

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA  
LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC  $TiO_2$ -*SKIN*  $Al_2O_3$   
PADA KOMPOSIT CFRP**

**WAFIQ SYEACH MUHAQQI AL HAQ**  
NRP. 02511840000039

Dosen Pembimbing  
**Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197906202006042001  
**Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 1992202012023

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA  
LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC TiO<sub>2</sub>-*SKIN* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
PADA KOMPOSIT CFRP**

**WAFIQ SYEACH MUHAQQI AL HAQ**  
NRP. 0251184000039

Dosen Pembimbing  
**Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197906202006042001  
**Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 1992202012023

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL184834**

**ANALYSIS THE EFFECTS OF NOZZLE DISTANCE ON  
ADHESION STRENGTH AND THERMAL INSULATION OF  
TBC TiO<sub>2</sub>-SKIN Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ON CFRP COMPOSITES**

**WAFIQ SYEACH MUHAQQI AL HAQ**  
NRP. 0251184000039

Advisor

**Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.**

NIP. 197906202006042001

**Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.**

NIP. 1992202012023

**Study Program of Materials Engineering**  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(This page is intentionally blank)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC TiO<sub>2</sub>-*SKIN* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PADA KOMPOST CFRP

#### TUGAS AKHIR

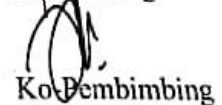
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Material  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

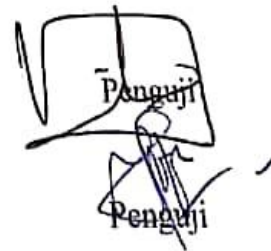
Oleh : **WAFIQ SYEACH MUHAQQI AL HAQ**  
NRP. 02511840000039

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
2. Azzah Dyah P., S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.
3. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.
4. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

  
Pembimbing

  
Ko Pembimbing

  
Penguji



**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## APPROVAL SHEET

### ANALYSIS THE EFFECTS OF NOZZLE DISTANCE ON ADHESION STRENGTH AND THERMAL INSULATION OF TBC TiO<sub>2</sub>-SKIN Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ON CFRP COMPOSITES

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree of bachelor of engineering at  
Undergraduate Study Program of Materials Engineering  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **WAFIQ SYEACH MUHAQQI AL HAQ**  
NRP. 02511840000039

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

  
Advisor

2. Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.

  
Co-Advisor

3. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.

  
Examiner

4. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

  
Examiner



**SURABAYA**  
July, 2022

*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq/02511840000039  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing/NIP : Dr. Widyastuti, S.Si.,M.Si./197906202006042001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC  $\text{TiO}_2$ -*SKIN*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  PADA KOMPOSIT CFRP” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 5 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



(Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.)  
NIP. 197906202006042001



(Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq)  
NRP. 02511840000039

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq/02511840000039  
Departement : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor/NIP : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si./197906202006042001

Hereby declare that the Final Project with the title of “ANALYSIS THE EFFECTS OF NOZZLE DISTANCE ON ADHESION STRENGTH AND THERMAL INSULATION OF TBC TiO<sub>2</sub>-SKIN Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ON CFRP COMPOSITES” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 5<sup>th</sup> 2022

Acknowledged  
Advisor

Student



(Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.)  
NIP. 197906202006042001



(Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq)  
NRP. 02511840000039

*(This page is intentionally blank)*

## ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC TiO<sub>2</sub>-*SKIN* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PADA KOMPOSIT CFRP

Nama Mahasiswa / NRP : Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq/02511840000039  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.  
Dosen Pembimbing 2 : Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.

### Abstrak

Komposit menjadi salah satu material alternatif pengganti logam karena sifatnya yang kuat dan ringan. Salah satu aplikasinya adalah *carbon fiber reinforced polymer* atau CFRP untuk material penyusun badan roket. Namun, matriks polimernya mempunyai ketahanan termal rendah dan sangat mudah terurai pada temperatur tinggi. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan *Thermal Barrier Coating* (TBC) TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk sistem perlindungan termal pada CFRP. Dalam pembuatannya terdapat tiga tahapan utama, yaitu pembuatan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menggunakan metode *hotpress*, pembuatan komposit *skin*-CFRP menggunakan metode *vacuum bagging* dan proses pelapisan menggunakan *thermal spray*. Pada pengaplikasian *thermal spray* digunakan variasi jarak *nozzle* yaitu 120, 150 dan 180 mm yang selanjutnya dianalisis pengaruhnya terhadap daya lekat dan insulasi termal. Pengujian yang dilakukan meliputi *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Thermal Conductivity Meter* (TCM) dan *Pull-Off Test*. Hasil analisis menunjukkan kenaikan jarak *nozzle* dapat meningkatkan daya lekat dari TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Daya lekat tertinggi dimiliki oleh TBC dengan jarak *nozzle* 180 mm sebesar 0,73 MPa. Hal ini disebabkan karena *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada TBC dengan jarak *nozzle* 180 mm tidak mengalami kerusakan. Semakin jauh jarak *nozzle* dapat menurunkan temperatur substrat saat proses *thermal spray*. Selanjutnya, kenaikan jarak *nozzle* dapat menurunkan kinerja insulasi termal dari TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kinerja insulasi termal terbaik dimiliki oleh TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm sebesar 69% dengan nilai konduktivitas termal sebesar 0,3005 W/m.K. TBC tersebut dapat menurunkan temperatur lingkungan dari 500°C ke 135°C. Hal ini disebabkan karena TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memiliki morfologi permukaan yang homogen dan tidak terdapat cacat.

**Kata Kunci:** *Adhesivitas, Jarak Nozzle, Lapisan Pelindung, Sifat Termal, Thermal Spray*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# ANALYSIS THE EFFECTS OF NOZZLE DISTANCE ON ADHESION STRENGTH AND THERMAL INSULATION OF TBC TiO<sub>2</sub>-SKIN Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ON CFRP COMPOSITES

**Student Name / NRP** : Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq/0251184000039  
**Departement** : Materials and Metallurgical Engineering ITS  
**Advisor** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.  
**Co-Advisor** : Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D.

## Abstract

Composite is an alternative material for metal substitution due to its strong and lightweight properties. One of the applications is carbon fiber reinforced polymer or CFRP for rocket body materials. However, the polymer matrix has low thermal resistance and easily decomposed at elevated temperature. Hence, this research investigated the thermal protection of CFRP by using thermal barrier coating or TBC TiO<sub>2</sub>-skin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. There are three main stages in fabricating the TBC, namely hotpressing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> skin, vacuum bagging of skin-CFRP composite and thermal spraying of TiO<sub>2</sub> coating. In the application of thermal spray, the nozzle distance variations that used were 120, 150, and 180 mm which are then analyzed its effect on adhesion strength and thermal insulation. Material test carried out were *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Thermal Conductivity Meter* (TCM) dan *Pull-Off Test*. The results of the analysis show that increasing the nozzle distance can improve the adhesion value of TBC TiO<sub>2</sub>-skin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. TBC which has the highest adhesion value at 0,73 MPa was obtained with a nozzle distance of 180 mm. This is because the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> skin on TBC with a nozzle distance of 180 mm was not damaged due to the length of distance could decrease substrate temperature along thermal spraying. Furthermore, the increasing the nozzle distance can reduce the thermal insulation performance of TBC TiO<sub>2</sub>-skin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. TBC which has the best thermal insulation performance at 69% was obtained with a nozzle distance of 120 mm. The TBC can decrease temperature from 500 to 135°C. This is because TBC with a nozzle distance of 120 mm has homogeneous surface morphology and there are no defects.

**Keywords:** *Adhesion, Nozzle Distance, Skin Barrier, Thermal Properties, Thermal Spray*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul, “ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC TiO<sub>2</sub>-*SKIN* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PADA KOMPOSIT CFRP”. terselesaikannya laporan tugas akhir ini tidak luput dari dukungan, bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. dan Ibu Azzah Dyah Pramata, S.T., M.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan tugas akhir hingga laporan selesai.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M..Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS
3. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc., selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis
5. Orang tua, keluarga, dan teman kuliah penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak terkait.

