Baja Karbon Tinggi*, Media Mesin, Vol. 15 No. 2 hal. 87-92, Juli 2014.



# OPTIMASI PROSES MESIN *STRETCH BLOW MOULDING* PADA BOTOL 600 ML DENGAN METODE RSM (*RESPONSE SURFACE METHODOLOGY*) STUDI KASUS DI PT. UNIPLASTINDO INTERBUANA

**Mochamad Mas'ud**

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin  
Universitas Yudharta Pasuruan  
Email: [masud.teknik@yudharta.ac.id](mailto:masud.teknik@yudharta.ac.id)

## ABSTRAK

Pada proses produksi Aqua botol plastik 600 ml menggunakan mesin *stretch blow moulding* dengan sistem pneumatik, Pembuatan produk dengan menggunakan mesin ini memiliki faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kualitas botol yang dihasilkan . Penyimpangan ukuran (pemerataan tebal botol dan kemiringan botol) tidak sesuai dengan spesifikasi mengakibatkan botol dibagian pundak putih dan bergelang (*shrinkage*). Tujuan dari penelitian ini yaitu mengoptimalkan *setting* parameter mesin *stretch blow moulding* agar menghasilkan kualitas baik pada produk botol plastik 600 ml. Adapun variable(prediktor) yang di pilih yaitu *preblow (bar)*, *preform temperature (°C)*, dan *P1 point (mm)*, sedangkan respon yang dicari yaitu kemiringan minimal dan tebal maksimal. Metode yang di gunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan *Response Surface Methodology (RSM)* yang mana dalam perhitungannya menggunakan *software minitab 16*. Dengan menggunakan *Box Behnken Design* dan *3 level factorial* di hasilkan run 15 percobaan. Berdasarkan hasil kondisi yang optimal parameter yaitu *preblow* sebesar 6,5 bar, *preform temperature* sebesar 114 , dan *P1 Point* sebesar 25 mm. Dengan *setting* sebesar tersebut akan menghasilkan respon tebal botol sebesar 0,1446 dan kemiringan botol sebesar 0,1875.

**Kata kunci** : *Stretch blow moulding*, *setting parameter* dan optimasi proses

## ABSTRACT

In the 600 ml plastic bottles Aqua production process using machine *stretch blow molding* with the pneumatic system, creation of products using these machines have factors that can affect the quality of the bottles produced. Deviations size (thickness equalization bottle and tilt the bottle) does not comply with the specifications resulting bottle of white and a flanged shoulder section (*shrinkage*). The purpose of this study is to optimize the parameter settings *stretch blow molding* machine to produce a good quality product plastic bottle of 600 ml. The variables (predictors) were selected namely *preblow (bar)*, *preform temperature (°C)*, and *P1 point (mm)*, while the response is sought, namely the slope minimum and maximum thickness. The method used in this research is using *Response Surface Methodology (RSM)* which in its calculations using *Minitab software 16*. By using the *Box Behnken Design* and *3-level factorial* experiment produced 15 runs. Based on the results of the parameters are optimal conditions *preblow* of 6.5 bar, *preform temperature* of

114 °C, and P1 Point by 25 mm. By setting will produce a response of thick bottle and tilt the bottle at 0.1446 at 0.1875.

**Keywords** : Stretch blow molding, setting parameter, optimazation process

## PENDAHULUAN

Terjualnya suatu produk dipasaran dapat dipengaruhi oleh beberapa hal salah satunya yaitu ditentukan dari kemasannya. Kemasan yang buruk dapat menyebabkan gangguan terhadap keberadaan atau kualitas suatu produk. Sebaliknya jika kemasan baik maka akan lebih menjamin kualitas produk tersebut. Kemasan suatu produk menjadi sangat berperan penting karena fungsi dari kemasan tersebut adalah melindungi isi produk supaya aman sehingga dapat dijual di pasaran.

Kemasan dari bahan plastik dapat dibuat atau dicetak menjadi bentuk yang bermacam-macam, salah satunya adalah dalam bentuk botol. Botol plastik juga dapat diberi label atau diberi pewarnaan yang bagus sehingga dapat memperkuat ketertarikan konsumen terhadap produk. Salah satu proses pembuatan botol plastik di PT.Uniplastindo Interbuana yaitu dengan cara peniupan menggunakan kekuatan udara, proses ini disebut dengan proses stretch blow molding. Pembuatan produk dengan menggunakan mesin ini memiliki faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kualitas botol yang dihasilkan yaitu: temperatur preform (°C), preblowing (bar), p1 point (mm). Pengaturan faktor-faktor tersebut selama ini belum memberikan hasil yang memuaskan (banyak penyimpangan ukuran dari target yang ditentukan) sehingga perlu ditetapkan pengaturan (setting) mesin supaya optimum. Variabel kualitas botol plastik dapat diukur dengan variabel-variabel antara lain : pemerataan tebal botol dan kemiringan botol.

Penelitian yang dilakukan adalah mengamati produk aqua 600 ml. Alasan pemilihan produk ini adalah masih terdapat produk yang keluar dari spesifikasi kualitas yang diharapkan oleh perusahaan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan ukuran kualitas yang tepat dan proses yang kapabel.

## LANDASAN TEORI

### Plastik dan Mesin *Stretch Blow Moulding*

Plastik adalah suatu polimer yang mempunyai sifat-sifat unik dan luar biasa. Polimer adalah suatu bahan yang terdiri dari unit molekul yang disebut monomer. Jika monomernya sejenis disebut homopolimer, dan jika monomernya berbeda akan menghasilkan kopolimer.

Polimer alam yang telah kita kenal antara lain : selulosa, protein, karet alam dan sejenisnya. Pada mulanya manusia menggunakan polimer alam hanya untuk membuat perkakas dan senjata, tetapi keadaan ini hanya bertahan hingga akhir abad 19 dan selanjutnya manusia mulai memodifikasi polimer menjadi plastik. Plastik yang pertama kali dibuat secara komersial adalah nitroselulosa. Material plastik telah berkembang pesat dan sekarang mempunyai peranan yang sangat penting di bidang elektronika pertanian, tekstil, transportasi, furniture, konstruksi, kemasan kosmetik, mainan anak – anak dan produk – produk industri lainnya.

Ada beberapa teknik pembentukan polimer. Banyak kesamaan antara proses pembentukan logam dengan proses pembentukan polimer. Penentuan teknik pembentukan polimer bergantung pada beberapa faktor, diantaranya:

1. Apakah polimernya termoplastik atau thermoset
2. Jika termoplastik, pada suhu berapakah material ini melunak

3. Kestabilan material ketika dibentuk, serta
4. Bentuk dan ukuran produk akhir

*Stretch blow molding machine* merupakan mesin utama dari proses *blowing*. Yaitu meniupkan *preform* menjadi botol sesuai dengan cetakan yang dibuat. Mesin ini pada dasarnya terdiri dari dua bagian, yaitu *bottle blowing unit* dan *preform heating unit*. *Infrared preform heating (oven)*, merupakan bagian dari *stretch blow moulding machine* dimana pada bagian ini terjadi proses pemanasan *preform* sebagai bentuk awal dari botol. *Preform* sendiri diperoleh dari unit *injection machine (husky)*, sehingga sebelum proses *blowing*, *preform* tersebut harus dipanaskan terlebih dahulu pada bagian mesin ini.

Sedangkan pada bagian *bottle blowing unit* merupakan kelanjutan dari proses *preform heating unit (oven)* yaitu proses *blowing*. Setelah pemanasan dan masih dalam temperature tinggi (sehingga PET menjadi lunak) kemudian *preform* tersebut dimasukkan oleh mesin kedalam cetakan (*mould*), dan kemudian dilakukan proses meniupkan menjadi botol. Mesin kosme KSB4L merupakan mesin *stretch blow moulding* yang prosesnya sebagian besar menggunakan sistem *pneumatic* dan proses transfernya menggunakan berbagai sensor baik sensor temperatur, *proximity*, maupun sensor *optic*. Dan semua gerakan maupun *setting* parameter-nya diatur melalui sebuah monitor.

### Metode Respon Surface

Metode ini menggabungkan teknik matematika dengan teknik statistika yang digunakan untuk membuat dan menganalisa suatu respon Y yang dipengaruhi oleh beberapa variabel bebas atau faktor X guna mengoptimalkan respon tersebut. Hubungan antara respon Y dan variabel bebas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + \hat{a} \quad (1)$$

dimana:

Y = variabel respon

X = variabel bebas/faktor ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ )

$\hat{a}$  = error

Hubungan antara Y dan  $X_i$  dapat dicari menggunakan orde pertama dan orde kedua, dimana model orde pertama digunakan untuk mencari daerah optimal dan model orde kedua digunakan untuk mencari titik optimal.

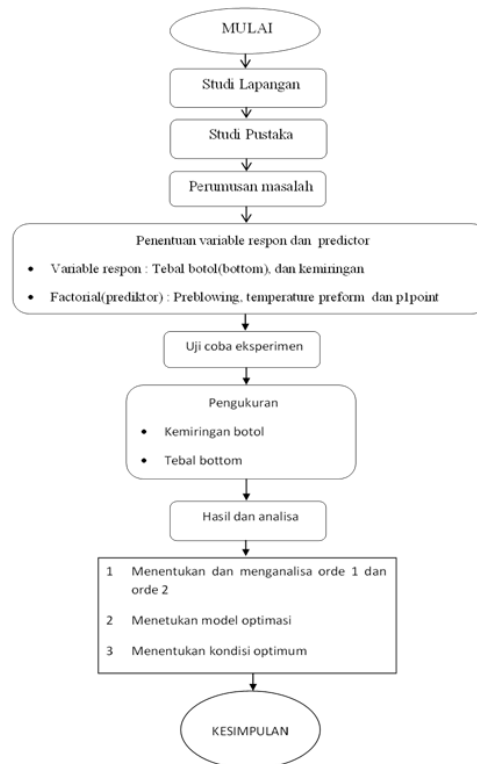
Adapun tahap-tahap memulai *response surface methodology* (RSM) antara lain :

1. Menentukan model orde pertama, dimana suatu desain eksperimen dilakukan untuk pengumpulan data dan arah penelitian. Setelah arah penelitian selanjutnya telah diperoleh kemudian ditentukan level factor untuk pengumpulan data selanjutnya.
2. Menentukan model persamaan orde kedua, penentuan model dilakukan dengan melakukan desain eksperimen dengan level yang telah ditetapkan.
3. Menentukan titik optimum dari factor-faktor yang diteliti.

Salah satu pertimbangan penting yang muncul dalam *response surface methodology* adalah bagaimana menentukan faktor dan level yang dapat cocok dengan model yang akan dikembangkan. Jika faktor dan level yang dipilih dalam suatu eksperimen tidak tepat maka kemungkinan terjadinya ketidakcocokan model akan sangat besar dan jika itu terjadi maka penelitian yang dilakukan bersifat bias [1,2].

## METODE PENELITIAN

### Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian

### Variabel Penelitian

Pada penelitian ini penentuan parameter yang di gunakan yaitu sebagai berikut :

Tabel 1. Data faktor-faktor pada tiap level

Factor	Level low	Level medium	Level high
	-1	0	1
Preblow	6,5 bar	7,5 bar	8,5 bar
Pref temp	114	117	120
P1 point	15 mm	20 mm	25 mm

Dengan menggunakan metode *box behnken* desain 3 level tersebut akan menghasilkan 15 kali percobaan.

*Predictor* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *preblow*, *preform temperature* dan *PI point*. Sedangkan untuk respon yang di cari yaitu tebal dan kemiringan botol. Kemiringan botol diukur dengan menggunakan alat pengukur tinggi (*height gauge*) digital. Adapun metode pengukurannya yaitu dengan menarik garis di empat sudut mulut botol dan mengukur tinggi sudut sudut yang telah di tetapkan tersebut. Setelah diukur selanjutnya di ambil selisih nominal terbawah/ terendah dengan nominal tertinggi. Adapun toleransi kemiringan botol yang di tetapkan oleh perusahaan yaitu 0,3mm.

Data yang didapatkan diolah dengan menggunakan *minitab* dan dianalisa berdasarkan analisa statistik [3,4].

## HASIL DAN ANALISA

Berikut data hasil eksperimen yang telah dilakukan sesuai dengan metode yang digunakan.

Tabel 2. Data hasil eksperimen

No	Pre Blow	Pref Temp	P1 Point	Tebal Botol	Kemiringan Botol
1	6,5	114	20	0,14	0,23
2	8,5	114	20	0,11	0,14
3	6,5	120	20	0,14	0,15
4	8,5	120	20	0,12	0,08
5	6,5	117	15	0,12	0,21
6	8,5	117	15	0,12	0,15
7	6,5	117	25	0,12	0,22
8	8,5	117	25	0,13	0,23
9	7,5	114	15	0,14	0,19
10	7,5	120	15	0,13	0,23
11	7,5	114	25	0,15	0,21
12	7,5	120	25	0,13	0,26
13	7,5	117	20	0,12	0,27
14	7,5	117	20	0,13	0,29
15	7,5	117	20	0,12	0,25

### Interpretasi Output Respons untuk Tebal botol

Hasil taksiran parameter model, table ANOVA yang digunakan untuk menguji kecocokan modal dengan data dan *unusual observation*. Langkah awal adalah mendeteksi signifikansi model [4].

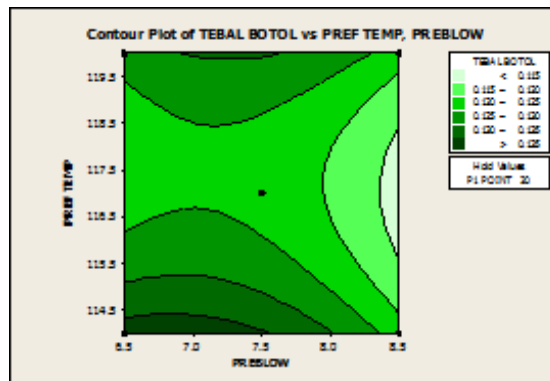
Estimated Regression Coefficients for TEBAL BOTOL					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	0.123333	0.006912	17.843	0.000	
PREBLOW	-0.005000	0.004233	-1.181	0.291	
PREF TEMP	-0.002500	0.004233	-0.591	0.580	
P1 POINT	0.002500	0.004233	0.591	0.580	
PREBLOW*PREBLOW	-0.005417	0.006231	-0.869	0.424	
PREF TEMP*PREF TEMP	0.009583	0.006231	1.538	0.185	
P1 POINT*P1 POINT	0.004583	0.006231	0.736	0.495	
PREBLOW*PREF TEMP	0.002500	0.005986	0.418	0.694	
PREBLOW*P1 POINT	0.002500	0.005986	0.418	0.694	

S = 0.0119722 PRESS = 0.01055  
R-Sq = 56.30% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 0.00%

Analysis of Variance for TEBAL BOTOL							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Regression	9	0.000923	0.000923	0.000103	0.72	0.688	
Linear	3	0.000300	0.000300	0.000100	0.70	0.592	
PREBLOW	1	0.000200	0.000200	0.000200	1.40	0.291	
PREF TEMP	1	0.000050	0.000050	0.000050	0.35	0.580	
P1 POINT	1	0.000050	0.000050	0.000050	0.35	0.580	
Square	3	0.000548	0.000548	0.000183	1.28	0.378	
PREBLOW*PREBLOW	1	0.000154	0.000108	0.000108	0.76	0.424	
PREF TEMP*PREF TEMP	1	0.000316	0.000339	0.000339	2.37	0.185	
P1 POINT*P1 POINT	1	0.000078	0.000078	0.000078	0.54	0.495	
Interaction	3	0.000075	0.000075	0.000025	0.17	0.909	
PREBLOW*PREF TEMP	1	0.000025	0.000025	0.000025	0.17	0.694	
PREBLOW*P1 POINT	1	0.000025	0.000025	0.000025	0.17	0.694	
PREF TEMP*P1 POINT	1	0.000025	0.000025	0.000025	0.17	0.694	
Residual Error	5	0.000717	0.000717	0.000143			
Lack-of-Fit	3	0.000650	0.000650	0.000217	6.50	0.136	
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033			
Total	14	0.001640					

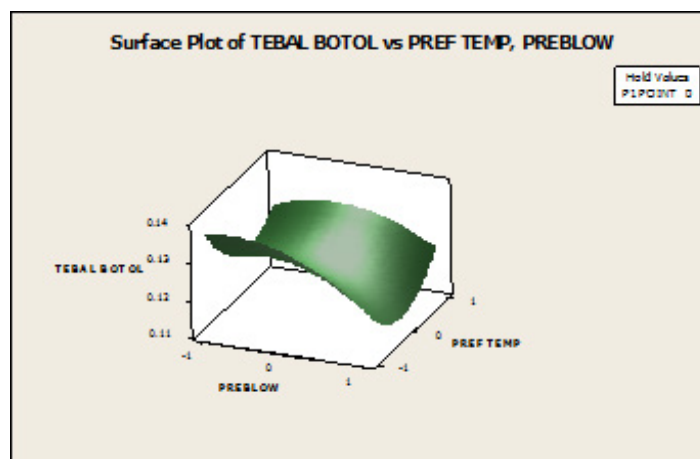
Gambar 2. Analisa desain response surface tebal botol

Untuk memeriksa kesesuaian model, tabel di atas menunjukkan bahwa  $P$ -value = 0,136 yang berarti lebih besar dari 0,05. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tidak ada alasan untuk menolak  $H_0$  yang artinya model tidak mengandung *lack of fit* atau model yang di peroleh telah sesuai dengan data [4].