Surabaya, 5 Juli 2022  
Penulis

Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> .....	3
2.2 <i>Thermal Barrier Coating (TBC)</i> .....	4
2.3 TBC pada Komposit FRP .....	4
2.4 Alumina .....	5
2.5 Titania (TiO <sub>2</sub> ) .....	6
2.6 <i>Hot Press</i> .....	6
2.7 <i>Vacuum Bagging</i> .....	7
2.8 <i>Thermal Spray</i> .....	8
2.9 Konduktivitas Termal.....	9
2.10 Adhesi pada <i>Coating</i> .....	10
2.11 Kegagalan dalam <i>Coating</i> .....	11
2.12 Kajian Penelitian Sebelumnya.....	12
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>17</b>
3.1 Diagram Alir.....	17
3.2 Alat Penelitian .....	18
3.3 Bahan Penelitian .....	20
3.4 Metode Penelitian .....	23
3.4.1 Pembuatan <i>Skin Barrier</i> dengan Metode <i>Hot Press</i> .....	23
3.4.2 Pembuatan Komposit CFRP/ <i>Skin Barrier</i> .....	24
3.4.3 Pematangan Spesimen.....	24
3.4.4 Pelapisan Komposit dengan Metode <i>Thermal Spray</i> .....	25
3.4.5 Validasi Insulasi Termal.....	25
3.5 Pengujian .....	25
3.5.1 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> .....	25
3.5.2 <i>Thermal Conductivity Meter (TCM)</i> .....	26
3.5.3 <i>Adhesive Pull-Off Test</i> .....	27
3.6 Rancangan Penelitian .....	27
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>29</b>
4.1 Hasil Pembuatan TBC TiO <sub>2</sub> - <i>skin</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pada Komposit CFRP .....	29
4.2 Pengaruh Jarak <i>Nozzle</i> terhadap Daya Lekat.....	34
4.3 Pengaruh Jarak <i>Nozzle</i> terhadap Kemampuan Insulasi Termal.....	37
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>43</b>
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran .....	43

<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>45</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>49</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>53</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> <i>Carbon fiber reinforced polymer</i> (Katagiri et al., 2021).....	3
<b>Gambar 2.2</b> Hasil TGA dari CFRP (Ogasawara et al., 2010).....	3
<b>Gambar 2.3</b> Skema pembuatan <i>skin barrier</i> menggunakan metode <i>roller</i> (Luangtriratana et al., 2015) .....	4
<b>Gambar 2.4</b> Skema pembuatan <i>skin barrier</i> menggunakan metode <i>hot press</i> (Kim et al., 2021).....	5
<b>Gambar 2.5</b> Performa ketahanan termal <i>skin barrier</i> dengan metode <i>hot press</i> (Kim et al., 2021).....	5
<b>Gambar 2.6</b> Diagram Fasa TiO <sub>2</sub> (Sohlberg et al., 2009).....	6
<b>Gambar 2.7</b> Skema <i>hot press</i> (Mustika et al., 2011).....	7
<b>Gambar 2.8</b> Bahan dan alat untuk <i>vacuum bagging</i> (West System, 2010).....	7
<b>Gambar 2.9</b> Kondisi sebelum dan sesudah proses <i>vacuum bagging</i> berlangsung (West System, 2010) .....	7
<b>Gambar 2.10</b> Klasifikasi proses <i>thermal spray</i> (J.R. Davis, 2004).....	8
<b>Gambar 2.11</b> Konsep konduksi pada benda padat (Frank P. Incropera et al., 2007).....	9
<b>Gambar 2.12</b> Skema permukaan pada <i>coating</i> (Goldschmidt & Streitberger, 2007) .....	10
<b>Gambar 2.13</b> Faktor yang memengaruhi hasil <i>coating</i> (Goldschmidt & Streitberger, 2007).....	10
<b>Gambar 2.14</b> Pengujian adhesi (Goldschmidt & Streitberger, 2007) .....	11
<b>Gambar 2.15</b> Penelitian tentang sistem perlindungan termal pada CFRP dengan empat metode berbeda (Rezzoug et al., 2018) .....	13
<b>Gambar 2.16</b> Hasil pengujian daya lekat pada CFRP dengan empat metode berbeda (Rezzoug et al., 2018).....	13
<b>Gambar 2.17</b> Penampakan hasil pelapisan langsung CFRP dengan metode HVOF dan APS (Golewski & Sadowski, 2019) .....	14
<b>Gambar 2.18</b> Hasil pengujian daya lekat dengan variasi jarak (Lee et al., 2012).....	14
<b>Gambar 2.19</b> Perbandingan jarak <i>nozzle</i> dengan volume cacat pengujian penetrasi api (Lazuardi & Widyastuti, 2015).....	15
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir .....	17
<b>Gambar 3.2</b> Gelas beaker .....	18
<b>Gambar 3.3</b> Neraca Digital .....	18
<b>Gambar 3.4</b> Mesin <i>Siever</i> .....	18
<b>Gambar 3.5</b> Cetakan <i>Hot Press</i> .....	19
<b>Gambar 3.6</b> Alat <i>Hot Press</i> .....	19
<b>Gambar 3.7</b> <i>Vacuum Bagging</i> .....	19
<b>Gambar 3.8</b> <i>Thermal Spray Gun</i> .....	20
<b>Gambar 3.9</b> <i>Dremel</i> .....	20
<b>Gambar 3.10</b> Serbuk Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	20
<b>Gambar 3.11</b> Binder keramik.....	21
<b>Gambar 3.12</b> Serbuk Titanium Dioksida .....	21
<b>Gambar 3.13</b> <i>Carbon fiber</i> .....	21
<b>Gambar 3.14</b> Resin epoxy LP1Q .....	22
<b>Gambar 3.15</b> <i>Hardener</i> .....	22
<b>Gambar 3.16</b> <i>Mold Release Wax</i> .....	22
<b>Gambar 3.17</b> <i>Sealant Tape</i> .....	22
<b>Gambar 3.18</b> <i>Vacuum Bagging Film</i> .....	23
<b>Gambar 3.19</b> <i>Breather</i> .....	23

<b>Gambar 3.20</b> <i>Peel Ply</i> .....	23
<b>Gambar 3.21</b> <i>Polyamide Tape</i> .....	23
<b>Gambar 3.22</b> Skema <i>hot press</i> .....	24
<b>Gambar 3.23</b> Skema <i>vacuum bagging</i> .....	24
<b>Gambar 3.24</b> Proses <i>thermal spray</i> .....	25
<b>Gambar 3.25</b> Pengujian validasi insulasi termal .....	25
<b>Gambar 3.26</b> Mesin SEM (Anshida Mayeen, 2018).....	26
<b>Gambar 3.27</b> Alat <i>thermal conductivity meter</i> .....	26
<b>Gambar 3.28</b> Alat <i>adhesive tester</i> .....	27
<b>Gambar 3.29</b> Skema pengujian <i>adhesive pull-off test</i> .....	27
<b>Gambar 4.1</b> Visual komposit TBC TiO <sub>2</sub> - <i>skin</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	29
<b>Gambar 4.2</b> (a) Visual permukaan <i>skin</i> Al <sub>2</sub> O yang belum <i>dicoating</i> , Visual permukaan hasil <i>coating</i> TiO <sub>2</sub> dengan jarak <i>nozzle</i> (b) 120 (c) 150 (d) 180 mm.....	29
<b>Gambar 4.3</b> Morfologi penampang melintang komposit TBC setelah <i>thermal spray</i> dengan perbesaran 25x.....	30
<b>Gambar 4.4</b> Morfologi permukaan TBC dengan variasi jarak <i>nozzle</i> (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm dengan perbesaran 100x (kiri) dan 500x (kanan) .....	31
<b>Gambar 4.5</b> Grafik persebaran diameter partikel yang terdeposit pada TBC dengan variasi jarak <i>nozzle</i> (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm .....	32
<b>Gambar 4.6</b> Visual permukaan TBC dengan variasi (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm setelah menerima beban termal <i>torch</i> .....	32
<b>Gambar 4.7</b> Morfologi permukaan TBC dengan variasi (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm setelah pengujian insulasi termal dengan perbesaran 100x (kiri) dan 500x (kanan) .....	33
<b>Gambar 4.8</b> Morfologi penampang melintang TBC dengan variasi (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) pengujian insulasi termal .....	34
<b>Gambar 4.9</b> Diagram nilai daya lekat TBC .....	35
<b>Gambar 4.10</b> Grafik <i>thermal gravimetric analysis skin</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	36
<b>Gambar 4.11</b> Visualisasi setelah pengujian <i>pull-off test</i> pada TBC dengan variasi (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm .....	36
<b>Gambar 4.12</b> Diagram luas daerah <i>adhesive fracture</i> .....	37
<b>Gambar 4.13</b> Grafik perbandingan temperatur akhir teoretis dan eksperimen .....	39



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Spesifikasi alumina (Akmal Johan, 2009; Shackelford & Doremus, 2008).....	5
<b>Tabel 2.2</b> Perbandingan parameter proses <i>thermal spray</i> (J.R. Davis, 2004).....	8
<b>Tabel 2.3</b> Jenis cacat pada <i>coating</i> (Goldschmidt & Streitberger, 2007) .....	11
<b>Tabel 2.4</b> Hasil pengujian ketahanan termal GFRP/keramik (Luangtriratana et al., 2015).....	12
<b>Tabel 2.5</b> Daftar penelitian mengenai pelapisan CFRP .....	15
<b>Tabel 2.6</b> Daftar penelitian mengenai <i>thermal spray</i> .....	15
<b>Tabel 3.1</b> Kandungan binder.....	20
<b>Tabel 3.2</b> Kandungan serbuk <i>coating</i> .....	21
<b>Tabel 3.3</b> Parameter metode <i>hot press</i> .....	24
<b>Tabel 3.4</b> Ukuran spesimen.....	24
<b>Tabel 3.5</b> Parameter <i>powder flame spray</i> .....	25
<b>Tabel 3.6</b> Rancangan penelitian.....	27
<b>Tabel 3.7</b> Jadwal penelitian.....	28
<b>Tabel 4.1</b> Hasil pengujian <i>thermal conductivity meter</i> .....	37
<b>Tabel 4.2</b> Hasil pengujian insulasi termal.....	38
<b>Tabel 4.3</b> Tabulasi Karakterisasi TBC.....	40

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Komposit *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) adalah material yang terdiri dari dua bahan utama yaitu matriks polimer tangguh yang diperkuat oleh filamen/serat karbon yang memiliki kekuatan tinggi, yang berperan sebagai *reinforcements* (Poór et al., 2021). Hal ini membuatnya menjadi salah satu material alternatif pengganti logam karena murah, ringan, tahan di berbagai kondisi serta memiliki sifat mekanik yang baik. Tapi sayangnya CFRP tidak memiliki ketahanan panas dan api sebaik logam karena tersusun dari *matriks* polimer organik (B. K. Kandola & Kandare, 2008). Rata-rata ketahanan panas dari CFRP adalah di bawah temperatur gelas yaitu sekitar 150-220°C, yang ketika memasuki temperatur operasi tersebut dapat menyebabkan CFRP kehilangan 50% dari sifat aslinya (Kandare et al., 2010; Mouritz et al., 2009). Pada pengembangannya, CFRP juga dikembangkan untuk bahan *body space shuttle orbiter* yang bergerak dengan kecepatan supersonik yang menyebabkan temperaturnya mencapai lebih dari 1600°C (Ahmad et al., 2021).

Salah satu metode yang digunakan untuk merekayasa sifat termal material adalah *Thermal Barrier Coatings* (TBC). TBC dapat mengurangi degradasi termal suatu material dengan menurunkan temperatur operasi yang masuk yang bergantung pada ketebalan suatu material (Liu et al., 2019). Beberapa material yang biasa digunakan dalam aplikasi TBC adalah *aluminium oxide* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), *yttria-stabilized zirconia* ( $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ ) dan *mullite* ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  or  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) (Kim et al., 2021). Pembuatan TBC dilakukan pada temperatur tinggi (800-1000°C) sehingga material substrat harus memiliki ketahanan temperatur pada kisaran tersebut (Feuerstein et al., 2008).

Dalam perkembangannya, penelitian mengenai pengaplikasian *thermal spray* pada CFRP yang dilakukan oleh Golewski dkk. pada tahun 2019 menunjukkan hasil yang kurang memuaskan. ketika komposit CFRP diberi perlakuan *thermal spray*, permukaan sekitar daerah *coating* mengalami perubahan karena dampak panas yang dihasilkan alat (Golewski & Sadowski, 2019).

Di waktu lain juga dikembangkan penelitian mengenai *skin barrier* pada *glass-FRP* (GFRP) dengan dua metode oleh Laungtriratana dkk. pada tahun 2015. Pertama dengan cara melaminasikan campuran serbuk keramik dan *phenolic* pada lapisan teratas komposit. Lalu untuk *finishing* ditaburkan lagi serbuk keramik. Metode ini membuahkan hasil yaitu dapat menghambat kenaikan temperatur hingga 30 detik (Luangtriratana et al., 2015). Pada penelitian serupa oleh Kandola dkk. Pada tahun 2016 mereka menggunakan material substrat yang berbeda yaitu *carbon-FRP* (CFRP) (B. Kandola et al., 2016).

Kemudian penelitian ini dikembangkan kembali oleh Kim H. dkk. Pada tahun 2021 dengan metode yang berbeda. Mereka menggunakan metode *hot press* untuk membuat lapisan pelindung (*skin barrier*) berbahan dasar alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Setelah lapisan tersebut terbentuk selanjutnya dilaminasikan pada lapisan teratas komposit CCFRP dengan bantuan *vacuum bagging*. Hasil dari pengujian *flame test* yang dilakukan menunjukkan penurunan temperatur operasi hingga 30% pada bagian dalam CFRP. Penelitian ini ditujukan untuk aplikasi *body fire-fighting drone* yang beroperasi pada musibah kebakaran (Kim et al., 2021).

Dari dua latar belakang diatas, penelitian ini ingin menggabungkan proses *thermal spray* dan *skin barrier* yang di teliti Kim H dkk. untuk meningkatkan sifat termal dari CFRP. Banyak faktor yang memengaruhi kemampuan *skin barrier* dalam menerima perlakuan *termal spray*. Salah satunya adalah jarak *nozzle* yang dapat memengaruhi sifat termal dan daya lekat antara satu lapisan dengan lapisan lainnya (Abbas et al., 2021). Karena hal tersebut, pada penelitian

ini ingin mengetahui bagaimana pengaruh jarak *nozzle* terhadap daya lekat dan insulasi termal lapisan TBC *skin barrier coating*, sehingga bisa didapatkan TBC dengan hasil yang optimal.

### 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, maka didapatkan rumusan masalah pada penelitian ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh jarak *nozzle* terhadap daya lekat TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada komposit CFRP.
2. Bagaimana pengaruh jarak *nozzle* terhadap insulasi termal TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada komposit CFRP.

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini agar hasil akhir yang didapatkan tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, antara lain:

1. Pencampuran material dianggap homogen.
2. Parameter *hot press* seperti temperatur dan tekanan dianggap konstan.
3. Unsur pengotor dan faktor lingkungan diabaikan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, penelitian ini memiliki tujuan, antara lain:

1. Menganalisis pengaruh jarak *nozzle* terhadap daya lekat TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada komposit CFRP.
2. Menganalisis pengaruh jarak *nozzle* terhadap insulasi termal TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada komposit CFRP.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat membuat sistem TBC dengan basis *skin barrier* keramik pada substrat FRP yang memiliki sifat termal dan daya lekat yang baik. Selain itu, juga dapat menjadi referensi penelitian ke depan untuk terus mengembangkan teknologi perlindungan termal FRP yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi teknologi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Carbon Fiber Reinforced Polymer

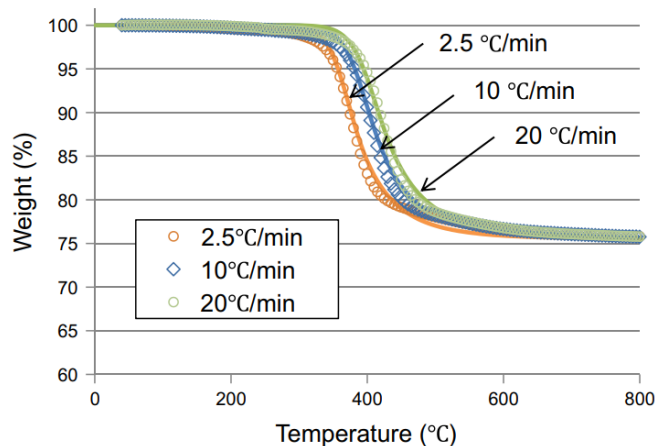
Komposit *fiber reinforced polymer* (FRP) terdiri dari dua bahan utama yaitu matriks tangguh yang diperkuat oleh filamen/serat yang memiliki kekuatan tinggi, yang berperan sebagai *reinforcements*. Kombinasi yang tepat antara matriks dan *reinforced* dapat menghasilkan material dengan sifat mekanik yang baik dan unggul (Poór et al., 2021).

*Carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) merupakan salah satu jenis komposit FRP berpenguat serat karbon. Aplikasi CFRP sering digunakan di industri pesawat terbang dan dirgantara karena bobotnya yang ringan sehingga dapat menghemat emisi bahan bakar. Selain itu CFRP juga memiliki sifat mampu menahan beban tarik dan tekan yang baik, ketahanan elektrik yang bagus serta mudah dimanufaktur ke dalam bentuk yang kompleks (Hegde et al., 2019). CFRP mempunyai konduktivitas termal sebesar 0,36 W/m.K (Adamczyk et al., 2018).



**Gambar 2.1** Carbon fiber reinforced polymer (Katagiri et al., 2021)

Namun, kekuatan dan ketangguhan CFRP akan menurun ketika memasuki temperatur gelas dari matriks polymernya (kurang dari 200°C) (Kodur et al., 2019). Beberapa matriks yang biasa digunakan untuk CFRP seperti *phenolic*, *epoxy*, dan *polyester* memiliki temperatur dekomposisi masing-masing di *range* 440-520°C, 360-430°C dan 215-400°C (B. K. Kandola & Kandare, 2008). Karena sifat buruknya inilah, ketahanan terhadap api dan panas dari CFRP banyak dikembangkan untuk mencegah degradasi termal yang terjadi (Kodur et al., 2019).



**Gambar 2.2** Hasil TGA dari CFRP (Ogasawara et al., 2010)

Berdasarkan Gambar 2.2 dapat dilihat jika CFRP mulai mengalami penurunan massa hingga 25% pada temperatur sekitar 300°C yang disebabkan oleh kenaikan temperatur pada alat uji TGA. Pada temperatur sekitar 500°C dekomposisi matriks epoxy selesai (Ogasawara et al., 2010).

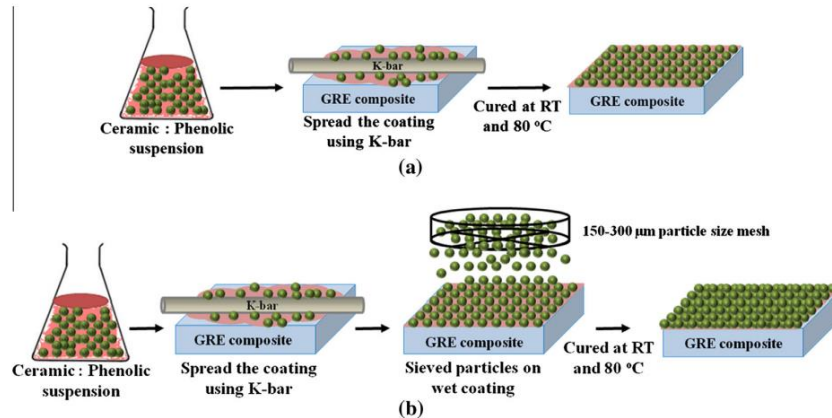
## 2.2 Thermal Barrier Coating (TBC)

*Thermal barrier coating* (TBC) merupakan salah satu teknologi perlindungan termal dimana bahan keramik dilapiskan atau diendapkan pada substrat logam, biasanya mesin pesawat atau turbin gas yang beroperasi di temperatur tinggi. Lapisan ini melindungi substrat dari retakan, oksidasi atau pelelehan (The American Ceramic Society, 2009).