Gambar 3. *Countor plot* dari tebal botol

Pada *contour plot* di atas menjelaskan bahwa respon semakin baik apabila berada antara level 6,5- 7,5 dan 114-114,5 untuk parameter *preblow* dan *preform* temperature. Dengan menyetting *preblow* dan *preform temperature* pada level tersebut kita akan memperoleh tebal botol lebih dari 0,135.



Gambar 4. *Surface plot* dari tebal botol

### Interpretasi Output Respons untuk kemiringan botol

Estimated Regression Coefficients for KEMIRINGAN				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.270000	0.02466	10.947	0.000
PREBLOW	-0.026250	0.01510	-1.738	0.143
PREF TEMP	-0.006250	0.01510	-0.414	0.696
P1 POINT	0.017500	0.01510	1.159	0.299
PREBLOW*PREBLOW	-0.070000	0.02223	-3.149	0.025
PREF TEMP*PREF TEMP	-0.050000	0.02223	-2.249	0.074
P1 POINT*P1 POINT	0.002500	0.02223	0.112	0.915
PREBLOW*PREF TEMP	0.005000	0.02136	0.234	0.824
PREBLOW*P1 POINT	0.017500	0.02136	0.819	0.450
PREF TEMP*P1 POINT	0.002500	0.02136	0.117	0.911

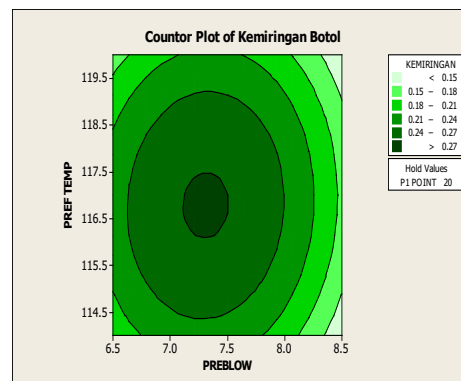
S = 0.0427200 PRESS = 0.135  
R-Sq = 79.58% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 42.83%

Analysis of Variance for KEMIRINGAN						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.035568	0.035568	0.003952	2.17	0.204
Linear	3	0.008275	0.008275	0.002758	1.51	0.320
PREBLOW	1	0.005512	0.005512	0.005512	3.02	0.143
PREF TEMP	1	0.000313	0.000313	0.000313	0.17	0.696
P1 POINT	1	0.002450	0.002450	0.002450	1.34	0.299
Square	3	0.025943	0.025943	0.008648	4.74	0.063
PREBLOW*PREBLOW	1	0.016563	0.016563	0.016563	9.91	0.025
PREF TEMP*PREF TEMP	1	0.009357	0.009357	0.009357	5.06	0.074
P1 POINT*P1 POINT	1	0.000023	0.000023	0.000023	0.01	0.915
Interaction	3	0.001350	0.001350	0.000450	0.25	0.861
PREBLOW*PREF TEMP	1	0.000100	0.000100	0.000100	0.05	0.824
PREBLOW*P1 POINT	1	0.001225	0.001225	0.001225	0.67	0.450
PREF TEMP*P1 POINT	1	0.000025	0.000025	0.000025	0.01	0.911
Residual Error	5	0.009125	0.009125	0.001825		
Lack-of-Fit	3	0.008325	0.008325	0.002775	6.94	0.129
Pure Error	2	0.000800	0.000800	0.000400		
Total	14	0.044693				

Gambar 5. Analisa desain *response surface* kemiringan botol

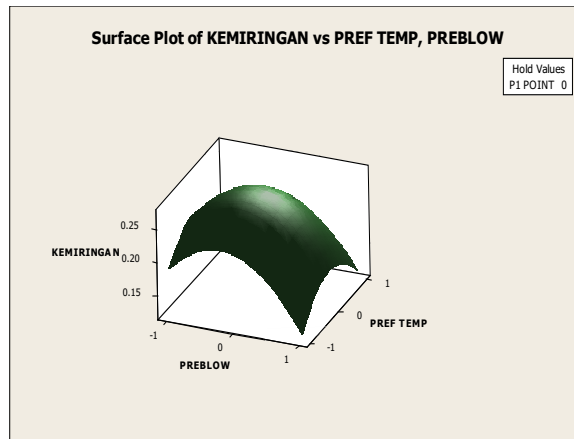
Untuk memeriksa kesesuaian model, tabel di atas menunjukkan bahwa  $P$ -value = 0,129 yang berarti lebih besar dari 0,05. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tidak ada alasan untuk menolak  $H_0$  yang artinya model tidak mengandung *lack of fit* atau model yang di peroleh telah sesuai [4].

Dari penduga tebal botol dan kemiringan botol di atas selanjutnya dilakukan uji normalitas, identik dan independen dan ketika di lakukan pengujian dapat disimpulkan bahwa data data yang ada sudah sesuai dan memenuhi setiap pengujian.



Gambar 6. *Contour plot* dari kemiringan botol

Pada *contour plot* di atas menjelaskan bahwa respon semakin baik apabila setting parameter berada antara level 8,35- 8,5 dan 114-114,2 untuk parameter *preblow* dan *preform* temperature. Dengan menyetting *preblow* dan *preform* temperature pada level tersebut kita akan memperoleh kemiringan botol kurang dari 0,15 mm.



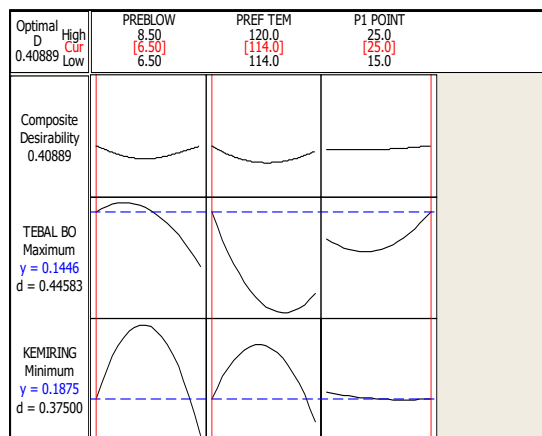
Gambar 7. Surface plot dari kemiringan botol

### Optimasi Parameter

Untuk mencari respon optimum selanjutnya digunakan pendekatan *desirability* [4,5], dengan memberikan batasan- batasan agar respon yang diperoleh tetap sesuai dengan standar yang telah ditentukan perusahaan. Kriteria optimum yang digunakan untuk mendapatkan hasil optimal didapatkan dari perusahaan yang merupakan standar yang telah disepakati yaitu tebal botol maksimal 0.2 mm dan kemiringan seminimal mungkin dengan standar maksimal 0.30 mm. Untuk mendapatkan nilai optimasi perlu digunakannya batas atas dan batas bawah dari data hasil eksperimen sebagai berikut [6]:

- Tebal botol maksimal ( $0.11 < Y < 0.20$ )
- Kemiringan botol minimal ( $< 0.30$ )

Berikut adalah hasil pengolahan data dengan menggunakan fitur *response surface optimizer*.



Gambar 9. Kombinasi variable proses yang menghasilkan respon optimal

Gambar di atas menampilkan bahwa *global solution* untuk *setting parameter* pada *preblow* sebesar 6,5 bar, *preform temperature* sebesar 114 °C , dan *P1 Point* sebesar 25 mm. Dengan melakukan *setting parameter* pada level tersebut, maka akan menghasilkan variabel respon *tebal botol* 0,1446 mm dengan nilai *desirability* 0,44583, kemiringan botol 0,1875 dengan nilai *desirability* 0,375.



## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Dari hasil optimasi menggunakan metode *response surface* di peroleh respon tebal botol sebesar 0,1446 dan kemiringan botol sebesar 0,1875 dengan nilai desirability sebesar 0,40889.
2. Untuk tebal botol, secara individu parameter yang paling berpengaruh adalah *preblowing pressure*.
3. Untuk kemiringan botol, secara individu parameter yang paling berpengaruh adalah *preblowing pressure*.

### Saran

1. Untuk setiap pengujian atau penelitian yang menggunakan *Response Surface Methodology*, kombinasi setting parameter yang digunakan harus di perhatikan karena kombinasi setting parameter berpengaruh terhadap output nilai signifikansi.
2. Untuk penelitian selanjutnya hendaknya menggunakan resin material plastic yang berbeda, sehingga dapat diketahui perbedaan hasil yang akhirnya dapat disimpulkan jenis resin plastic PET yang paling baik untuk produk botol 600 ml.
3. Untuk penelitian selanjutnya hendaknya juga mencoba menganalisa pengoptimalan parameter mesin pencetak preform. Dengan mengoptimalkan parameter mesin injeksi preform maka penelitian pada mesin ini selanjutnya akan lebih optimal lagi.
4. Hasil penelitian yang dilakukan merupakan solusi dalam mengatasi permasalahan sebatas perhitungan secara statistik dalam memperoleh hasil respon yang optimal. Hasil penelitian ini tidak diterapkan secara praktis akan tetapi dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam menentukan setting parameter dalam produk yang lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Misbahuddin, Hasan, dan Iqbal, 2013, *Analisis data penelitian dengan Statistik*. Bumi Aksara, Jakarta.
- [2] Sugiono, 2012, *Statistika Untuk Penelitian*. Alfabeta, Bandung.
- [3] Iriawan, N., dan Puji Astuti, S., 2006, *Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14*, Andi, Yogyakarta.
- [4] Suparno., dan Antonius, 2013, *Perancangan percobaan aplikasi minitab, SAS, dan Costat dalam analisis data*, Alfabeta, Bandung.
- [5] Hermawan, Y., dan Astika, I., M, 2009, *Optimasi Waktu Siklus Pembuatan Kemasan Produk Chamomile 120 Ml Pada Proses Blow Molding*, Cakra M 3.1, 18-25.
- [6] Musthofa, A, 2014, *Penentuan Setting Parameter Pembuatan Botol DK 8251 B pada Proses Blow Moulding dengan Menggunakan RSM (Response Surface Methodology): Studi Kasus di PT. Rexam Packaging Indonesia*, JTM OTOPRO 2.3, 47-55.

## KINERJA TUNGKU GASIFIKASI *DOWNDRAFT CONTINUE* BAHAN BAKAR SEKAM PADI

**Subroto**

Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosuro

*Email: sub224@ums.ac.id*

### ABSTRAK

Gasifikasi adalah mengambil gas metana yang terkandung pada bahan bakar padat sehingga jika digunakan pembakarannya akan lebih bersih. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain tungku gasifikasi yang efisien dengan merancang bangun dan menguji kinerja tungku tersebut. Kinerja tungku gasifikasi diuji dengan cara melihat karakteristik pembakarannya. Parameter karakteristik pembakaran meliputi temperatur pembakaran, waktu awal penyalaan dan lama nyala efektif pembakaran. Penelitian dimulai dengan merancang bangun tungku gasifikasi tipe *downdraft continue*, dimana aliran udara gasifikasi mengalir searah dengan gas metana yang dihasilkan. Bahan bakar dimasukan ke tungku secara periodik terus menerus selama proses pembentukan gas metana berlangsung, setelah terjadi pembentukan gas langsung dinyalakan. Gas asap hasil pembakaran dipakai untuk mendidih kan air, kemudian dicatat data temperatur pembakaran, waktu penyalaan awal, lama nyala efektif, temperatur air, dan lama pendidihan. Penelitian menghasilkan temperatur pembakaran tertinggi rata-rata hampir sama dengan isi ulang bahan bakar maupun tanpa isi ulang. Waktu penyalaan awal lebih cepat dengan isi ulang bahan bakar dibandingkan tanpa isi ulang. Lama nyala efektif pembakaran lebih lama dengan isi ulang dibandingkan tanpa isi ulang dan kalor hasil pembakaran lebih besar dengan isi ulang dibandingkan tanpa isi ulang.

**Kata kunci:** Gasifikasi, kinerja tungku, *downdraft continue*, sekam padi

### ABSTRACT

Gasification is the process of taking methane gas contained in the solid fuel so that if it is used will have cleaner combustion. The purpose of this study is to obtain efficient gasification furnace design by designing up and test the performance of the furnace. Gasification furnace performance tested by looking at the characteristics of the combustion including temperature combustion, the initial time of ignition and effective flame combustion time. The experiment begins by designing a type of *downdraft continue* gasification furnace, where the gasification air stream flowing with produced methane gas. Fuel is fed into the furnace periodically and continuously during the process of the formation of methane gas, after the formation of the gas, it is ignited. Gas fumes of combustion is used to boil water right away, then the combustion temperature data, startup time, effective flame combustion time, water temperature, and duration of boiling are recorded. Research generates that the highest average combustion temperatures almost the same as the fuel refill

or without a refill. Effective flame combustion time is longer with refill than without refill and heat combustion products with refills greater than without a refill.

**Keywords:** Gasification, furnace performance, downdraft continue, rice husk

## PENDAHULUAN

Kenaikan dan fluktualisasi harga minyak dunia yang kini berimbas di dalam negeri menyebabkan adanya keresahan dalam masyarakat kelas menengah ke bawah. Reforminer Institute merilis data bahwa cadangan minyak Indonesia akan segera habis dalam kurun waktu 12 tahun. Saat ini cadangan minyak Indonesia hanya 3,7 milyar barel dan angka ini hanya sebesar 0,3 % dari cadangan minyak dunia. Akhirnya Indonesia hanya mampu memproduksi sekitar 830.000 barel minyak per hari. Sementara itu di sisi lain Indonesia membutuhkan sekitar 1,2 juta barel perharinya. Kebijakan yang saat ini dilakukan pemerintah yaitu mengimpor minyak. Minyak bumi sebagaimana yang kita ketahui bersama adalah salah satu bentuk sumber daya alam yang tidak bisa diperbarui (*nonrenewable*) yang berasal dari sumber energy fosil. Sehubungan dengan hal tersebut, jumlah permintaan dan kebutuhan akan minyak terus meningkat. Hal ini mengakibatkan ketidak stabilan harga minyak seperti saat ini. Ketidakstabilan harga minyak dunia ini berimbas pada fluktuasi harga bahan bakar minyak Indonesia, yang kini mulai menghapus subsidi minyak dengan maksud untuk mengurangi beban negara. Kini setidaknya pemerintah cukup berhasil mengurangi penggunaan BBM dengan program konversi gas khususnya pada kebutuhan dapur. Namun demikian, kelancaran distribusi, fluktuasi harga serta ketersediaan gas masih dirasa sering menjadi masalah dalam masyarakat.