Metode TBC ada berbagai macam seperti *electron beam physical vapor deposition*, *sol-gel*, *plasma spray*, *high-velocity oxy-fuel*, dan *laser chemical vapor deposition*. EB-PVD merupakan metode paling konvensional (1980) yang memiliki hasil kekasaran permukaan paling bagus, dibandingkan dengan *thermal spray*. EB-PVD bisa diaplikasikan ke banyak material dengan memanfaatkan mekanisme deposisi elektron yang terbentuk pada temperatur 2000°C dalam *electron gun* yang diikuti oleh percepatan elektron termal di bawah voltase tinggi (Zhang, 2011). Sedangkan metode *thermal spray* merupakan metode yang sering digunakan untuk melapisi logam maupun non logam. Beberapa jenis *thermal spray* meliputi *plasma spray*, *flame spray* dan *electric arc spray* (J.R. Davis, 2004)

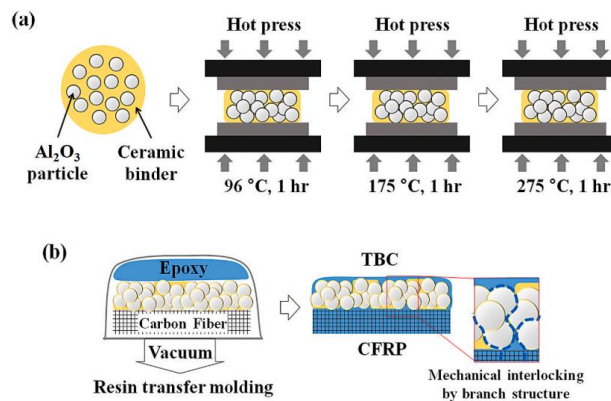
## 2.3 TBC pada Komposit FRP

Pada tahun 2015, Luangtriratana dkk. merekayasa permukaan GFRP agar bisa beroperasi pada temperatur tinggi. Metode yang dipakai oleh mereka adalah dengan mencampurkan serbuk keramik *nanoclay*, *fumed nanosilica*, *glass flake*, *alumina titanate*, dan zirconia pada binder *phenolic resin* untuk dilapiskan bersamaan pada lapisan paling atas GFRP. Alat untuk meratakan lapisan campuran serbuk keramik dan binder adalah *K-bar*. Untuk *finishingnya* ditaburkan kembali serbuk keramik pada bagian atas GFRP yang semi-kering (Luangtriratana et al., 2015).

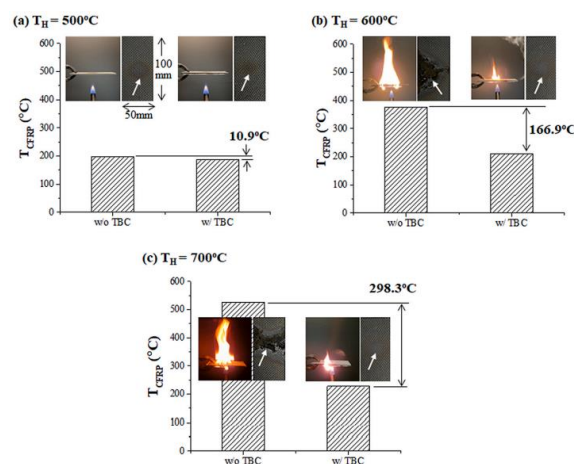


**Gambar 2.3** Skema pembuatan *skin barrier* menggunakan metode *roller* (Luangtriratana et al., 2015)

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung keramik dan binder dapat menghambat kenaikan temperatur hingga 30 detik (Luangtriratana et al., 2015). Dengan konsep yang sama Kim H. dkk. mencoba mengembangkan lapisan pelindung tersebut lebih *advance* dengan membuat lapisan tipis keramik terlebih dahulu dengan metode *hot press*. Serbuk keramik  $Al_2O_3$  dicampurkan dengan bindernya lalu dimasukkan ke mesin *hot press*. Selanjutnya lapisan keramik yang terbentuk dilaminasikan dalam komposit CFRP dan dikeringkan bersamaan menggunakan metode *vacuum bagging* (Kim et al., 2021).



**Gambar 2.4** Skema pembuatan *skin barrier* menggunakan metode *hot press* (Kim et al., 2021)



**Gambar 2.5** Performa ketahanan termal *skin barrier* dengan metode *hot press* (Kim et al., 2021)

Hasil dari penelitian Kim H. dkk. menunjukkan bahwa *skin barrier* mampu menurunkan temperatur lingkungan hingga 50% (Kim et al., 2021)

## 2.4 Alumina

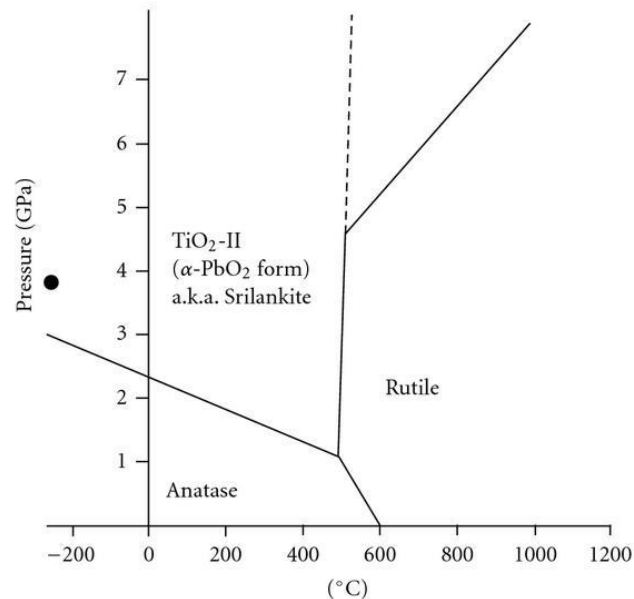
Alumina adalah salah satu material berjenis keramik yang sering diaplikasikan dalam kehidupan manusia, seperti komponen *furnace*, alat potong, komponen insulator, dan lain-lain. Salah satu sifat yang dimanfaatkan dari alumina adalah ketahanan terhadap termal sangatlah baik hingga 2054°C serta secara kimiawi tidak reaktif. Selain itu kekerasan, kekuatan dan ketahanan abrasi alumina termasuk yang tertinggi untuk jenis oksida (Shackelford & Doremus, 2008).

**Tabel 2.1** Spesifikasi alumina (Akmal Johan, 2009; Shackelford & Doremus, 2008)

Parameter	Spesifikasi Alumina
Material	Aluminium oxide
Massa jenis	3,2-3,96 g.cm <sup>-3</sup>
Titik lebur	2054°C
Konduktivitas termal	6,2 W(mK) <sup>-1</sup>
Modulus elastisitas	40 Mpsi
Creep rate	0,13x10 <sup>5</sup> h <sup>-1</sup>

## 2.5 Titania ( $\text{TiO}_2$ )

Titanium dioksida atau dikenal titania merupakan salah satu oksida logam yang biasa digunakan sebagai serbuk *coating*. Titania merupakan hasil dari ekstraksi mineral seperti *ilmenite* ( $\text{FeTiO}_3$ ), *perovskite* ( $\text{CaTiO}_3$ ), *titanite* ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) dan lain-lain. Titania dipilih untuk digunakan pada proses *thermal spray* karena materialnya yang keras, temperatur lelehnya yang tinggi, dan sesuai diaplikasikan pada *flame gun* karena mudah ditransformasi dari fasa *anatase* (metastabil) ke *rutile* (stabil) (Gardon & Guilemany, 2014). Biasanya perubahan fasa tersebut dimulai pada pemanasan temperatur  $500^\circ\text{C}$  (Sohlberg et al., 2009).



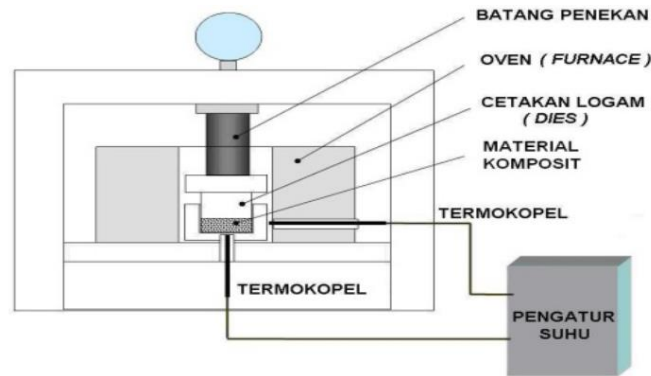
**Gambar 2.6** Diagram Fasa  $\text{TiO}_2$  (Sohlberg et al., 2009)

$\text{TiO}_2$  memiliki temperatur leleh relatif rendah daripada keramik lainnya yaitu  $1855^\circ\text{C}$  (Ibrahim et al., 2007). Sedangkan untuk konduktivitasnya berada di  $8,5 \text{ W/m.K}$  (Gao & Jelle, 2013).

## 2.6 Hot Press

*Hot Press* merupakan salah satu metode hasil kombinasi tekanan dan temperatur yang diaplikasikan bersamaan untuk mencapai kepadatan tertentu suatu material keramik. Temperatur yang digunakan relatif lebih rendah daripada proses *sintering* biasa. Temperatur yang rendah ini menghambat peledakan pertumbuhan butir yang tidak terkontrol. Proses *hot press* tidak memerlukan campuran aditif yang biasanya digunakan untuk menurunkan temperatur *sintering* yang memiliki dampak pada perubahan sifat mekanik (Atkinson & Davies, 2000). Sama seperti metode sejenis seperti proses *hot forging* dan ekstrusi, *hot press* memberikan hasil dengan porositas yang lebih rendah dan kenaikan densitas serta kekuatan ikatan permukaan (Mustika et al., 2011).

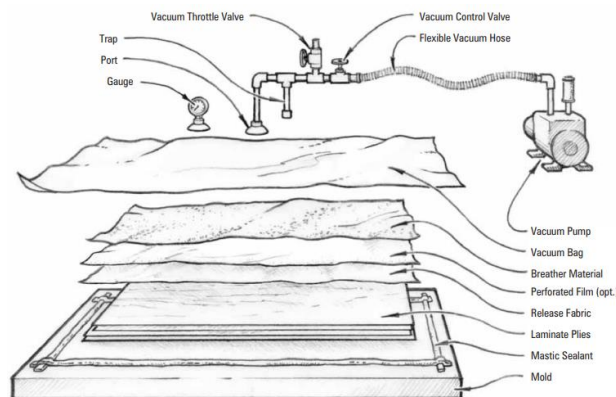




**Gambar 2.7** Skema *hot press* (Mustika et al., 2011)

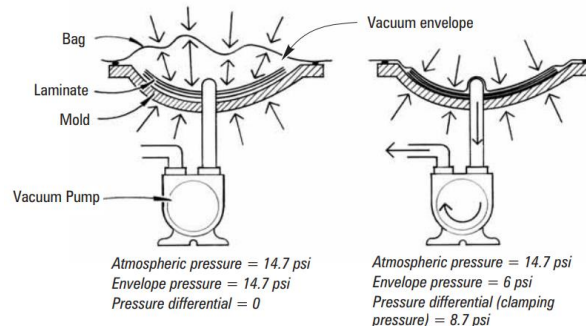
### 2.7 Vacuum Bagging

Metode dalam pembuatan komposit CFRP ada yang disebut *hand lay-up*, tapi proses pengeringan *hand lay-up* banyak menimbulkan emisi berbahaya bagi pernapasan dan iritasi kulit. Sehingga dikembangkan teknologi *vacuum bagging* (Bharath et al., 2021). *Vacuum Bagging* menggunakan bantuan tekanan atmosfer untuk menekan laminasi hasil *hand lay-up* secara bersamaan. Hasil laminasi tersebut dibungkus dalam kantong kedap udara (West System, 2010).



**Gambar 2.8** Bahan dan alat untuk *vacuum bagging* (West System, 2010)

Ketika pompa dinyalakan, udara di dalam kantong disedot keluar sehingga memaksa setiap sisi dan sudut kantong selubung secara keseluruhan untuk memiliki tekanan yang sama. Proses ini berlangsung hingga tekanan yang ada di dalam dan luar kantong mendekati tekanan atmosfer sekitar 14,7 psi (West System, 2010).

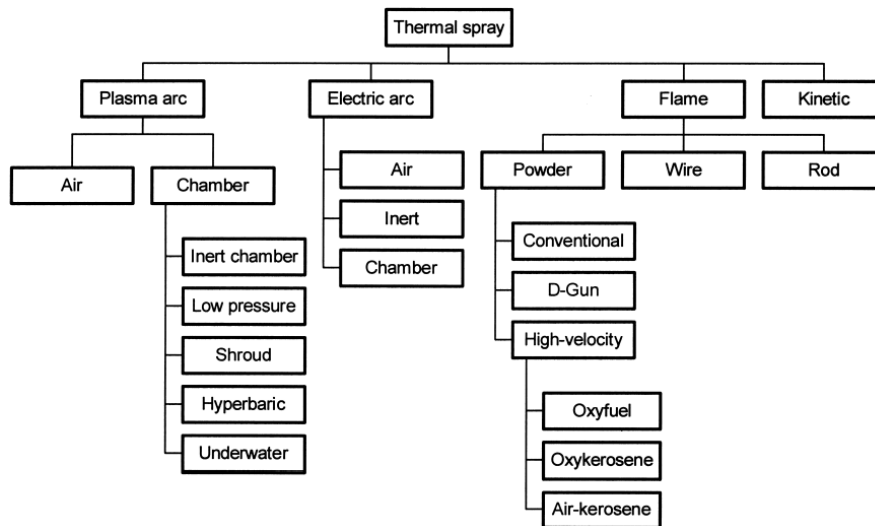


**Gambar 2.9** Kondisi sebelum dan sesudah proses *vacuum bagging* berlangsung (West System, 2010)

Beberapa keuntungan menggunakan *vacuum bagging* adalah menekan permukaan atas laminasi sehingga menghasilkan permukaan yang lebih rata, mengendalikan kelebihan resin, dapat digunakan untuk mencetak bentuk yang rumit, dan laminasi lebih efisien (West System, 2010).

## 2.8 Thermal Spray

*Thermal spray* adalah metode *coating* yang bisa diaplikasikan pada material logam maupun non logam. Secara umum dibagi menjadi tiga jenis, yaitu *plasma spray*, *flame spray* dan *electric arc spray*. Sumber energi digunakan untuk memanaskan material *coating* (serbuk, kawat atau *rod form*) hingga meleleh atau semi leleh. Partikel material tersebut selanjutnya ditembakkan menuju permukaan substrat yang sudah dipersiapkan sebelumnya oleh gas pendorong. Setelah mengenai permukaan substrat, partikel saling menumpuk membentuk suatu ketebalan tertentu dan mengalami laju pendinginan yang sangat tinggi lebih dari 106K/s (J.R. Davis, 2004).



Gambar 2.10 Klasifikasi proses *thermal spray* (J.R. Davis, 2004).

Tabel 2.2 Perbandingan parameter proses *thermal spray* (J.R. Davis, 2004).

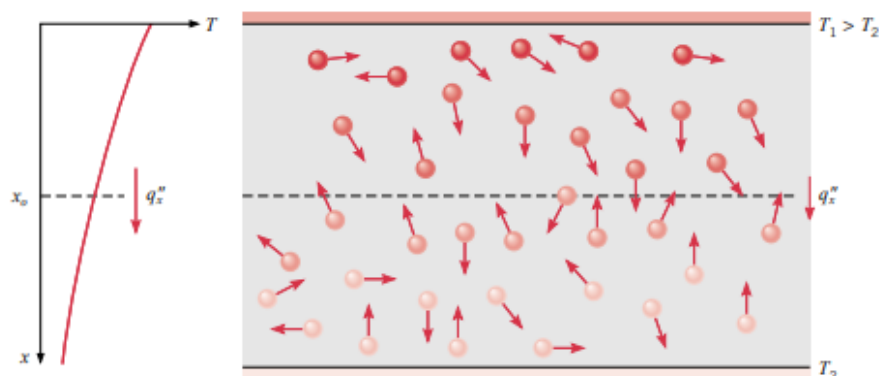
Parameter	Flame Powder	HVOF	HVAF	Plasma Spray
Temperatur jet (°C)	2500	5500	2000	15000
Temperatur partikel (°C)	1500	3300	1000	>3800
Flame temperature (°C)	400	1000-2000	800	1000
Gas	O <sub>2</sub> , asitilen	CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
Laju gas (m/s)	100-200	400-1100	1400	100-200
Laju partikel (m/s)	50-100	200-1000	1100-1200	200-800
Daya lekat relatif*	1-3	10	9	10
Feed rate (g/min)	20-50	15-50	50	90-99
Jarak nozzle (mm)	120-250	150-300	-	60-130

\*= rendah (1) – tinggi (10)

Selain bisa diaplikasikan pada semua jenis substrat, *thermal spray* juga dapat mendepositkan semua material seperti logam, paduan, plastik, *cermets*, dan komposit. Hasil *coating* yang dihasilkan mulai dari 50  $\mu\text{m}$ -6,5 mm (J.R. Davis, 2004).

## 2.9 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu bahan untuk mentransfer panas. Biasanya dilihat dari perbedaan temperatur dari dua permukaan suatu bahan. Konduktivitas termal banyak dipengaruhi oleh banyaknya electron bebas, kemurnian material, proses pembuatan material, temperatur, tekanan, kepadatan dan struktur kristal. Konduktivitas termal dapat dihitung dalam dua kondisi, yaitu kondisi *transient* dan *steady state*. Kondisi *steady state* merujuk pada temperatur konstan pada setiap titik spesimen dan meniadakan fungsi waktu. Sedangkan kondisi *transient* merujuk pada perubahan temperatur saat pemanasan ataupun pendinginan (Gou et al., 2015).