Salah satu cara dalam menyelesaikan masalah tersebut adalah dengan mencari sumber energi alternatif yang bisa diperbarui (*renewable*) dan tersedia dalam jumlah yang cukup besar. Sumber energy tersebut seperti energi matahari, angin, energi potensial air hingga limbah. Energi alternative adalah salah satu bentuk teknologi yang menghasilkan bahan bakar selain minyak bumi, dapat digunakan secara berulang, tersedia dalam jumlah yang cukup besar, tidak merusak alam, murah dan aman. Penelitian dan penemuanpun kini gencar dilakukan oleh para ilmuwan serta akademisi di tiap negara di dunia tak terkecuali di Indonesia. Pengembangan dan penyempurnaan menjadi hal yang terus digalakkan guna mencapai sebuah efisiensi penggunaan dan kenyamanan penggunaan bahan energi alternatif tersebut. Hal itu disebabkan agar masyarakat dapat tertarik dengan penggunaan teknologi energi alternatif yang murah, mudah serta aman digunakan.

Kelebihan gasifikasi tipe *downdraft* dapat di bahan bakar secara kontinu terus menerus selama proses pembentukan gas berlangsung tanpa menghentikan penyalaan pembakaran. Sudah banyak tungku jenis dikembangkan tetapi masih terdapat kekurangan antara lain : selama proses pembentukan gas proses termokimia masih kurang lancar, penyalaan awal diperlukan waktu yang cukup lama, temperatur pembakaran masih kurang stabil dan lain-lain. Percobaan telah banyak dilakukan oleh peneliti dan para praktisi menyimpulkan banyak faktor banyak yang terjadi selama proses gasifikasi.

Alexis [1] menyimpulkan dari hasil penelitiannya bahwa sudut throat berpengaruh terhadap laju reaksi, semakin besar sudut *throat* maka suhu dan laju reaksi semakin rendah. Dasar analisis tersebut dipakai Dzyiad *et al* [2] untuk melanjutkan penelitian, dan menyimpulkan bahwa desain *throat* pada pangkal reaktor gasifikasi sangat berpengaruh terhadap kelancaran reaksi termokimia yang akan berlangsung pada proses gasifikasi. Maka parameter yang dianggap penting sebagai dasar pengembangan desain tungku gasifikasi jenis downdraf adalah diameter tungku, tinggi tungku dan sudut *throat*.

## TINJAUAN PUSTAKA

Wusana, dkk [3] merancang dan menguji kinerja Reaktor Gasifikasi Sekam Padi Skala Kecil. Menjelaskan bahwa pembuatan tungku gasifikasi dengan skala kecil dengan dimensi diameter reaktor 13,97 cm dan tinggi reaktor 60 cm sudah mampu dioperasikan dengan cukup mudah dan memiliki nyala api yang cukup stabil. Dengan hasil lidah api mulai terlihat pada ujung burner di 6-7 menit setelah *start up* terhitung pada awal penyalaan tungku.

Isaac, dkk [4] menjelaskan tentang rancangan aliran udara dalam perancangan tungku gasifikasi sekam padi skala kecil untuk memasak. Bahwa dalam merancang tungku dengan tipe penggunaan yang berkelanjutan, diharuskan untuk memperhitungkan tahap pyrolysis agar dapat berjalan lancar. Yaitu dengan memberikan pipa pengarah agar suplai oksigen cukup dalam proses ini.

Dziyad dan Wulandani [2] Menganalisis dengan Computational Fluid Dynamics untuk Perancangan Reaktor Gasifikasi Sekam Padi Tipe *Downdraft* menerangkan bahwa rancangan outlet reaktor yang terdiri dari sudut *throat* mempengaruhi nilai kalor yang dihasilkan oleh tungku. Desain outlet sudut *throat* yang mampu menghasilkan nilai kalor paling tinggi adalah desain sudut *throat* 90° diukur dari garis yang tegak lurus dengan reaktor.

Bambang, dkk [5] Mengkaji Dimensi Tenggorokan Ruang Reduksi Gasifier Tipe *Downdraft* Untuk Gasifikasi Limbah Tongkol Jagung. Menyimpulkan bahwa desain throat atau tenggorokan tungku dan tinggi ruang reduksi berpengaruh nyata terhadap nyala efektif tungku dan produksi gas metan. Waktu nyala efektif yang besar ditentukan oleh suhu reduksi yang tinggi dan stabil. Suhu diatas 350° dan tinggi ruang reduksi 10 cm mampu memberikan kinerja gasifikasi optimal.

## Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi adalah proses yang berbeda dengan proses pembakaran maupun proses pembentukan biogas. Perbedaan gasifikasi dengan pembakaran terletak pada jumlah oksigen yang digunakan dalam prosesnya, serta produk yang dihasilkan. Proses pembakaran menggunakan oksigen yang melebihi kebutuhan stokiometrik, selain itu produk yang dihasilkan berupa energi panas dan gas yang tidak terbakar.

Sementara itu, proses gasifikasi sangat bergantung pada reaksi kimia yang terjadi pada temperatur di atas 600 °C. Hal inilah yang membedakannya dengan proses biologis seperti proses anaerobik yang menghasilkan biogas. Gasifikasi adalah proses pengubahan materi yang mengandung karbon seperti batubara, minyak bumi, maupun biomassa ke dalam bentuk karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H<sub>2</sub>) dengan mereaksikan bahan baku yang digunakan pada temperatur tinggi dengan jumlah oksigen yang diatur. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengubah unsur-unsur pokok dari bahan bakar yang digunakan ke dalam bentuk gas yang lebih mudah dibakar, sehingga hanya menyisakan abu dan sisa-sisa material yang tidak terbakar (*inert*).

Proses gasifikasi biomassa dilakukan dengan cara melakukan pembakaran secara tidak sempurna di dalam sebuah ruangan yang mampu menahan temperatur tinggi yang disebut reaktor gasifikasi. Agar pembakaran tidak sempurna dapat terjadi, maka udara dengan jumlah yang lebih sedikit dari kebutuhan stokiometrik pembakaran dialirkan ke dalam reaktor untuk mensuplai kebutuhan oksigen menggunakan kipas atau *blower*. Proses pembakaran yang terjadi menyebabkan reaksi termo-kimia yang menghasilkan CO, H<sub>2</sub>, dan gas metan (CH<sub>4</sub>). Selain itu, dalam proses ini juga dihasilkan uap air (H<sub>2</sub>O) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang tidak terbakar.

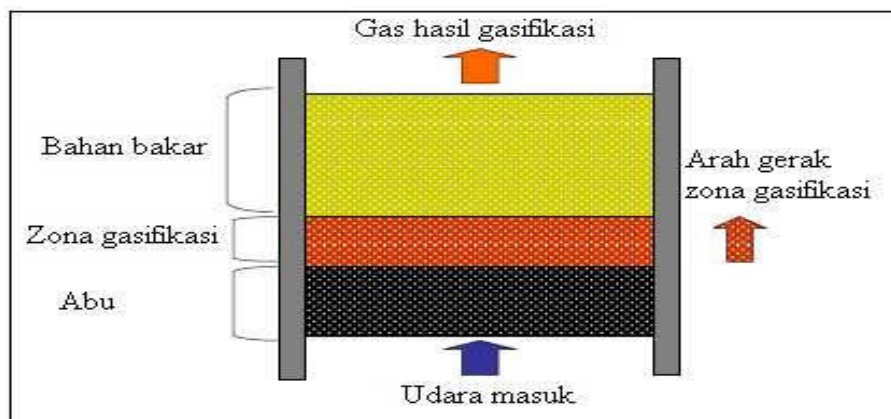
### Tahapan gasifikasi

1. *Pyrolysis* yang terjadi ketika biomassa mulai mengalami kenaikan temperatur. Pada tahap ini volatil yang terkandung pada biomassa terlepas dan menghasilkan arang (char).
2. Proses pembakaran (*combustion*) pada tahapan ini volatil dan sebagian arang yang memiliki kandungan karbon (C) bereaksi dengan oksigen membentuk CO dan CO<sub>2</sub> serta menghasilkan panas yang digunakan pada tahap selanjutnya yaitu tahap gasifikasi.
  - Reaksi pembakaran  $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
  - Reaksi Boudouard  $C + CO_2 = 2 CO$
3. Gasifikasi tahapan ini terjadi ketika arang bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dan uap air yang menghasilkan gas CO dan H<sub>2</sub> yang merupakan produk yang diinginkan dari keseluruhan proses gasifikasi.
  - Reaksi water gas  $C + H_2O = CO + H_2$
4. *Water shift reaction*. Melalui tahapan ini, reaksi termo-kimia yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi mencapai keseimbangan. Sebagian CO yang terbentuk dalam reaktor bereaksi dengan uap air dan membentuk CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>.
  - Reaksi metana  $C + 2 H_2 = CH_4$

### Tipe-Tipe Reaktor Gasifikasi Biomassa

#### 1. Reaktor Gasifikasi Tipe *Updraft*

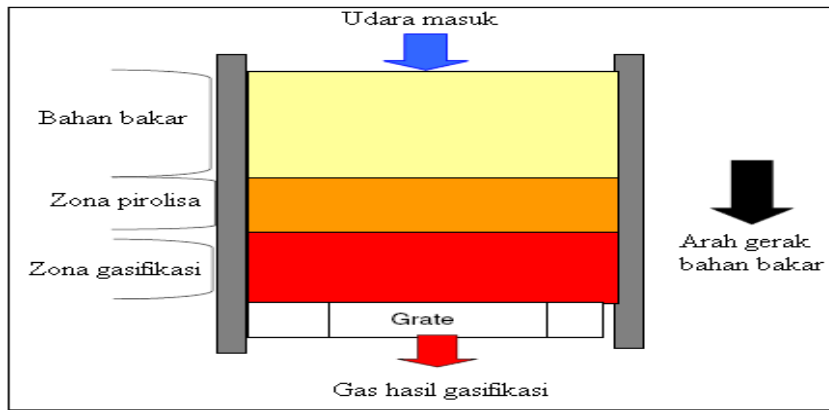
Pada reaktor gasifikasi tipe ini, zona pembakaran (sumber panas) terletak di bawah bahan bakar dan bergerak ke atas seperti tampak dalam Gambar. Dalam gambar ini tampak bahwa gas panas yang dihasilkan mengalir ke atas melewati bahan bakar yang belum terbakar sementara bahan bakar akan terus jatuh ke bawah. Melalui pengujian menggunakan sekam padi, reaktor gasifikasi ini dapat bekerja dengan baik. Kekurangan dari reaktor.



Gambar 1. Skema Reaktor Gasifikasi Tipe *Updraft*

#### 2. Reaktor Gasifikasi Tipe *Downdraft*

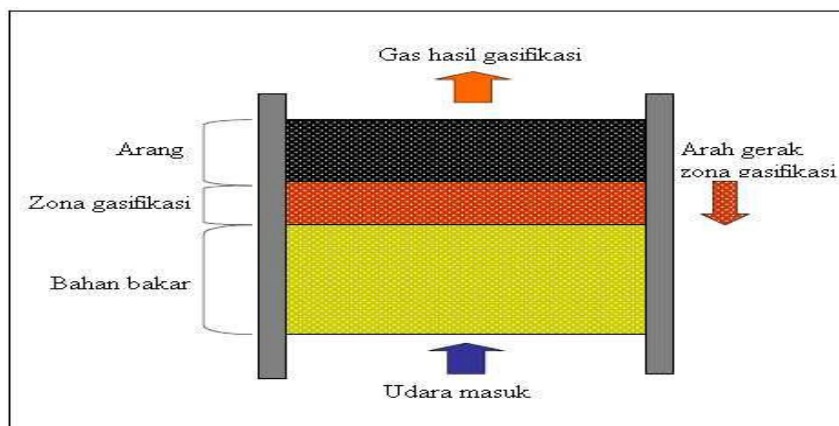
Pada tipe ini sumber panas terletak di bawah bahan bakar seperti tampak dalam gambar di bawah. Aliran udara bergerak ke zona gasifikasi di bagian bawah yang menyebabkan asap pyrolysis yang dihasilkan melewati zona gasifikasi yang panas. Hal ini membuat tar yang terkandung dalam asap terbakar, sehingga gas yang dihasilkan oleh reaktor ini lebih bersih. Keuntungan reaktor tipe ini adalah reaktor ini dapat digunakan untuk operasi gasifikasi yang berkesinambungan dengan menambahkan bahan bakar melalui bagian atas reaktor. Namun untuk operasi yang berkesinambungan dibutuhkan sistem pengeluaran abu yang baik, agar bahan bakar bisa terus ditambahkan.



Gambar 2. Skema Reaktor Gasifikasi Tipe *Downdraft*

### 3. Reaktor Gasifikasi Tipe *Inverted Downdraft*

Prinsip kerja reaktor gasifikasi tipe ini sama dengan prinsip kerja reaktor gasifikasi *downdraft* gasifiers. Dalam gambar tampak bahwa perbedaan antara reaktor gasifikasi *downdraft* gasifiers dengan reaktor gasifikasi *inverted downdraft* gasifiers terletak pada arah aliran udara dan zona pembakaran yang dibalik. Sehingga bahan bakar berada pada bagian bawah reaktor dengan zona pembakaran di atasnya. Aliran udara dari bagian bawah ke bagian atas reaktor.



Gambar 3. Skema Reaktor Gasifikasi Tipe *Inverted Downdraft*

### 4. Reaktor Gasifikasi Tipe *Crossdraft*

Pada reaktor ini, aliran udara mengalir tegak lurus dengan arah gerak zona pembakaran. Reaktor tipe ini memungkinkan operasi yang berkesinambungan apabila memiliki sistem pengeluaran abu yang baik.

#### Diameter reaktor

$$D = \left( \frac{1,27 FCR}{SGR} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Dimana:

D: diameter reaktor (m)

FCR: *fuel consumption rate* atau konsumsi bahan bakar rata-rata (kg/hr)

SGR: *specific gasification rate of rice husk* atau rata-rata gasifikasi sekam padi ( $110-210 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ )

1. Tinggi Reaktor Tungku

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho_{rh}} \quad (2)$$

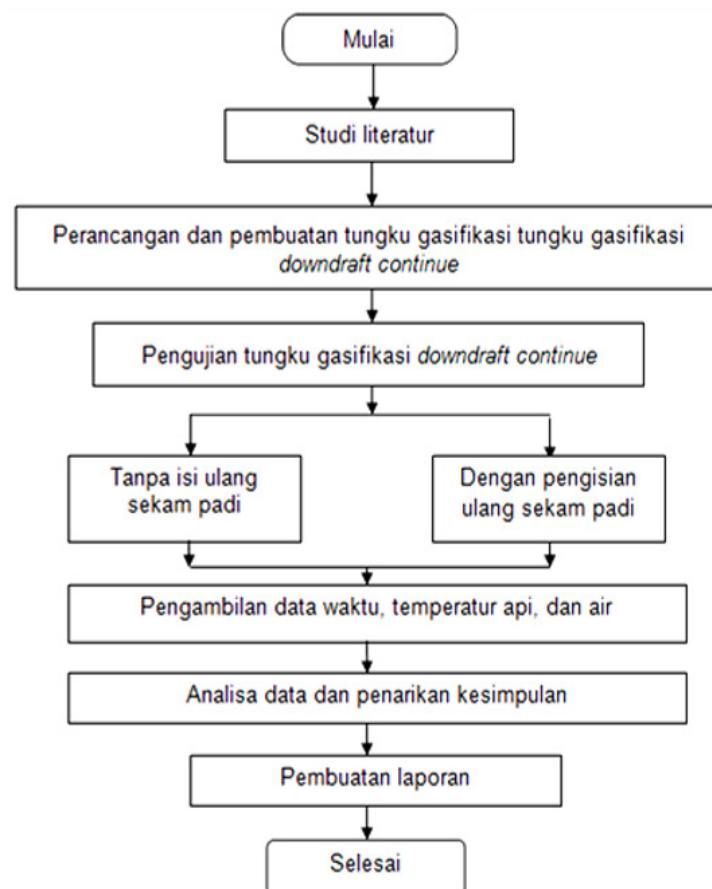
Dimana:

H : Tinggi Reaktor (m)

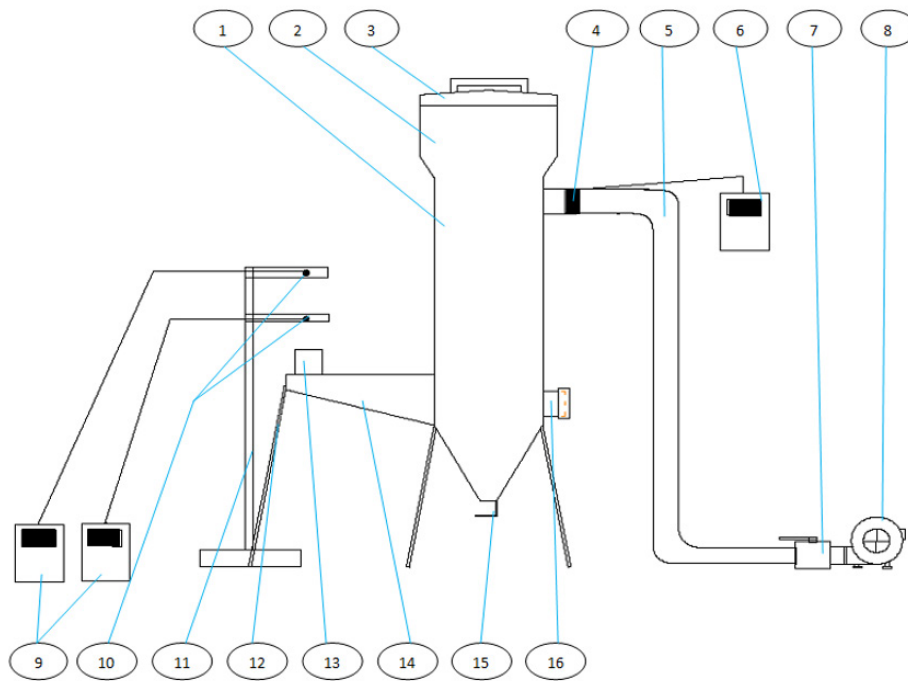
T : Waktu konsumsi bahan bakar (hr)

$\rho_{rh}$  : density sekam padi ( $\text{kg/m}^3$ )

## METODE PENELITIAN



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian



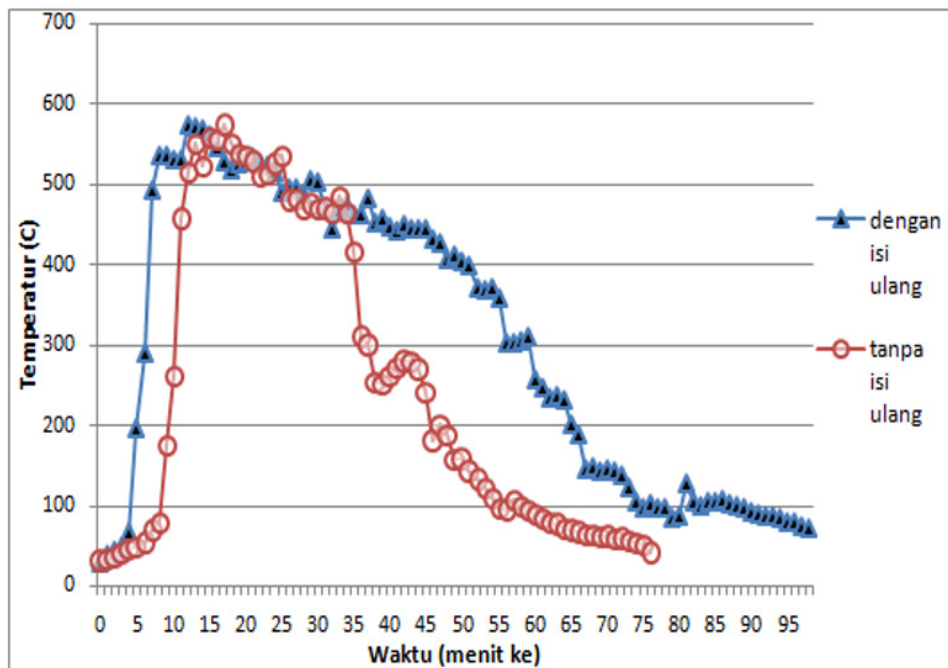
**Gambar 5. Instalasi Pengujian**

Keterangan:

1. Tungku gasifikasi spesifikasi :  
 Diameter = 170 mm  
 Tinggi = 650 mm  
 Sudut throat = 60°
2. Tempat bahan bakar
3. Penutup tungku
4. *Anemometer*
5. Saluran udara pembakaran
6. *Anemometer reader*
7. Saluran udara masuk tungku
8. *Fan*
9. *Thermocouple reader*
10. *Thermocouple*
11. *Penyangga thermocouple*
12. Dudukan tungku
13. Saluran gas keluar
14. Pipa saluran penghubung
15. Saluran sisa bahan bakar
16. Saluran penyalan awal



## HASIL DAN PEMBAHASAN



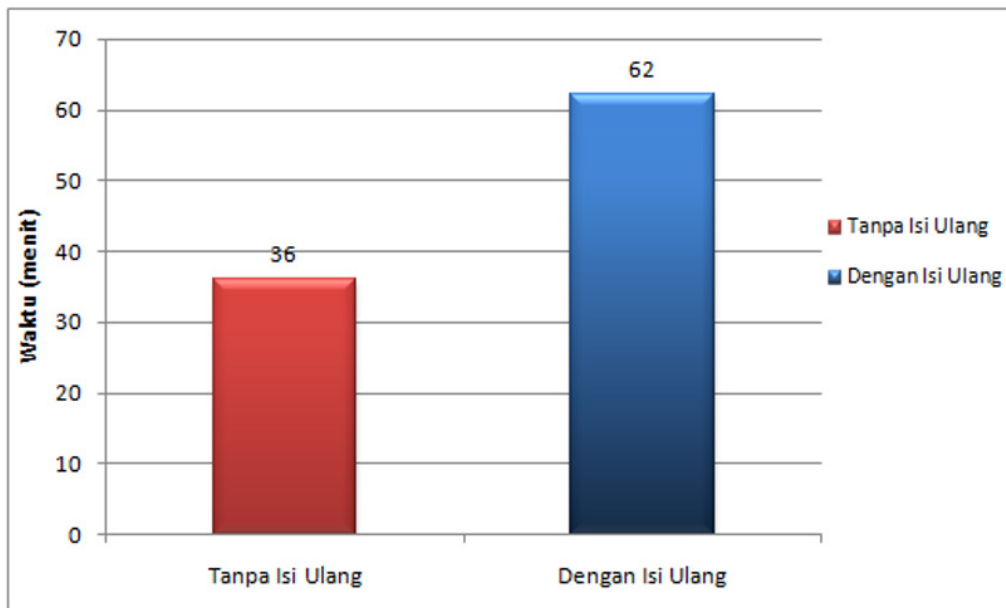
**Gambar 6. Perbandingan Karakteristik Temperatur Pembakaran**

Dari gambar 6 grafik perbandingan karakteristik pembakaran gasifikasi tungku jenis downdraf kontinu dapat dijelaskan bahwa hasil karakteristik pembakaran mempunyai karakter yang sama atau sangat signifikan antara dengan bahan bakar isi ulang atau tanpa isi ulang. Setelah terjadi pembentukan gas metana dan terjadi penyalaan awal terjadi lonjakan temperatur dengan cepat kemudian gas metana terus terbentuk sampai temperatur akan turun dengan drastis, hal ini terjadi karena gas metana yang terbentuk sudah habis.

Temperatur pembakaran yang terukur hampir sama yang isi ulang  $573^{\circ}\text{C}$  sedangkan yang tanpa isi ulang  $572^{\circ}\text{C}$ , hal ini karena perlakuan penelitian sama dengan jenis bahan bakar yang sama pula. Sedangkan waktu penyalaan lebih cepat yang dengan yang isi ulang selama 6 menit dan 10 menit yang tanpa isi ulang, fenomena ini terjadi karena yang isi ulang kondisi dinding tungku sudah diatas suhu kamar sehingga siap untuk pembakaran. Dinding tungku temperatur sudah naik, sehingga akan mempercepat proses gasifikasi.

**Gambar 7. Perbandingan Lama Nyala Efektif Pembakaran**

Dari gambar 7 dapat dijelaskan kecepatan udara dibuat konstan dengan jenis bahan bakar yang sama dan kapasitas bahan bakar awal yang sama, menghasilkan nyala efektif yang sama. Dengan isi ulang bahan bakar menghasilkan nyala efektif api tungku hingga 62 menit sedangkan penggunaan tungku tanpa diisi ulang mampu menyala selama 36 menit. Hal ini karena kapasitas bahan bakar yang dipakai lebih banyak akan menghasilkan nyala api yang lebih lama.



**Gambar 8. Perbandingan Temperatur Air Boiling Test**

Pada gambar 8 di atas dapat dilihat grafik fenomena suhu pendidihan dari hasil boiling test hasil pembakaran dipakai untuk mendidihkan air. Waktu yang diperlukan untuk pendidihan air baik yang isi ulang maupun yang tanpa isi ulang memiliki waktu yang sama yaitu 15 menit. Temperatur tertinggi air juga relatif sama, yang berbeda adalah kapasitas air yang dididihkan menjadi uap. Dengan tungku yang diisi ulang bahan bakar mampu mendidihkan air sebanyak 1,480 liter, sedangkan yang tanpa diisi ulang mampu mendidihkan air sebanyak 0,740 liter. Hal ini disebabkan karena dengan bahan bakar isi ulang nyala efektifnya lebih lama.

**Tabel 1 .Kalor Pendidihan Air**

	M air (Kg)	Cp (Kj/Kg°C)	ΔT (°C)	Qs (Kj)	M uap (kg)
Dengan isi ulang	3	4.1925	74	930.73	1.48
Tanpa Isi ulang	3	4.1925	74	930.73	0.73
	h <sub>fg</sub> (Kj/Kg)	QL (Kj)	Qs (Kj)	QL (Kj)	Q total (Kj)
Dengan isi ulang	2323.3	3438.48	930.73	3438.48	4369.21
Tanpa Isi ulang	2323.3	1696.00	930.73	1696.00	2626.74

Dari tabel 1. proses gasifikasi sekam padi nilai kalor yang dihasilkan dengan isi ulang menghasilkan kalor sebesar 4326, 216 kJ sedangkan tanpa isi ulang mampu menghasilkan kalor sebesar 2626,744 kJ. Dengan isi ulang menghasilkan kalor yang lebih banyak, hal ini karena dengan isi ulang menggunakan bahan bakar yang lebih banyak.

## KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian, analisa dan pembahasan pada kinerja tungku gasifikasi *downdraft continue* dapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur pembakaran rata-rata tertinggi pembakaran hampir sama dengan isi ulang maupun tanpa isi
2. Waktu penyalaan lebih cepat dengan isi ulang dengan waktu 6 menit dibandingkan tanpa isi ulang dengan waktu 10 menit
3. Lama nyala efektif dengan isi ulang waktu 62 menit lebih lama dibandingkan tanpa isi ulang waktu 36 menit.
4. Nilai kalor hasil gasifikasi untuk isi ulang 4369,21 kJ lebih besar dibandingkan tanpa isi ulang 2626,74 kJ.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Belonio T Alexis., 2011, *Rice Husk Gas Stove dan Household-Size Continuous-Flow Rice Husk Gas Stove*, Filipina.
- [2] Dziyad Dzulfansyah, Leopold Oscar Nelwan, Dyah Wulandani, 2014, *Analisis Computational Fluid Dynamics untuk Perancangan Reaktor Gasifikasi Sekam Padi Tipe Downdraft*, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
- [3] Wusana Agung W, Sunu H Pranolo, Gede Noorochadi, Lusia Ratna M, 2010, *Perancangan dan Uji-Kinerja Reaktor Gasifikasi Sekam Padi Skala Kecil*, Fakultas Teknik. Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- [4] Isaac Lockman, Marc Par'e, Jordan Edwards, 2010, *Design od a Rice Husk Gasification Cook Stove for Rural Nicaragua*, Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [5] Bambang Purwantana, dkk, 2011, *Kajian Dimensi Tenggorokan Ruang Reduksi Gasifier Tipe Downdraft Untuk Gasifikasi Limbah Tongkol Jagung*, Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada

## REKAYASA BAHAN KOMPOSIT *SANDWICH* HIBRID UNTUK STRUKTUR SISTEM PANEL

Agus Hariyanto

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosura

Email : *agus.hariyanto @ums.ac.id*

### ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah menyelidiki pengaruh ketebalan *core* terhadap peningkatan kekuatan bending komposit *sandwich* hibrid berpenguat kombinasi serat rami *woven* dan serat gelas *woven* bermatrix *polyester* dengan *core* berpenguat kombinasi serbuk kayu jati dan mahoni bermatrix *polyester*. Mekanisme perpatahan diamati dengan foto makro.

Bahan yang digunakan untuk skin adalah serat rami (*woven*), serat E-Glass (*woven*), resin *unsaturated polyester* 157 BQTN (UPRs). Bahan yang digunakan untuk *core* adalah serbuk kayu jati dan mahoni dengan *mesh* 30 pada fraksi volume 50%, resin *unsaturated polyester* 157 BQTN. *Hardener* yang digunakan adalah MEKPO dengan konsentrasi 1%. Komposit dibuat dengan metode cetak tekan. Komposit *sandwich* hibrid tersusun terdiri dari dua *skin* komposit hibrid dengan *core* hibrid di tengahnya. *Skin* komposit hibrid sebagai lamina terdiri dari dua lamina serat gelas anyam dan satu lamina serat rami (*woven - woven - woven*). Fraksi volume serat komposit *skin* hibrid adalah 30%. Komposit *core* hibrid yang digunakan adalah serbuk kayu jati dan mahoni dengan *mesh* 30 pada fraksi volume 50% dengan resin *unsaturated polyester* 157 BQTN. Variabel utama penelitian yaitu tebal *core* (10, 20, 30, 40, dan 50 mm). Spesimen dan prosedur pengujian bending mengacu pada standard ASTM C 393.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ketebalan *core* mampu meningkatkan momen bending. Namun, menurunkan kekuatan bending, *facing* bending dan tegangan geser *core* komposit *sandwich* hibrid. Mekanisme patahan diawali oleh kegagalan komposit skin bagian tarik, *core* gagal geser, dan diakhiri oleh kegagalan *skin* sisi tekan. Pada bagian daerah batas *core* dan komposit *skin* menunjukkan adanya kegagalan delaminasi.

**Kata Kunci:** komposit *sandwich* hibrid, kekuatan bending, tebal *core*, mekanisme patahan.

### ABSTRACT

To the effect this research is investigate *core*'s thickness influence for step-up to try a fall bending komposit hibrid's *sandwich* gets ramie fiber combine lasing woven and woven with matrix *polyester*'s glass fiber with *core* gets powder combine lasing matrix *polyester*'s teakwood and mahony. Mechanism about observed break with macro photo.

Material that is utilized for skin is ramie fiber (woven), fiber E- Glass (woven), resin unsaturated polyester 157 BQTN (UPRs). Material that is utilized for core is teakwood and mahony powder with mesh 30 on volumed fraction 50%, resin unsaturated polyester 157 BQTN. Hardener who is utilized is MEKPO by concentrates 1%. Composite made by print method presses. Composites is hibrid's sandwich laps over consisting of two skin komposit hibrid with core hibrid adjoining. Skin composite hibrid as lamina consisting of two lamina glass fiber woven and one lamina ramie fibers (woven woven – woven). Fibers volumed fraction composite skin hibrid is 30%. Composite core hibrid who is utilized is teakwood and mahony powder with mesh 30 on volumed fraction 50% by resin unsaturated polyester 157 BQTN. Observational main variable which is thick core (10, 20, 30, 40, and 50 mm). Specimen and bending's examination procedure points on ASTM'S standard C 393.

Result observationaling to point out that core's thickness increase can increase momen bending. But, downing bending's force, facing bending and tension angles core composite is hibrid's sandwich. Fractured mechanism to be started by composite skin's failing part pulls, core fails to angle, and ended up by skin's failing flank presses. On bounds region part core and composite skin points out to mark sense delaminasi's failing.