**Gambar 2.11** Konsep konduksi pada benda padat (Frank P. Incropera et al., 2007)

Pada Gambar 2.10, terlihat bahwa  $T_1 > T_2$ , ini disebabkan karena terjadi perpindahan energi dari molekul yang berenergi tinggi ke molekul yang berenergi rendah saat tabrakan energi terjadi. Sehingga jika suatu bahan memiliki konduktivitas yang baik maka gradien perbedaan antara  $T_1$  dan  $T_2$  tidak terlalu besar. Sistem perpindahan energi panas pada TBC menganut prinsip *composite walls*. Perpindahan panas tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Frank P. Incropera et al., 2007).

$$Q = k \cdot A \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_a}{(k_a \cdot A)} + \frac{L_b}{(k_b \cdot A)} + \frac{L_c}{(k_c \cdot A)}} \quad (2.2)$$

Diketahui:

Q = Banyaknya kalor (*Joule*)

q = *Heat rate* (J/s)

k = Konduktivitas termal (W/m. $^{\circ}$ C)

A = Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

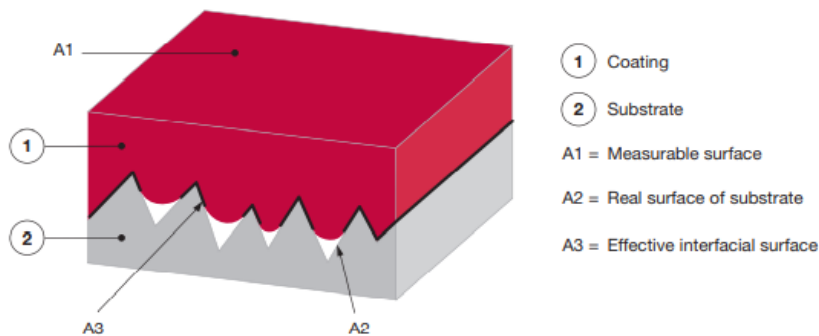
t = Waktu (s)

T = Temperatur ( $^{\circ}$ C)

L = Panjang/tebal bahan (m)

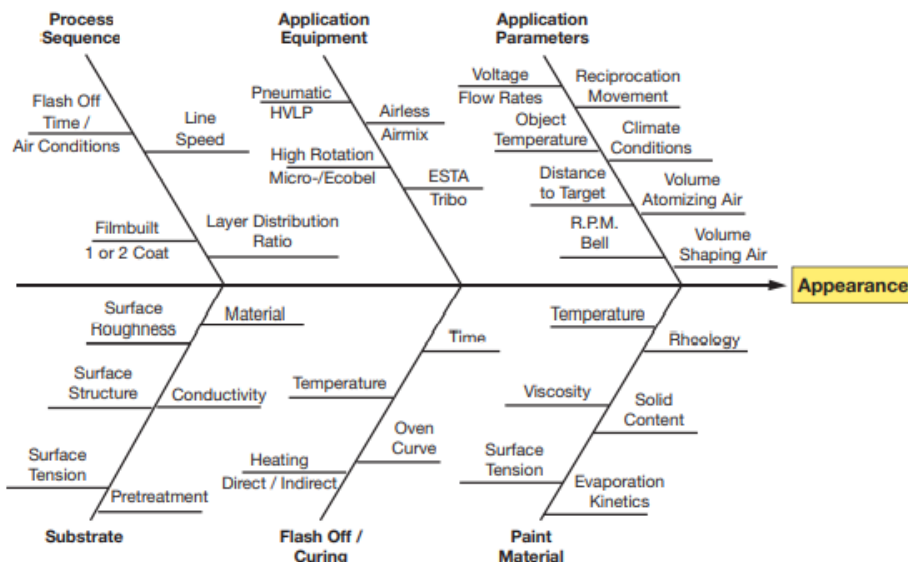
## 2.10 Adhesi pada Coating

Menurut *American Society for Testing and Materials (ASTM) (D907-07)*, adhesi ialah keadaan dimana dua permukaan disatukan oleh gaya antarmuka (*interface*) (Rickerby, 1988). Adhesi pada hasil *coating* sangatlah penting karena sedikit saja muncul bagian yang terkelupas maka itu sudah dianggap sebagai bentuk kegagalan. Kebersihan pada permukaan substrat menjadi salah satu parameter penting dari hasil sebuah *coating* (Goldschmidt & Streitberger, 2007).



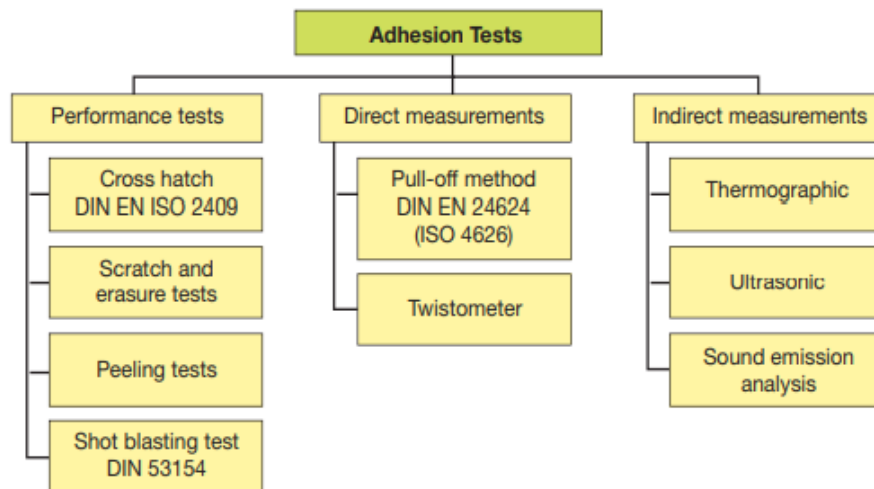
**Gambar 2.12** Skema permukaan pada *coating* (Goldschmidt & Streitberger, 2007)

Pada Gambar 2.11, A1 merupakan permukaan *coating* yang bisa terukur dan A2 merupakan permukaan substrat. Sedangkan A3 merupakan permukaan yang bersentuhan antara keduanya (*interface*). Selain kebersihan permukaan yang disebutkan di atas banyak factor yang memengaruhi hasil dari *coating*. Diantaranya adalah prosedur *coating*, jenis alat, parameter alat, kondisi substrat, waktu *curing*, dan material *coating* itu sendiri (Goldschmidt & Streitberger, 2007).



**Gambar 2.13** Faktor yang memengaruhi hasil *coating* (Goldschmidt & Streitberger, 2007)

Adhesi pada *coating* (daya lekat) dapat dihitung dengan beberapa metode seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.14 Pengujian adhesi (Goldschmidt & Streitberger, 2007)

### 2.11 Kegagalan dalam Coating

Setelah pengaplikasian *coating* pada suatu substrat, dilakukan proses inspeksi untuk mengetahui kondisi hasil *coating* mengalami kecacatan atau tidak. Berikut merupakan beberapa jenis cacat pada *coating* yang disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Jenis cacat pada *coating* (Goldschmidt & Streitberger, 2007)

Nama Cacat	Deskripsi	Gambar
<i>Bubbling</i>	Cacat yang disebabkan oleh terjebaknya udara dalam lapisan <i>coating</i> akibat proses penyemprotan yang terlalu tebal.	
<i>Cratering</i>	Cacat yang disebabkan oleh meledaknya <i>bubbles</i> /rongga udara yang terjebak pada struktur <i>coating</i> .	
<i>Delamination</i>	Kondisi dimana <i>coating</i> tidak menempel sempurna pada substrat. Biasanya disebabkan oleh pengaturan pada parameter.	
<i>Pinhole</i>	Kondisi dimana permukaan <i>coating</i> memiliki lubang-lubang kecil akibat meletusnya gelembung-gelembung kecil pada saat proses pendinginan.	

Selain itu pada pengujian daya lekat *coating* juga dikenal *adhesive fracture* dan *cohesive fracture*. Hasil daya lekat *coating* yang baik mempunyai penampang hasil uji berupa *adhesive fracture*. *Adhesive fracture* menandakan bahwa ikatan antar lapisan *coating* keramik berikatan kuat. Sedangkan *cohesive fracture* menandakan bahwa ikatan antar lapisan *coating* keramik berikatan lemah (Varavallo et al., 2012).

## 2.12 Kajian Penelitian Sebelumnya

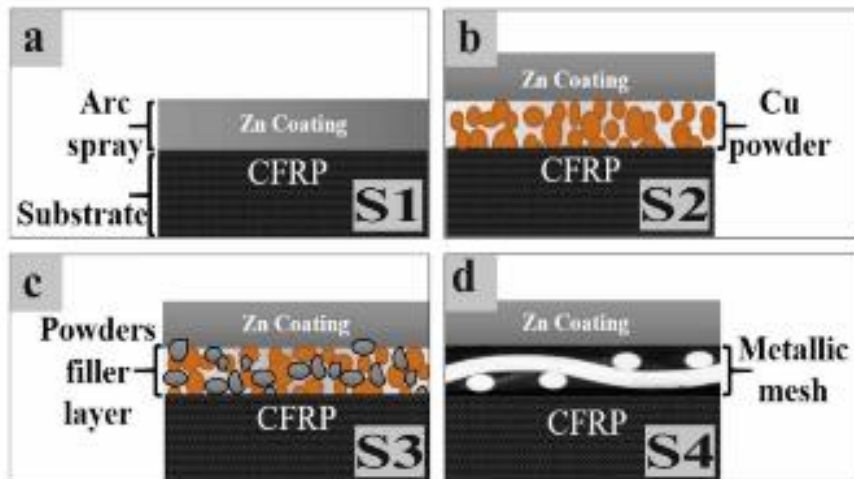
Beberapa penelitian tentang TBC, *skin barrier* dan *thermal spray* pada CFRP sudah dikembangkan sebelumnya. Pada tahun 2015, Piyanch Luangtriratana dan kawan-kawan membuat *skin* pelindung untuk material GFRP. Penelitian ini menggunakan campuran serbuk keramik dan binder *phenolic* yang dilaminasikan pada bagian atas GFRP menggunakan *roller K-Bar* yang setelahnya ditaburkan lagi untuk *finishing*. Variasi yang digunakan adalah variasi jenis serbuk keramik (Luangtriratana et al., 2015).