**Key word** : composite hibrid's sandwich, bending's force, core's thick, fractured mechanism.

## PENDAHULUAN

Munculnya *issue* permasalahan limbah *non-organik* serat sintetis yang semakin bertambah mampu mendorong perubahan *trend* teknologi komposit menuju *natural composite* yang ramah lingkungan. Serat alam mencoba menggeser serat sintetis, seperti *E-Glass*, *Kevlar-49*, *Carbon/ Graphite*, *Silicone carbide*, *Aluminium Oxide*, dan *Boron*. Salah satu jenis serat alam yang tersedia secara melimpah adalah serat rami. Keuntungan penggunaan komposit antara lain ringan, tahan korosi, tahan air, *performance*-nya menarik, dan tanpa proses pemesinan. Beban konstruksi juga menjadi lebih ringan. Harga produk komponen yang dibuat dari komposit *glass fibre reinforced polyester (GFRP)* dapat turun hingga 60%, dibanding produk logam [1]. Komposit *sandwich* hibrid merupakan salah satu jenis komposit struktur yang sangat potensial untuk dikembangkan. Komposit ini terdiri dari *flat* hibrid komposit dan *core* hibrid. *Core* yang biasa dipakai adalah *core import*, seperti *polyuretan (PU)*, *polyvynil Clorida (PVC)*, dan *honeycomb*.

Ketersediaan *serbuk kayu jati dan mahoni* yang berlimpah, merupakan SDA yang dapat direkayasa menjadi produk teknologi andalan nasional sebagai *core* hibrid komposit *sandwich* hibrid. Rekayasa *core* hibrid dapat dilakukan dari kayu utuh ataupun limbah serbuk/potongan kayu. Konsep rekayasa *core* hibrid ini merupakan tahapan alih teknologi yang diilhami oleh masuknya *core impor kayu balsa* dari Australia. Sifat fisik serbuk kayu jati dan mahoni hampir sama dengan kayu balsa.

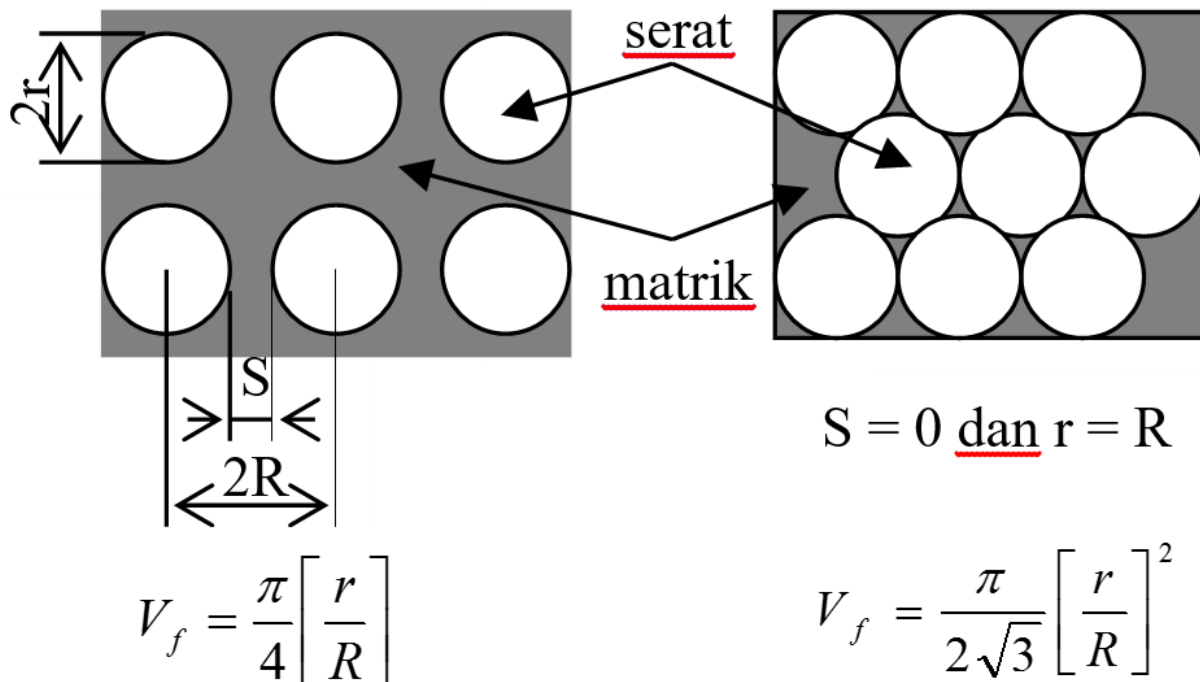
Berdasarkan uraian tersebut di atas, maka penelitian tentang rekayasa komposit *sandwich* hibrid dengan *core* hibrid limbah serbuk kayu jati dan mahoni merupakan kajian yang sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut. Berhubung mayoritas beban yang diterima berbagai panel komposit *sandwich* hibrid adalah bending, maka kajian mekanis yang dipandang sangat penting dilakukan adalah kajian kekuatan bending.

## TINJAUAN PUSTAKA

Hariyanto, 2006 [2] meneliti pengaruh ketebalan *core* dan perlakuan alkali serat kenaf terhadap peningkatan kekuatan bending komposit *hybrid sandwich* kombinasi serat kenaf dan serat gelas bermatrix *Polyester* dengan *core* kayu sengon laut. Bahan yang digunakan adalah serat kenaf (acak, anyam), serat *E-Glass* (anyam), *resin unsaturated polyester157 BQTN (UPRs)*, kayu sengon laut, dan *NaOH* teknis. *Hardener* yang digunakan adalah *MEKPO* dengan konsentrasi 1%. Variabel utama penelitian yaitu perlakuan alkali serat kenaf (0 & 2 jam) dan tebal *core* (5,10,15,20 mm). Komposit dibuat dengan metode cetak tekan. Fraksi volume serat komposit adalah 30%. Pengujian komposit sesuai dengan standar *ASTM* yang digunakan pengujian bending yang mengacu pada standart *ASTM C 393-00*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ketebalan *core* mampu meningkatkan kekuatan bending dan momen bending komposit *hybrid sandwich*. Perlakuan alkali pada serat kenaf menurunkan kekuatan bending pada komposit *hybrid sandwich*. Mekanisme patahan diawali oleh kegagalan komposit *skin* bagian tarik, *core* gagal geser, dan diakhiri oleh kegagalan *skin* sisi tekan. Pada bagian daerah batas *core* dan komposit *skin* menunjukkan adanya kegagalan delaminasi.

### Sifat Mekanis Komposit Sandwich

Hasil penelitian Wahyanto dan Diharjo, 2004 [3] menyatakan bahwa komposit *sandwich* serat gelas acak 300 gr/m<sup>2</sup> pada  $V_f = 30\%$  bermatrix *polyester* dengan *core* kayu sengon laut setebal 10 mm memiliki kekuatan bending dan impak sebesar 125,44 MPa dan 0,045 MPa. Sedangkan komposit hibrid *sandwich* serat *E-glass* acak 300 gr/m<sup>2</sup> dan kenaf anyam 810 gr/m<sup>2</sup> pada  $V_f = 30\%$  bermatrix *polyester* dengan *core* kayu sengon laut setebal 10 mm mempunyai kekuatan bending dengan *core* arah serat kayu horisontal sebesar 263,28 MPa, lebih besar 81 % di atas komposit *sandwich* hibrid dengan *core* kayu vertikal 97,5 MPa. Kekuatan impak komposit *sandwich* dengan *core* vertikal 0,0604 J/mm<sup>2</sup>, lebih besar 4,4 % di atas kekuatan impak dengan *core* arah serat kayu horisontal 0,0578 J/mm<sup>2</sup>.



Gambar 1. Struktur mikro komposit dengan peletakan serat teratur [4].

Fraksi volume dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [5]:

$$V_1 = \frac{W_1 / \rho_1}{W_1 / \rho_1 + W_2 / \rho_2 + \dots} \quad (1)$$

$$W_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots} \quad (2)$$

Kekuatan komposit dapat ditentukan dengan persamaan [5]:

$$\sigma_C = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3)$$

### Kekuatan Bending Komposit *Skin*

Pada umumnya, material komposit mempunyai nilai modulus elastisitas bending yang berbeda dengan nilai modulus elastisitas tariknya. Akibat pengujian bending, pada bagian atas spesimen mengalami tekanan, dan bagian bawah mengalami tarikan. Kegagalan yang terjadi akibat uji bending komposit yaitu mengalami patah pada bagian bawah karena tidak mampu menahan tegangan tarik. Kekuatan bending komposit dapat ditentukan dengan persamaan 4 [6]:

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4)$$

Jika defleksi maksimum lebih dari 10 % dari jarak antar penumpu (L), kekuatan bendingnya dapat dihitung dengan persamaan 5 yang lebih akurat daripada persamaan 4.

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2} \left[ 1 + 4 \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Modulus elastisitas bendingnya dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (6)$$

dengan catatan  $m = \text{slope tangent}$  garis lurus kurva beban vs defleksi, N/mm.

### 2.4 Kekuatan Bending Komposit *Sandwich*

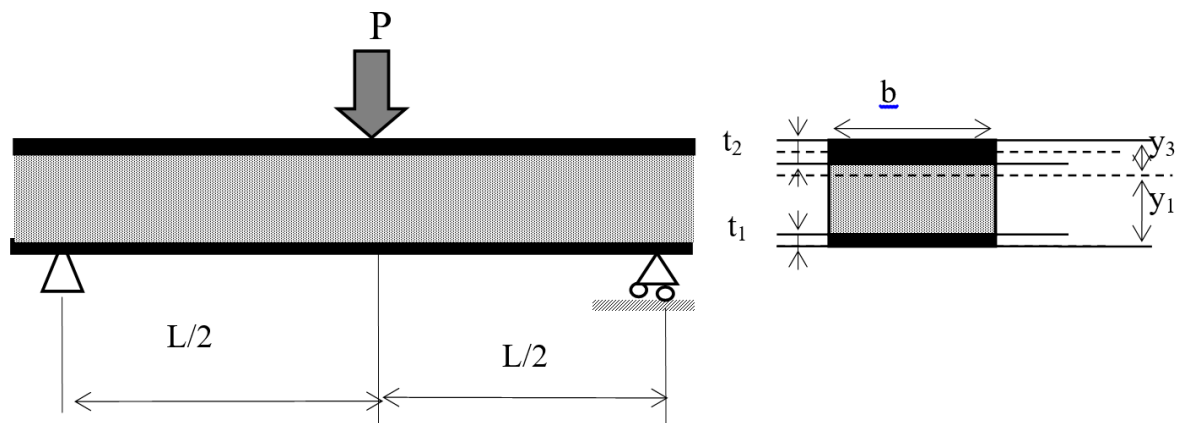
Pada panel komposit *sandwich* yang dikenai uji *three point bending* seperti pada gb 2, besarnya tegangan geser pada *core* dapat dihitung dengan persamaan [7]:

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (7)$$

Besarnya tegangan bending maksimum pada bagian permukaan (*facing bending stress*) dapat dihitung dengan persamaan;

$$\sigma_b = \frac{E}{2t(d+c)b} \quad (8)$$

dengan catatan;  $L$  = panjang bentangan (mm) dan  $t$  = tebal *facing* (mm).



Jika pengujian bending dilakukan dengan *four point bending method*, maka besarnya tegangan bending maksimum (*facing bending stress*) dapat dihitung dengan persamaan;

$$\sigma_b = \frac{PL}{4t(d+c)b} \quad (9)$$

Momen maksimum panel hibrid *sandwich* dihitung dengan persamaan:

$$M_{\max} = \frac{P}{2} \times \frac{L}{4} \quad (10)$$

Momen inersia hibrid *sandwich* dihitung dengan persamaan:

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (11)$$

Kekuatan (tegangan) dan kekakuan bending maksimum panel hibrid *sandwich* dihitung dengan persamaan:

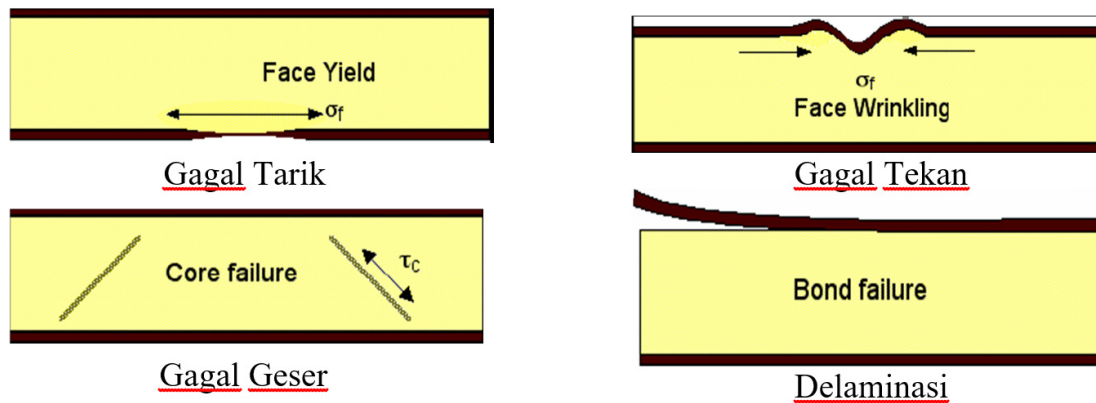
$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot z}{EI} (E_f + E_c) \quad (12)$$

$$D = EI = E_f \frac{bt_f d^2}{2} + E_c \frac{bt_c^3}{12} \quad (13)$$

### Mode Kegagalan Komposit *Sandwich*

Mode kegagalan komposit *sandwich* ada 4 macam yaitu (1) kegagalan di bagian *skin* akibat beban tarik, (2) kegagalan bagian *skin* akibat beban *buckling*, (3) kegagalan geser pada bagian *core*, dan (4) kegagalan delaminasi antara komposit *skin* dan *core*. Mode kegagalan tersebut ditunjukkan seperti pada gambar 3.





Gambar 3. Mekanisme Kegagalan Sandwich [8]

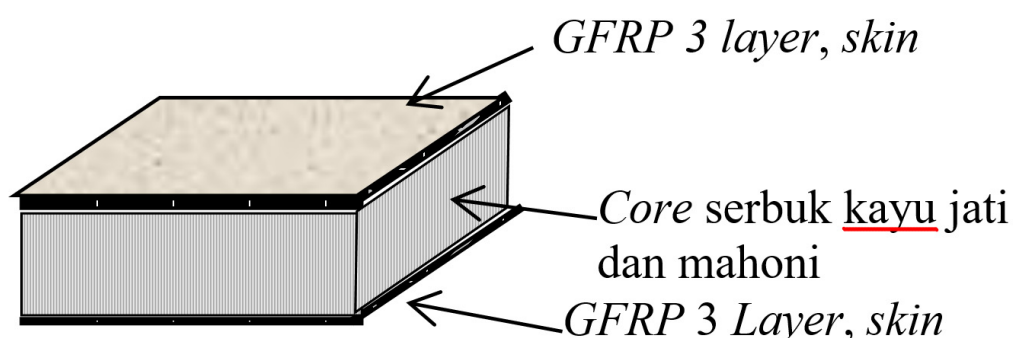
## METODOLOGI PENELITIAN

### Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama penelitian adalah *serat rami (woven)* dengan *density* 1.6 gr/m<sup>3</sup>, *serat E-Glass (woven)* dengan *density* 450 gr/m<sup>2</sup>, bahan *core* serbuk kayu jati dan mahoni pada *mesh* 30 dengan *density* 0.68 gr/m<sup>3</sup> dan 0.62 gr/m<sup>3</sup>, *unsaturated poliester type 157 BQTN*, dan *hardener MEKPO* dengan kadar 1%. Peralatan yang digunakan adalah Mesin uji tarik/bending merek *TARNO GROCKY*, timbangan untuk menentukan fraksi volume serat Foto Makro, *Oven* pengering, *Press Mold*.

### Pembuatan spesimen uji

Spesimen uji komposit *sandwich* hibrid dibuat dengan *metode press mold*. Fraksi volume serat lamina komposit hibrid/ *skin* bagian ditentukan 30%, yang dikontrol dengan ketebalan komposit *sandwich* hibrid saat pencetakan. Komposit *sandwich* hibrid tersusun dari dua *skin* komposit hibrid dengan *core* hibrid *serbuk kayu jati dan mahoni* di bagian tengahnya. Lamina komposit hibrid tersusun dari 2 lamina serat *E-glass woven* dan 1 lamina serat rami *woven*. Posisi serat *E-glass* ditempatkan pada sisi terluar yang menerima beban lebih berat. Serat rami yang digunakan terdiri dari serat tanpa perlakuan. *Core* hibrid serbuk kayu jati dan mahoni dibuat dengan *metode press mold*. Ketebalan *core* divariasikan 10, 20, 30, 40, dan 50 mm ditunjukkan seperti pada gambar 4.



Gambar 4. Komposit sandwich hibrid [8]

Agar hasil penelitian lebih komprehensif, maka komponen penyusun komposit *sandwich hibrid* juga dilakukan uji bending. Pembuatan spesimen ini dilakukan tersendiri dengan mengacu standar *ASTM D 790* [6] (untuk bending komposit *skin*) dan *ASTM D 4761* (untuk pengujian bending *core*) [9].

### Metode Pengujian spesimen uji

Berhubung aplikasi komposit *sandwich* hibrid adalah untuk *panelling* / kereta api, bis, maka pengujian yang penting dilakukan adalah uji bending. Pengujian bending dilakukan menurut standar *ASTM C 393 – 00* [7].

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

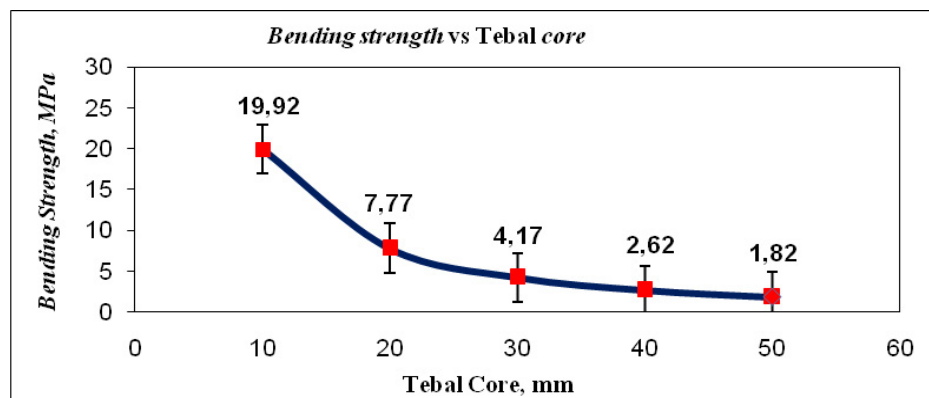
### Analisis Kekuatan Bending

Tabel 1. Momen bending komposit *sandwich* hibrid

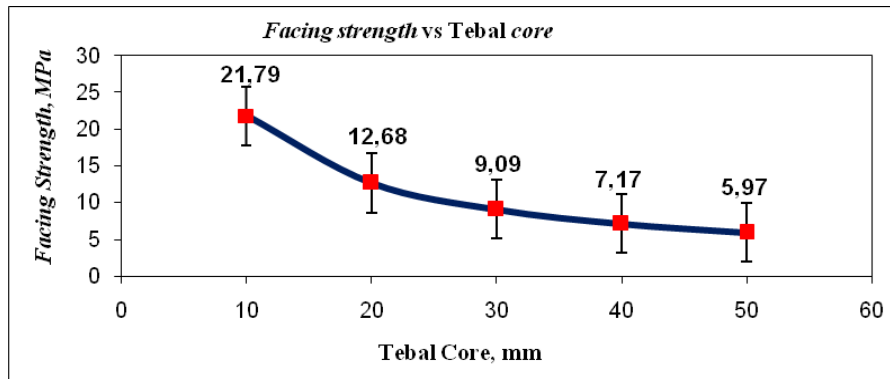
Tebal Core (mm)	Momen Maksimum [ N.m]	Tegangan Bending [MPa]	Tegangan Bending <i>facing/Skin</i> [MPa]	Kekuatan geser core [MPa]
10	25.5	19.92	21.79	4.36
20	26.25	7.77	12.68	2.54
30	27	4.17	9.09	1.82
40	27.75	2.62	7.17	1.43
50	28.5	1.82	5.97	1.19

Komposit *sandwich* hibrid yang diperkuat serat rami dan *E-Glass* tanpa perlakuan mampu menahan momen bending yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada tabel 1. Momen bending meningkat seiring dengan penambahan ketebalan *core*, seperti ditunjukkan pada gambar 5. Dengan demikian, penambahan bagian inti struktur *sandwich hibrid* menunjukkan secara signifikan peningkatan kemampuan menahan momen bending. Sifat material yang lebih lunak (*core* hibrid serbuk kayu jati dan mahoni) dan penambahan ketebalan menyebabkan memiliki kemampuan menahan momen bending yang lebih tinggi.

Bila ditinjau dari segi kekuatan bending seperti ditunjukkan pada gambar 6, kekuatan bending komposit *sandwich* hibrid menurun secara signifikan seiring dengan penambahan ketebalan *core*. Kekuatan bending *optimum* pada ketebalan *core* 10 mm.



Gambar 5. Kurva momen bending komposit *sandwich* hibrid.

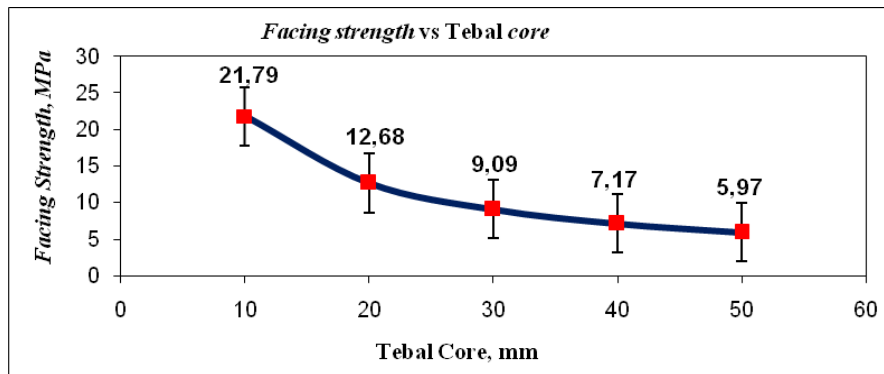


Gambar 6. Kurva kekuatan bending komposit *sandwich* hibrid.

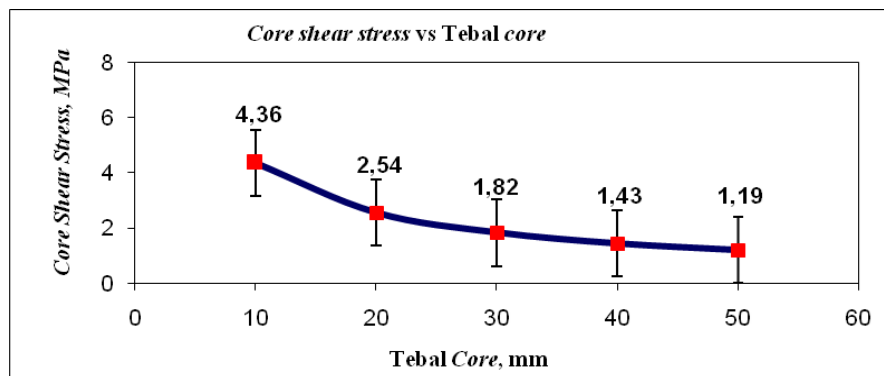
Berdasarkan analisis yang dihitung dengan standar *ASTM D 393* [7], komposit *sandwich* hibrid yang diperkuat serat rami dan *E-Glass* tanpa perlakuan, memiliki kekuatan bending *skin* yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada gambar 7. Hal yang sama menunjukkan bahwa kekuatan bending *skin* yang paling optimum terjadi pada komposit *sandwich* hibrid dengan ketebalan *core* 10 mm.

Analisis kekuatan geser *core* menunjukkan bahwa tegangan geser *core* komposit dengan serat rami dan *E-Glass* tanpa perlakuan menurun seiring dengan penambahan ketebalan *core*, seperti ditunjukkan pada gambar 8.

Hal yang sama menunjukkan bahwa kekuatan geser *core* yang paling optimum terjadi pada komposit *sandwich* hibrid dengan ketebalan *core* 10 mm.

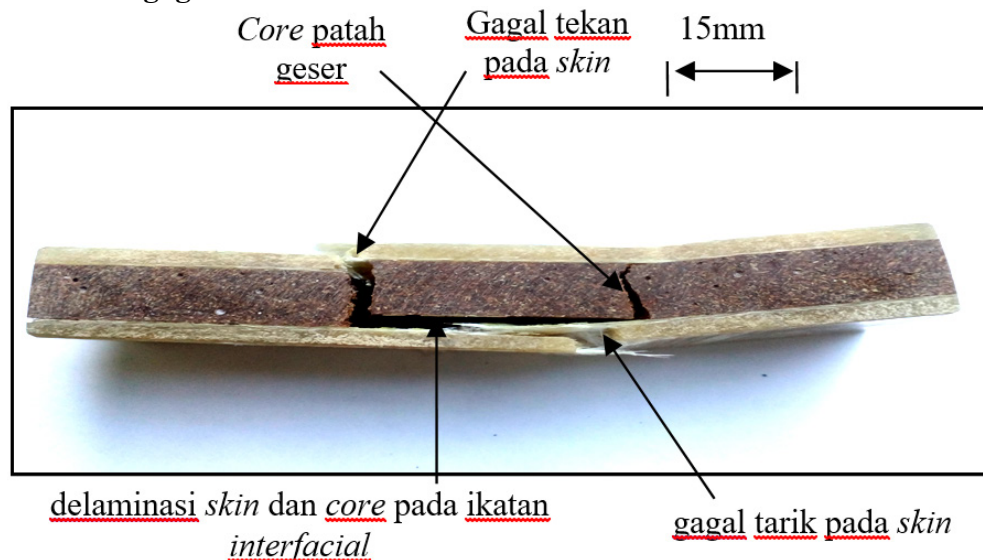


Gambar 7. Kurva kekuatan bending *skin* komposit *sandwich* hibrid.



Gambar 8. Kurva kekuatan geser *core* komposit *sandwich* hibrid.

### Analisis Pola Kegagalan



**Gambar 9. Penampang patahan komposit sandwich hibrid.**

Kegagalan bending komposit *sandwich* hibrid ditunjukkan pada gambar 9. Secara umum, pola kegagalan diawali dengan retakan pada komposit *skin* yang menderita tegangan tarik. Kemudian, beban bending tersebut didistribusikan pada *core* sehingga menyebabkan *core* mengalami kegagalan. *Skin* yang semula menderita beban tekan akhirnya mengalami kegagalan seiring dengan gagalnya *core*.

Gambar 9 menunjukkan secara jelas adanya kegagalan tarik pada komposit *skin* bawah, gagal geser *core* dan kegagalan tekan pada *skin atas*. Mekanisme patahan terjadi karena kegagalan komposit *sandwich* hibrid akibat beban bending berawal dari *skin* komposit sisi belakang (bawah) dan dilanjutkan dengan kegagalan *core*, delaminasi *skin* dan *core* pada ikatan *interfacial*.

### Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian tersebut maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan ketebalan *core* pada 10 mm hingga 50 mm pada komposit *sandwich hybrid* meningkatkan momen bending sebesar 25.5 hingga 28.5 N.m. Harga yang optimum pada ketebalan *core* 50 mm sebesar 28.5 N.m.
2. Penambahan ketebalan *core* pada 10 mm hingga 50 mm pada komposit *sandwich hybrid* menurunkan kekuatan bending sebesar 19.92 MPa menjadi 1.82 MPa. Harga yang optimum pada ketebalan *core* 10 mm sebesar 19.92 MPa.
3. Tahapan pola kegagalan komposit *sandwich* hibrid adalah kegagalan tarik *skin* komposit sisi bawah, kegagalan geser *core*, delaminasi *skin* komposit sisi atas dengan *core*, kegagalan *skin* komposit sisi atas.

### Daftar Pustaka

- [1] Febrianto, B, Diharjo, K, 2004, Kekuatan Bending Dan Impak Komposit Hibrid *Sandwich* Kombinasi Serat Karung Goni Dan Serat Gelas Polyester Dengan *Core* Kayu Sengon Laut, Skripsi, UNS, Surakarta.
- [2] Hariyanto, A.,. 2006, *Studi Perlakuan Alkali dan Tebal Core Terhadap Sifat Bending dan Impak Komposit Hybrid Sandwich Serat Kenaf dan Gelas Bermatrik Polyester dengan Core Kayu Sengon Laut*, Tesis. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.

- [3] Wahyanto, B, Diharjo, K, 2004, *Karakterisasi Uji Bending Dan Impak Komposit Sandwich GRFP Dengan Core Kayu Sengon Laut*, Skripsi, UNS, Surakarta.
- [4] Gibson, O. F., 1994, *Principle of Composite Materials Mechanics*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- [5] Shackelford, 1992, *Introduction to Materials Science for Engineer*, Third Edition, MacMillan Publishing Company, New York, USA.
- [6] Annual Book of Standards, Section 8, D 790-02, 2002, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1*, ASTM.
- [7] Annual Book of Standards, Section 15, C 393-00, 1994, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Sandwich Constructions*, ASTM.
- [8] Allen, H.G., 1969, *Analisis and design of structural sandwich Panels*, Pergamon press.
- [9] Annual Book of Standards, Section 8, D 4761-94, 1994, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Core Constructions*, ASTM.

# KARAKTERISTIK PENDIDIHAN DALAM CELAH SEMPIT REKTANGULAR VERTIKAL DENGAN VARIASI TEMPERATUR AWAL PLAT

IGN. Bagus Catrawedarma<sup>1</sup>, Indarto<sup>2</sup>, Mulya Juarsa<sup>3</sup>

<sup>(1)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banyuwangi, Banyuwangi

<sup>(2)</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

<sup>(3)</sup>PTRKN BATAN, Gd. 80 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang

Email: [ngurahcatra@yahoo.com](mailto:ngurahcatra@yahoo.com)

## ABSTRAK

Analisis perpindahan kalor pendidihan untuk mengetahui pengaruh temperatur awal plat utama terhadap karakteristik pendidihan yang meliputi waktu *rewetting*, pola *rewetting*, fluks kalor, serta *Critical Heat Flux* (CHF) telah dipelajari berdasarkan kurva pendidihan dan fluks kalor yang dihitung dari transien temperatur permukaan plat, yang merupakan hasil eksperimen dengan menggunakan 2 plat vertikal dengan celah sempit antar plat utama dan penutup adalah 1 mm. Debit dan temperatur air pendingin ditetapkan sebesar 0,09 lt/detik dan temperatur saturasi. Temperatur awal plat utama divariasikan dari 500°C, 550°C, dan 600°C. Hasil analisis menunjukkan bahwa waktu *rewetting* terendah sebesar 30 sekon dan tertinggi sebesar 290 sekon. CHF tertinggi sebesar 750 kW/m<sup>2</sup> dan terendah sebesar 400 kW/m<sup>2</sup>. Semakin tinggi temperatur awal plat, maka semakin lama waktu *rewetting*-nya. Perubahan temperatur awal plat utama tidak mempengaruhi pola *rewetting*. Semakin tinggi temperatur awal plat, maka nilai CHF-nya semakin rendah. Daerah didih film tidak sesuai dengan kasus *pool boiling*. Pada daerah transisi, semakin rendah temperatur awal plat, maka semakin mendekati korelasi Murase. Nilai CHF mendekati korelasi Leinhard. Titik Leidenfrost sesuai dengan korelasi Zuber. Daerah didih inti mendekati korelasi Murase untuk *superheat vapor*.