**Tabel 2.4** Hasil pengujian ketahanan termal GFRP/keramik (Luangtriratana et al., 2015)

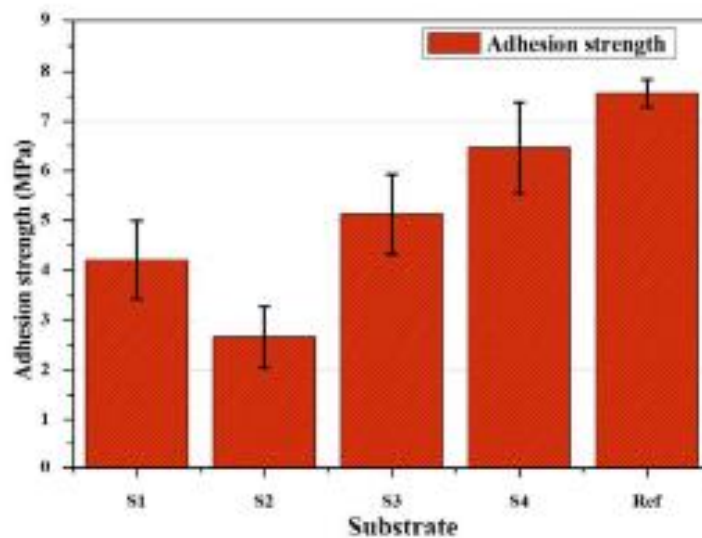
Spesimen	Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur target			
	<i>Heat Flux</i> 35 kW/m <sup>2</sup>			
	180°C		250°C	
	Bagian belakang	$\Delta t$	Bagian belakang	$\Delta t$
Kontrol	40	-	72	-
GFRP	44	+4	73	+1
GFRP/30B	54	+14	86	+14
GFRP/Si	54	+14	82	+10
GFRP/Flek	48	+8	75	+13
GFRP/Re	56	+16	90	+18
GFRP/Zr	57	+17	87	+15

Dari Tabel 2.4 dapat dilihat bahwa penggunaan metode *roller* untuk sistem perlindungan GFRP dapat menunda kenaikan temperatur hingga 18 detik oleh serbuk zirconia (Luangtriratana et al., 2015). Penelitian serupa (metode *roller*) juga dikembangkan oleh Kandola B. dan kawan-kawan pada tahun 2016. Perbedaan antara keduanya terletak pada substrat yang dipakai yaitu CFRP. Pada penelitian tersebut menunjukkan performa *inflammability* yang baik dengan ditunjukkan dapat menunda kenaikan temperatur pada bagian belakang CFRP (B. Kandola et al., 2016).

Pada tahun 2018, A. Rezzoug dan kawan-kawan mencoba meneliti kembali pembuatan sistem perlindungan termal pada CFRP. Penelitian ini menggunakan empat metode yang berbeda-beda. Metode pertama adalah dengan menyemprotkan langsung serbuk Zn pada permukaan CFRP menggunakan *arc spray*, kedua dengan cara menambahkan lapisan serbuk Cu, ketiga dengan menambahkan lapisan serbuk Cu yang dicampur dengan *filler stainless steel*, dan terakhir menggunakan *aluminium mesh* sebagai pelindung (Rezzoug et al., 2018).



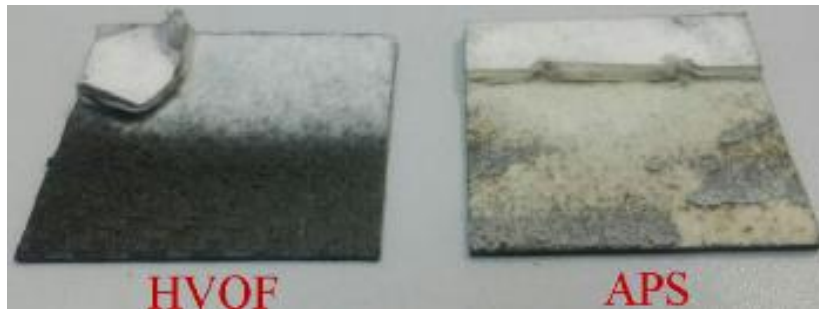
**Gambar 2.15** Penelitian tentang sistem perlindungan termal pada CFRP dengan empat metode berbeda (Rezzoug et al., 2018)



**Gambar 2.16** Hasil pengujian daya lekat pada CFRP dengan empat metode berbeda (Rezzoug et al., 2018)

Metode penambahan lapisan *aluminium mesh* menunjukkan performa daya lekat terbaik dengan nilai 6,5 MPa, diikuti oleh metode ketiga, pertama dan kedua (Rezzoug et al., 2018).

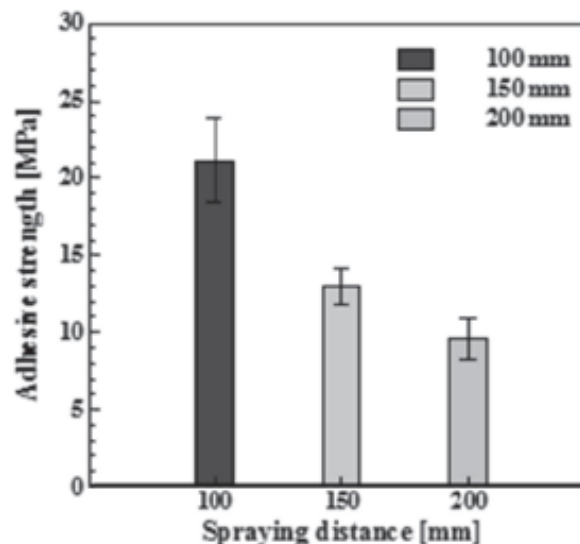
Pada tahun 2019, P. Golewski dan kawan-kawan mencoba meneliti kemampuan CFRP untuk menerima perlakuan *thermal spray* secara langsung. Metode *thermal spray* yang digunakan adalah HVOF dan APS. Hasil yang didapatkan kurang memuaskan karena permukaan CFRP rusak akibat tidak mampu menahan panas yang dihasilkan alat *thermal spray* (Golewski & Sadowski, 2019):



**Gambar 2.17** Penampakan hasil pelapisan langsung CFRP dengan metode HVOF dan APS (Golewski & Sadowski, 2019)

Pengembangan *skin barrier* terus berlanjut pada tahun 2021, Heejin Kim membuat *skin barrier* menggunakan metode *hot press*. Serbuk keramik  $Al_2O_3$  dicampur binder CERAMABIND (3,3:1) selanjutnya dipress pada temperatur 96, 175, 275°C menghasilkan lapisan keramik tipis. Lapisan keramik tipis ini selanjutnya dilaminasi bersamaan dengan CFRP dengan bantuan *vacuum bagging*. Pada pengujian *flame test*, *skin barrier* yang dibuat menunjukkan performa yang memuaskan karena dapat menurunkan temperatur operasi luar 38-50% (Kim et al., 2021).

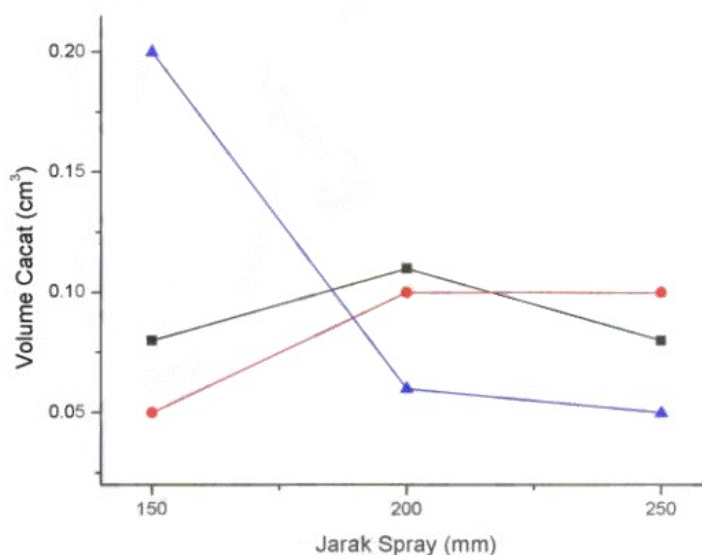
Parameter *thermal spray* seperti jarak *nozzle*, juga diteliti oleh Jae Bin Lee dkk. tahun 2012 pada proses pelapisan SCM415 menggunakan metode *powder flame spray* dengan serbuk Ni-20 mass%Cr. Jarak yang dipakai pada penelitian ini adalah 100, 150 dan 200 mm. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya jarak *nozzle*, daya lekat antara lapisan *coating* dan substrat mengalami penurunan. Hal ini dipengaruhi oleh partikel-partikel yang tidak meleleh dengan sempurna (Lee et al., 2012).