**Kata kunci:** waktu *rewetting*, pola *rewetting*, fluks kalor, CHF

## ABSTRACT

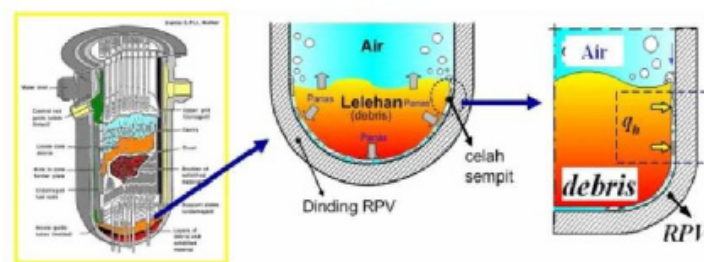
The analyze of boiling heat transfer for knowing the effect of startup temperature of main plate to the boiling characteristics including rewetting time, rewetting , heat flux, and Critical Heat Flux (CHF) is studied based on boiling curve and heat flux which are calculated from transient surface plate temperature. It is the result from experimental study using two vertical plates with 1 mm narrow split between main plate and its closing lid. The used water flowrate and temperature are 0.09 l/s and saturated temperature respectively. The startup temperatures of the main plate are variated from 500°C, 550°C, and 600°C. The result shows that the lowest rewetting time is 30 second and the highest is 290 second. The highest and the lowest CHF values are 750 kW/m<sup>2</sup> and 400 kW/m<sup>2</sup> respectively. As the startup temperatures of the main plate increases, the rewetting time also increases. The change of startup temperatures of the main plate does not effect the rewetting. The

result also shows that adding the startup temperatures of the main plate will deplete CHF value. It also give result that boiling film area does not has correlation with pool boiling. On transition area, decreasing startup temperatures of the main plate will make it close to Murase corelation and it also shows the same corelation for superheat vapor main boiling area. Moreover, the CHF value is close to Leinhard corelation and Leidenfrost point is equal to Zuber corelation.

**Keywords:** Rewetting time, rewetting, heat flux, CHF

## PENDAHULUAN

Pendidihan (*boiling heat transfer*) merupakan fenomena yang kompleks dan penting. Disebut fenomena kompleks karena dalam prosesnya terjadi perpindahan kalor 2 fase dengan berbagai parameter yang berpengaruh. Dikatakan penting karena terkait dengan aplikasinya dalam menentukan performansi heat exchanger dan keselamatan reaktor nuklir. Fenomena *boiling heat transfer* dalam reaktor nuklir terjadi saat kasus pendinginan pada celah sempit yang terbentuk antara lelehan teras (debris) dengan dinding reaktor saat terjadinya kecelakaan parah (*severe accident*) di reaktor Three Mile Island Unit 2 (TMI-2). Oleh karena itu, perlu pemahaman yang lebih mendalam terkait dengan karakteristik boiling heat transfer dalam celah sempit.



Gambar 1. Terbentuknya celah sempit dalam reaktor [3]

Banyak penelitian terkait dengan boiling heat transfer dalam celah sempit telah dilakukan oleh para peneliti, yang memfokuskan pada beberapa parameter seperti, *critical heat flux* (CHF), *pressure drop*, dan pola aliran yang terjadi pada celah sempit berdasarkan variasi ukuran celah, fluida kerja, dan panjang plat yang dipanaskan (*heated length*). Sudo dan Kaminaga (1989) [9] melakukan penelitian pada celah sempit rektanguler vertikal dengan air sebagai fluida uji untuk kasus pemanasan dari dua sisi (*double heating*), yang menggunakan ukuran panjang 750 mm, lebar 50 mm, dan lebar celah 2,25 mm serta panjang 375 mm, lebar 50 mm, dan lebar celah 2,80 mm. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan karakteristik CHF dengan membandingkan prediksi berdasarkan korelasi CCFL (*Counter Current Flow Limitation*) dan CHF hasil eksperimen. Hasil penelitiannya mengindikasikan bahwa aspek rasio mempunyai peran yang penting terhadap karakteristik CCFL dan CHF untuk aliran berlawanan arah dan aspek rasio berimplikasi kuat bahwa CHF untuk aliran ke bawah adalah minimum dalam kondisi *flooding* pada kasus inlet yang besar dan juga ketika inlet fluks massa air lebih besar dari pada dalam kondisi *flooding* untuk kasus inlet air yang kecil.

Chang dan Stan (1993) [2] melakukan penelitian dengan menggunakan aluminium rektanguler vertikal yang dipanaskan dari satu sisi, dengan lebar celah 1,98 mm, lebar 50,8 mm, dan panjangnya 609,6 mm. Penelitian dilakukan dalam kondisi steady state, kondisi

aliran dan tekanan yang rendah untuk konveksi alami. Hasil penelitiannya mengindikasikan bahwa CHF yang didapat tidak sesuai dengan korelasi yang ada yang dikembangkan untuk kondisi aliran dan tekanan yang rendah. Korelasi ini terbatas untuk tekanan atmosfer, tidak ada data yang tersedia untuk tekanan subatmosfer, yang merupakan parameter penting untuk CHF konveksi alami. Aliran ke bawah menghasilkan nilai CHF 15 % lebih kecil dari aliran ke atas, pengaruh *subcooling* untuk yang kurang dari 44 K tidak signifikan dalam celah sempit rektanguler, jika *subcooling* meningkat sampai 66 K, maka CHF meningkat 15%. Kemudian Xia, dkk. (1996) [10] melakukan penelitian fenomena pendidihan konveksi alamiah menggunakan fluida freon R-113 pada celah sempit vertikal. Fluks massa pada masukan dari bawah telah diukur, diperoleh bahwa terjadi pengurangan fluks massa yang disebabkan oleh percepatan kehilangan tekanan yang diamati sebelum tercapainya CHF. Pengurangan ukuran celah dan menaikkan ukuran panjang pelat pada fluks massa yang rendah dilakukan untuk memulai pengurangan masukan fluks massa.

Peng dan Wang (1998) [7] melakukan analisis dalam rektanguler *stainless steel* plat dengan metanol sebagai fluida uji. Hasil analisisnya menyatakan bahwa kecepatan liquid, *subcooling*, sifat fluida dan geometri mikro *channels* memiliki pengaruh yang signifikan dalam karakteristik *heat transfer*, performansi pendinginan, dan transisi pola aliran. Disamping itu kecepatan fluida dan *subcooling* tidak berpengaruh terhadap *heat transfer* pada daerah *boiling nucleat fully develop*. Sinta (2010) [8] melakukan penelitian dengan menggunakan celah sempit anulus yang dipanaskan dari dua sisi (*double heating*). Lebar celah yang digunakan 1 mm dan 2 mm, temperatur awal batang panas divariasikan dari 650°C, 750°C, dan 850°C. Fluida pendingin yang digunakan adalah air dengan temperatur 99 °C. Dari penelitian tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar ukuran celah, maka semakin pendek waktu pembasahan ulangnya, sehingga kecepatan pembasahan ulangnya semakin tinggi disamping itu semakin tinggi temperatur awalnya, maka waktu pembasahan ulangnya semakin lama dan analisis fluks kalornya mengikuti pola pendidihan kolam.

Penelitian-penelitian tersebut memperjelas bahwa berbagai parameter yang mempengaruhi proses perpindahan kalor dalam celah sempit seperti fluida uji, ukuran celah, panjang plat yang dipanaskan (*heated length*), serta sebagian besar penelitian tersebut dilakukan dalam kasus pemanasan dari satu sisi (*single heating*). Dengan demikian penelitian untuk mengetahui pengaruh temperatur awal plat pemanas vertikal terhadap karakteristik boiling heat transfer dalam celah sempit khususnya dalam kasus double heating masih memungkinkan untuk dilakukan, sehingga pada akhirnya didapat waktu rewetting, pola rewetting, heat fluks, dan koefisien heat transfer, yang merupakan penjabaran dari karakteristik boiling heat transfer.

## TEORI

### Perhitungan Fluks Kalor

Fluks kalor adalah laju kalor yang ditransfer persatuan luas. Berdasarkan pengertian dari fluks kalor, maka besarnya fluks kalor pada kurva pendidihan menjadi:

$$q = \rho \cdot d \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

### Korelasi Pemanding

Korelasi pembanding dari penelitian terdahulu dilakukan berdasarkan regim pendidihannya yaitu:



Untuk didih film digunakan korelasi yang didapat oleh Bromley (1950) [1]:

$$q = C \left[ \frac{k_g^3 \cdot g \cdot \rho_g (\rho_f - \rho_g) \Delta h_{fg}}{\mu_g \cdot L_e} \right]^{0,25} \times \Delta T_s^{0,75} \quad (2)$$

$$C = 0,667 - 0,943$$

$$L_h < 2\pi \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0,5} \rightarrow L_e = L_h$$

$$L_h > 2\pi \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0,5} \rightarrow L_e = 2\pi \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0,5}$$

Korelasi Uap Laminer [3]:

$$q = N_u \cdot \left( \frac{k_g}{D_h} \right) \Delta T_s \quad (3)$$

Untuk regim didih transisi dan didih inti digunakan korelasi yang didapat oleh Murase, dkk (2001) [6] yaitu:

Untuk didih inti air panas lanjut rendah:

$$q = 1,1 \times \frac{k_f^{1,3}}{L_e^{0,68}} \times [\rho_g \cdot \Delta h_{fg} \cdot v_f]^{-0,3} \times \left( \frac{P}{\sigma} \right)^{0,32} \times \Delta T_s^{1,3} \quad (4)$$

Untuk didih inti air panas lanjut tinggi:

$$q = 2,2 \times \frac{k_f^{0,9}}{L_e^{0,68}} \times [\rho_g \cdot \Delta h_{fg} \cdot v_f]^{0,1} \times \left( \frac{P}{\sigma} \right)^{0,32} \times \Delta T_s^{0,9} \quad (5)$$

Untuk didih transisi:

$$q = 1,2 \cdot 10^{14} \times \frac{[\rho_g \cdot \Delta h_{fg} \cdot v_f]^{5,5}}{k_f^{4,5} L_e^{0,68}} \times \left( \frac{P}{\sigma} \right)^{0,32} \times \Delta T_s^{-4,5} \quad (6)$$

Untuk *Critical Heat Flux* (CHF) dan *Leidenfrost point*

Korelasi yang digunakan sebagai pembanding pada kondisi CHF yaitu:

Korelasi Monde, dkk (1982) [5]:

$$q_{CHF} = \frac{(0,16) h_{fg} \left[ \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_g^2} \right]^{0,25}}{1 + 6,7 \times 10^{-4} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,6} \left( \frac{L_h}{\delta} \right)} \quad (7)$$

Korelasi Xia, dkk (1996) [10]:

$$q_{CHF} = \frac{\Delta h_{fg} [\sigma g (\rho_l - \rho_g) \rho_g^2]^{0,25}}{4,59 + 0,11 \left( \frac{L_h}{\delta} \right)} \quad (8)$$

Korelasi Zuber (1958) [4]:

$$\dot{q}_{min} = 0,09 \cdot \rho_f \cdot h_{fg} \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_f - \rho_g)}{(\rho_f + \rho_g)^2} \right]^{1/4} \quad (9)$$

## PERALATAN DAN PROSEDUR EKSPERIMEN

### Peralatan eksperimen

Penelitian ini menggabungkan 2 rangkaian fasilitas yaitu Untai Uji Beta dan HeaTiNG-02. Untai Uji Beta adalah alat untuk mengatur debit dan temperatur air yang mengalir kedalam celah. Untai Uji Beta memiliki pompa sentrifugal yang frekuensi putarnya dapat diatur untuk sirkulasi air pendingin, *flow meter* untuk mengukur laju aliran air pendingin, *preheater* untuk memanaskan air, termokopel dan beberapa katup untuk menutup dan mengalirkan air pendingin. HeaTiNG-02 merupakan seksi uji yang didalamnya terdapat plat utama dan plat penutup, jarak antara plat utama dan plat penutup ditetapkan 1 mm. Pada plat utama terpasang 3 buah termokopel tipe-K yaitu TC-2B, TC-6B, TC-9B, dan pada plat penutup terpasang 3 termokopel dengan tipe yang sama (TC-2D, TC-6D, TC-9D) untuk mengukur perubahan temperatur yang terjadi selama proses pemanasan dan pendinginan. Gambar 2 memperlihatkan skema rangkaian alatnya.

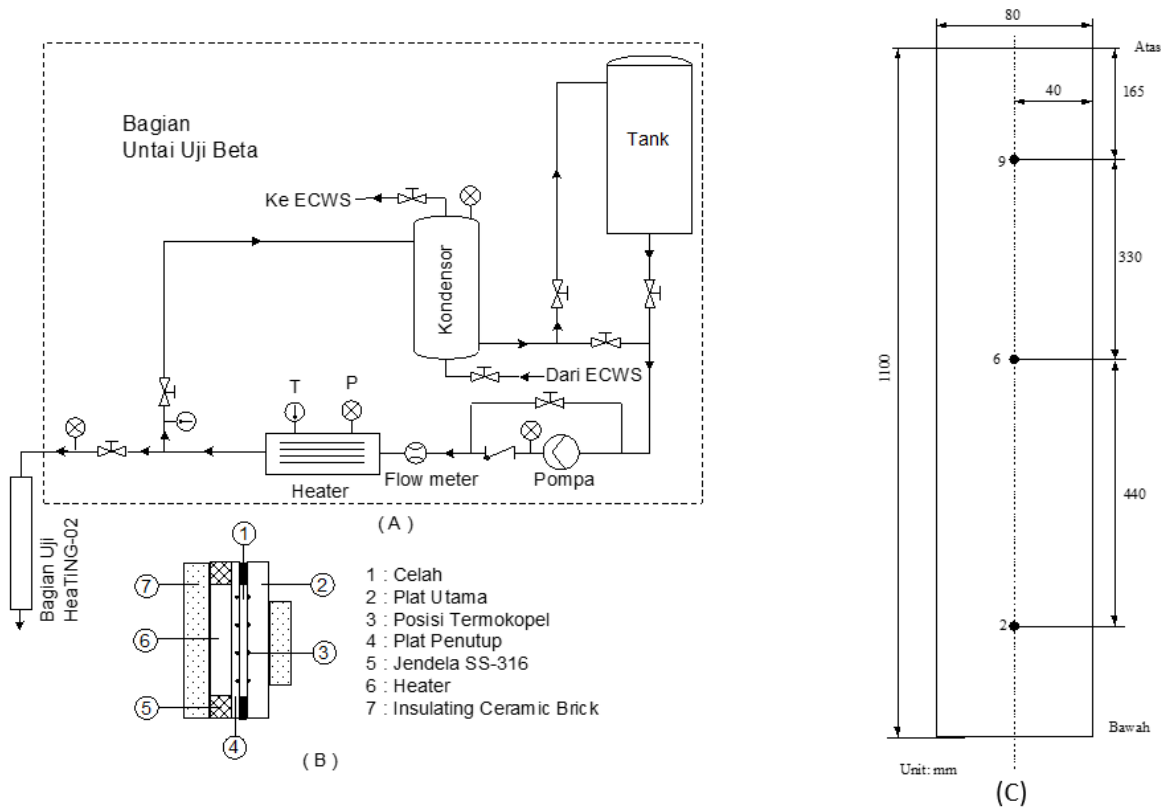
Data akuisisi sistem jenis WinDAQ T1000 yang memiliki 24 kanal digunakan untuk merekam perubahan temperatur plat selama pengujian, dengan laju perekaman 1 data per detik. Slide regulator dengan daya maksimal 25 kW digunakan untuk mengatur masukan daya selama pemanasan berlangsung sampai temperatur plat yang direncanakan (seperti pada Tabel 1). Daya dinaikkan perlahan-lahan agar kalor terdistribusi merata.

### Prosedur eksperimen

Eksperimen diawali dengan mengatur lebar celah yaitu 1 mm, kemudian memanaskan plat utama dan plat penutup dengan keramik *heater* sampai temperatur awal plat yang direncanakan yaitu 500°C, 550°C, dan 600°C. Setelah temperatur awal tercapai, selanjutnya keramik *heater* dimatikan, dan air pendingin yang debit dan temperturnya telah diseting sebesar 0,09 lt/detik dan 90°C dialirkan kedalam celah. Pengambilan data temperatur tetap dilakukan sampai seluruh termokopel pada plat utama mendekati 90°C.

Tabel 1. Parameter Penelitian

Parameter	Nilai		
	I	II	III
Temperatur awal plat utama (°C)	500	550	600
Tekanan (atm)		1	
Ukuran celah (mm)		01,00	
Debit air pendingin (L/s)		00,09	
Temperatur air (°C)		90,00	

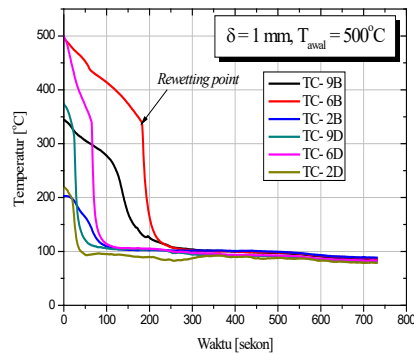


Gambar 2. (A) Skema alat penelitian, (B) Detail bagian Uji HeaTiNG-02, (C) Penempatan termokopel

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Transien Temperatur

Transien temperatur merupakan perubahan temperatur yang diukur oleh termokopel selama selang waktu tertentu. Transien temperatur merupakan sejarah temperatur dari awal sampai akhir proses pendingin. Disaat awal, temperatur plat utama maupun plat penutup cenderung mengalami penurunan yang cukup signifikan, selanjutnya setelah temperatur dibawah  $100^{\circ}\text{C}$  menurun secara perlahan-lahan sampai keseluruhan posisi termokopel mendekati temperatur  $90^{\circ}\text{C}$ , yang merupakan akhir dari proses pengambilan data. Hal ini dikarenakan oleh disaat awal belum terjadi keseimbangan heat transfer, dalam artian bahwa air pendingin belum kontak dengan plat karena tekanan uap yang menyelimuti plat cukup tinggi. Selanjutnya, seiring dengan meningkatnya waktu, maka perbedaan temperaturnya tidak terlalu signifikan sehingga penurunan temperaturnya tidak terlalu drastis.



Gambar 3. Transien temperatur awal plat utama 500°C

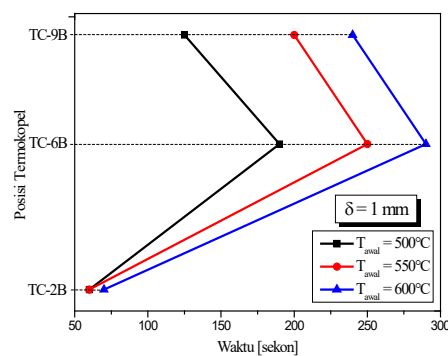
### Waktu rewetting

*Rewetting* merupakan suatu kondisi ketika air mulai menyentuh permukaan plat. *Rewetting* poin diindikasikan dengan penurunan temperatur yang cukup drastis. Waktu *rewettingnya* dapat diketahui dari grafik transien temperatur. Untuk keseluruhan variasi temperatur awal plat, waktu *rewetting* tertinggi sebesar 290 sekon pada TC-6B, dan terendah sebesar 30 sekon pada TC-2D. Waktu *rewetting* plat penutup lebih cepat dari plat utama (seperti pada **Gambar 3**), hal ini mengindikasikan bahwa air pendingin terlebih dahulu menyentuh permukaan plat penutup, selanjutnya air pendingin menyentuh permukaan plat utama. Kejadian ini diprediksi terjadi karena tekanan uap pada permukaan plat utama lebih besar dari tekanan uap pada permukaan plat penutup. Tekanan uap yang lebih besar karena kalor yang ditransfer dari plat utama lebih besar, *heat transfer* yang besar dikarenakan oleh massa dari plat utama yang lebih besar dari plat penutup. Semakin tinggi temperatur awal plat, maka waktu *rewettingnya* semakin lama. Hal ini dikarenakan oleh semakin tinggi temperatur, maka tekanan uap yang menyelimuti permukaan plat semakin besar sehingga semakin lama waktu yang dibutuhkan air pendingin untuk kontak dengan permukaan plat.

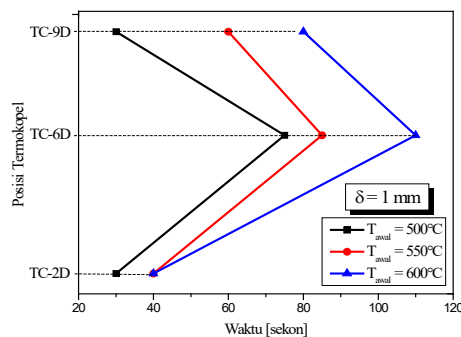
### Pola rewetting

Berdasarkan waktu *rewettingnya* dapat diketahui pola *rewetting* yang terjadi didalam celah. Pola *rewetting* dari eksperimen pada lebar celah 1 mm, bahwa air pendingin awalnya menyentuh permukaan plat penutup sebelum menyentuh permukaan plat utama, hal ini dikarenakan oleh ketika terjadi proses pendinginan temperatur plat penutup lebih cepat mengalami penurunan, sehingga tekanan uap yang menyelimuti permukaan plat penutup lebih kecil dari tekanan uap pada permukaan plat utama. Penurunan tekanan yang lebih cepat ini dikarenakan oleh plat penutup yang kontak langsung dengan udara sekitar, sehingga terjadi pendinginan dari dua sisi.

Pola *rewetting* dalam celah pada permukaan plat penutup dan plat utama dapat dijelaskan bahwa air pendingin mulai menyentuh permukaan plat dari permukaan plat bagian bawah ke atas, dan terakhir di permukaan plat bagian tengah, hal ini dikarenakan permukaan plat bagian tengah memiliki temperatur yang paling tinggi sehingga air pendingin butuh waktu yang lebih lama untuk kontak dengan permukaan plat yang terselimuti oleh uap dengan tekanan yang cukup besar. Pola *rewetting* pada semua variasi temperatur awal plat utama tidak mengalami perbedaan sehingga perubahan temperatur awal plat tidak mempengaruhi pola *rewetting*.



Gambar 4. Posisi termokopel vs waktu *rewetting* pada plat utama (TC-B)



Gambar 5. Posisi termokopel vs waktu *rewetting* pada plat penutup (TC-D)

### Heat Flux

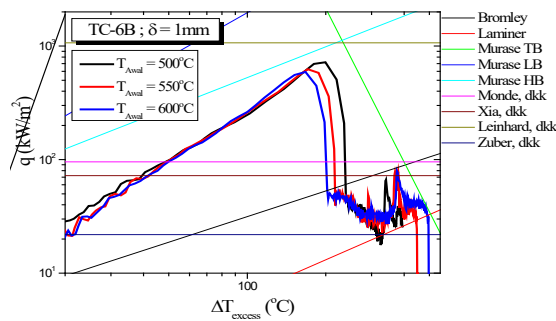
*Heat Flux* dihitung berdasarkan persamaan 1 dengan menggunakan transien temperatur. Dari kurva pendidihan dapat diketahui bahwa sudah terbentuk didih film, didih transisi, dan didih inti. Didih film terjadi diawal proses, selanjutnya didi transisi kemudian didih inti dan diakhiri dengan konveksi alami. Saat terjadi didih film, fluks kalor yang dilepas permukaan plat utama sangat kecil, hal ini dikarenakan oleh adanya uap yang menutupi permukaan plat utama, sehingga menghalangi terjadinya kontak antara air pendingin dengan permukaan plat utama, pada kasus ini perpindahan kalor secara radiasi dari permukaan uap sangat dominan, hampir perpindahan kalor konduksi dan konveksi tidak terjadi.

Selanjutnya terjadi peningkatan fluks kalor yang ditransfer ke air pendingin, karena pada kondisi ini sudah mulai terjadi kontak antara air pendingin dengan permukaan plat sehingga perpindahan kalor tidak lagi didominasi oleh perpindahan kalor secara radiasi melainkan perpindahan kalor secara konveksi. Fluks kalor terus mengalami peningkatan dari kondisi minimum (*Leidenfrost point*) sampai kondisi kritis/*Critical Heat Flux (CHF)*. Hal ini dikarenakan oleh semakin banyaknya air pendingin yang kontak dengan permukaan plat

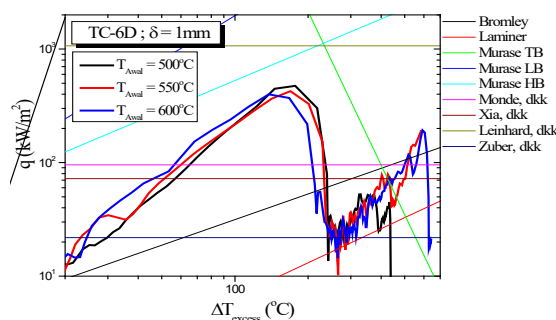
Setelah mencapai kondisi CHF, fluks kalor mengalami penurunan, fenomena ini terjadi karena semakin menurunnya perbedaan temperatur permukaan plat dengan temperatur air pendingin, atau dengan kata lain bahwa  $\Delta T_{\text{excess}}$  semakin berkurang sehingga kalor yang ditransfer persatuan luas permukaan semakin kecil. Selanjutnya diakhiri dengan

perpindahan kalor secara konveksi dan pada kondisi ini fluida yang mengalir didominasi oleh air pendingin, sehingga hanya terdapat fluida dalam bentuk satu fasa.

Berdasarkan kurva pendidihan dapat diketahui bahwa didih film terjadi ketika temperatur *excess* lebih dari 200°C. Pada daerah didih film, dapat diketahui bahwa semakin rendah temperatur awal plat utama, maka fluks kalornya semakin rendah, karena belum terjadi kontak antara air pendingin dengan plat sehingga koefisien heat transfernya semakin rendah. Pada daerah transisi, untuk plat penutup semakin rendah temperatur awal plat utama, maka semakin tinggi  $\Delta T_{excess}$ , hal ini dikarenakan oleh ketika temperatur semakin rendah maka semakin mudah air pendingin kontak dengan permukaan plat, sehingga semakin cepat untuk mencapai kondisi didih transisi. Pada daerah didih inti dapat diketahui, bahwa semakin tinggi temperatur awal plat utama, maka tidak mengalami kecenderungan yang berbeda dalam artian bahwa nilai heat fluksnya tidak mengalami perbedaan. Untuk plat penutup (termokopel D/ TC-D), pada kondisi *Leidenfrost/Minimum Film Boiling (MFB)* semakin tinggi temperatur awal plat utama maka semakin rendah heat fluks dan temperatur *Leidenfrostnya*, ini berarti bahwa ketika temperatur plat utama semakin tinggi, maka semakin rendah temperatur yang dibutuhkan untuk memulai transisi dari didih film. Ketika fluks kalornya semakin tinggi maka temperatur *Leidenfrostnya* semakin tinggi.



Gambar 6. Kurva pendidihan pada TC-6B untuk 3 variasi temperatur awal



Gambar 7. Kurva pendidihan pada TC-6D untuk 3 variasi temperatur awal

**Critical Heat Flux (CHF)**

Sesuai dengan kurva pendidihan dapat diketahui bahwa untuk keseluruhan varisai temperatur awal plat utama, nilai CHF tertinggi sebesar 750 kW/m<sup>2</sup> saat temperatur awal 500°C dan terendah sebesar 400 kW/m<sup>2</sup> saat temperatur awal 600°C. Berdasarkan perbedaan temperatur awal plat dapat dijelaskan bahwa semakin kecil temperatur awal plat, maka nilai CHF-nya semakin besar, ini disebabkan oleh ketika terjadi pendinginan, semakin kecil

temperatur awal plat maka semakin besar perubahan temperatur ketika air pendingin kontak dengan plat. Perubahan temperatur yang besar mengakibatkan fluks kalor yang dihasilkan semakin besar.

### Perbandingan dengan peneliti lain

Berdasarkan kurva pendidihan untuk ukuran celah 1 mm pada berbagai temperatur awal plat, dapat dianalisis bahwa pada daerah *film boiling* sebagian besar mendekati korelasi uap laminer dengan  $Nu = 5,16$ . Ini mengindikasikan bahwa pergerakan uap secara laminer ketika terjadi *film boiling*, dan korelasi Bromley (1950) [1] tidak cocok diterapkan dalam kasus ini, karena tidak mendekati hasil eksperimen ini. Dengan demikian korelasi *pool boiling* tidak cocok diterapkan untuk kasus *flow boiling* pada daerah didih film. Untuk posisi Leidenfrost *point*, sebagian besar mendekati korelasi Zuber (1958) [4], terutama saat temperatur awal  $500^{\circ}\text{C}$ , sehingga korelasi ini dapat digunakan untuk memprediksi besarnya *Minimum Heat Flux* (MHF) dalam kasus *flow boiling*. Untuk daerah transisi lebih mendekati korelasi Murase, dkk (2001) [6]. Untuk daerah didih inti lebih mendekati korelasi Murase, dkk (2001) [6] untuk *boiling superheat*. Nilai CHF lebih mendekati korelasi Leinhard, dkk (2002) [4] dan sangat jauh dengan korelasi Xia, dkk (1996) [10] yang dilakukan pada kasus *pool boiling* dalam geometri plat, dengan demikian walaupun geometrinya sama, aliran fluida pendingin sangat mempengaruhi besarnya CHF. Jadi, semakin rendah temperatur awalnya, maka semakin mendekati korelasi Leinhard (2001) [4], dan Murase (2001) [6], baik untuk daerah didih transisi maupun didih inti *superheat*.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pengaruh perubahan temperatur awal plat utama terhadap karakteristik pendidihan yang meliputi waktu *rewetting*, pola *rewetting*, dan CHF dapat disimpulkan bahwa:

Waktu *rewetting* terendah sebesar 30 sekon dan tertinggi sebesar 290 sekon  
CHF tertinggi sebesar  $750 \text{ kW/m}^2$  dan terendah sebesar  $400 \text{ kW/m}^2$ .

Semakin tinggi temperatur awal plat, maka semakin lama waktu *rewettingnya*.

Perubahan temperatur awal plat utama tidak mempengaruhi pola *rewetting*.

Semakin tinggi temperatur awal plat, maka nilai CHF semakin rendah.

Untuk perbandingan dengan peneliti lain bahwa:

1. Daerah didih film tidak sesuai dengan kasus *pool boiling*.
2. Pada daerah transisi, semakin rendah temperatur awal plat, maka semakin mendekati korelasi Murase (2001) [6].
3. Nilai CHF mendekati korelasi Leinhard. dkk (2002) [4].
4. Titik *Leidenfrost* sesuai dengan korelasi Zuber (1958) [4].
5. Daerah didih inti mendekati korelasi Murase (2001) [6] untuk *superheat vapor*.

### Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada Bapak Mulya Juarsa, S.Si., MEng., Bapak Ismu Handoyo dan Bapak Kiswanta, yang telah membantu selama eksperimen di Lab. Termohidrolika, PTRKN, BATAN Serpong.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bromley, L.A., 1950, *Heat Transfer in Stable Film Boiling*, Chemical Engineering Program, Vol.46, pp.221.
- [2] Chang, H.OH., and Stan, B.E., 1993, *Critical Heat Flux for Low Flow Boiling in*

- Vertical Uniformly Heated Thin Rectangular Channels*, International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 2, pp. 325-335.
- [3] Juarsa, M., dan Antariksawan, A.R., 2007, *Efek Batasan Counter Current Flow Pada Perpindahan Panas Pendidihan Dalam Celah Sempit*, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, Volume 10 No 1.
- [4] Lienhard, J.H., and Dhir, 2002, *A Heat Transfer Textbook*, Third edition, Phlogiston press.
- [5] Monde. M., Kusuda, H., and Uehara, H., 1982, *Critical Heat Flux during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channel Submerged in Saturated Liquid*, Trans. ASME, Vol.104, p.300-303.
- [6] Murase, M., Kohriyama, T., Kawabe, Y., Yoshida, Y and Okano, Y., 2001, *Heat Transfer Models in Narrow Gap*, Proceedings of ICONE 9, Nice (France), 8 – 12 April.
- [7] Peng, X.F., and Wang, B.X., 1998, *Boiling Nucleation During Liquid Flow in Microchannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 1, pp. 101-106.
- [8] Sinta, T.H., 2010, *Studi Eksperimental Perpindahan Kalor Pendidihan pada Celah Sempit Anulus dengan Variasi Lebar Celah dan Temperatur Awal Berbasis pasa Kasus Double Heating*, Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- [9] Sudo, Y., and Kaminaga, M., 1989, *A CHF Characteristic for Downward flow in A Narrow Vertical Rectangular Channel Heated From Both Sides*, International Journal Multiphase Flow, Vol. 15, No. 5, pp. 755-766.
- [10] Xia, C., Weilin, H., Zengyuan, G., 1996, *Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Narrow Channals*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.12, p.313-324