**Gambar 2.18** Hasil pengujian daya lekat dengan variasi jarak (Lee et al., 2012)

Selain terhadap daya lekat, jarak *nozzle* juga memengaruhi kemampuan produk *coating* menahan penetrasi api (hingga 2000°C). Penelitian ini dilakukan oleh Lazuardi pada tahun 2015 dengan serbuk *coating* YSZ dan substrat *Hastelloy*. Variasi yang digunakan adalah jarak *nozzle* 150, 200, 250 mm. Hasil terbaik diperoleh pada jarak 150 mm dengan volume cacat paling rendah karena jarak tersebut memiliki stabilitas termal terbaik dari hasil pengujian TGA (Lazuardi & Widyastuti, 2015).





**Gambar 2.19** Perbandingan jarak *nozzle* dengan volume cacat pengujian penetrasi api (Lazuardi & Widyastuti, 2015)

Selanjutnya, Y. Qin dkk. pada tahun 2018 mencoba meneliti pada proses pelapisan baja karbon menggunakan serbuk Ti. Variasi jarak yang digunakan adalah 40, 60, 80, 100, dan 150 mm. Dengan meningkatnya jarak *nozzle*, maka porositas yang terjadi juga semakin berkurang dan kembali meningkat setelah jarak 100 mm (Qin et al., 2018)

**Tabel 2.5** Daftar penelitian mengenai pelapisan CFRP

Peneliti	Substrat	Metode	Serbuk
P. Luangtriatana (2015)	GFRP	<i>Roller Deposition</i>	<i>Nanoclay</i> , nanosilika, <i>glass flake</i> , aluminium titanate dan zirkonia
Kandola B. (2016)	CFRP	<i>Roller Deposition</i>	<i>Glass flake</i> dan aluminium titanate
A. Rezzoug (2018)	CFRP	Laminasi	Serbuk Cu, <i>Filler SS</i> dan <i>Aluminium Mesh</i>
P. Golewski (2019)	CFRP	Tanpa perlindungan	-
Heejin Kim (2021)	CFRP	<i>Hot Press</i>	Alumina

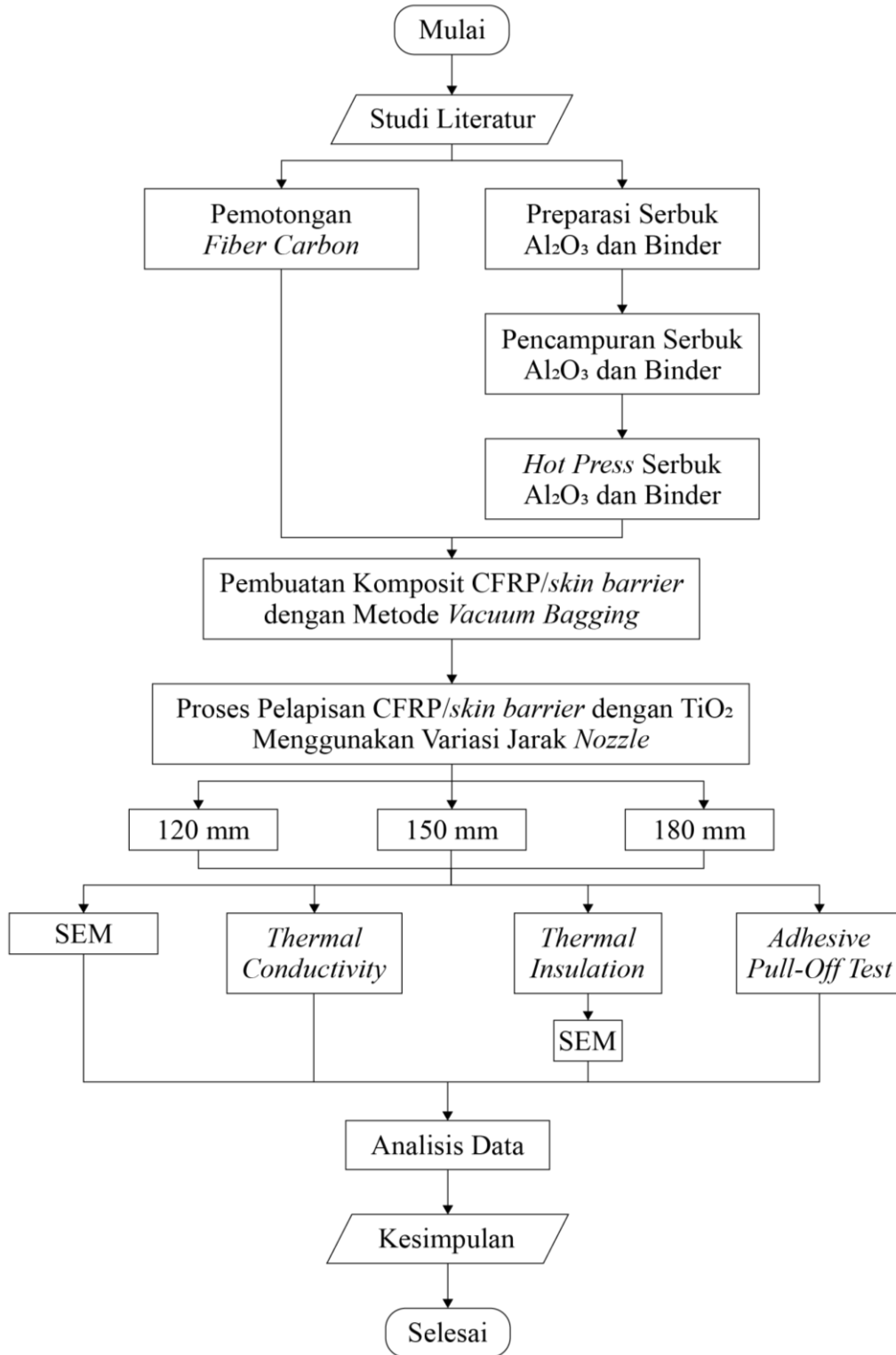
**Tabel 2.6** Daftar penelitian mengenai *thermal spray*

Peneliti	Metode	Serbuk	Jarak (mm)
Chang-Jiu Li (2002)	<i>Liquid Flame Spray</i>	TiO <sub>2</sub> liquid	150
Filofteia-Laura Toma (2006)	APS & HVOF	TiO <sub>2</sub>	150
Jae Bin Lee (2012)	<i>Powder Flame Spray</i>	Ni-20 mass%Cr	100, 150, 200
M. Sofyan Lazuardi (2015)	<i>Powder Flame Spray</i>	YSZ	150, 200, 250
Qin Y. (2018)	APS	Ti	40, 60, 80, 100, 150
A. Rezzoug (2018)	APS	Zn	130

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**BAB III  
METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir**



**Gambar 3.1** Diagram alir

### 3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Gelas Beaker

Gelas beaker digunakan untuk wadah mencampur keramik  $Al_2O_3$  dengan bindernya.



**Gambar 3.2** Gelas beaker

2. Neraca Digital

Neraca digital (REDWAG) digunakan untuk menimbang massa dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Alat ini digunakan untuk menimbang  $Al_2O_3$  dan binder keramik.



**Gambar 3.3** Neraca Digital

3. *Sieve* dan *Siever Shaker*

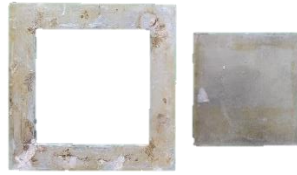
Alat *siever* digunakan untuk mengayak serbuk yang akan digunakan agar memiliki distribusi ukuran yang sama dan sesuai. Alat *siever* yang digunakan



**Gambar 3.4** Mesin *Siever*

4. *Mold* (Cetakan)

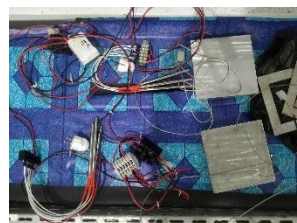
Pada penelitian proses *hot press* menggunakan cetakan berbentuk cincin kotak berlubang sebagai *negative mold* dengan tebal 3 mm dan *positive mold* berbentuk plat tipis 1,5 mm. Cetakan ini terbuat dari bahan aluminium dan *stainless steel* yang baik dalam menghantarkan panas. Cetakan ini dapat menghasilkan spesimen dengan ukuran 110x110 mm dengan tebal yang dihasilkan 1,2-2 mm.



**Gambar 3.5** Cetakan *Hot Press*

#### 5. Mesin *Hot Press*

Mesin *Hot Press* merupakan perpaduan dari press hidrolik dan *heater set* (*heater*, *thermocouple*, PID dan LCD).



**Gambar 3.6** Alat *Hot Press*

#### 6. Alat *Vacuum Bagging*

Alat *vacuum bagging* digunakan untuk membantu proses pembuatan komposit. Alat tersebut membantu menyerap resin berlebih hasil proses laminasi dan permukaan yang dihasilkan lebih rata.



**Gambar 3.7** *Vacuum Bagging*

#### 7. Alat *Thermal Spray*

Alat *flame spray* digunakan untuk melelehkan dan menembakkan serbuk *coating* ke substrat. Dalam proses pelelehannya menggunakan bantuan nyala api dari pembakaran gas asetilen.



Gambar 3.8 Thermal Spray Gun

### 8. Dremel

Alat potong *dremel* digunakan untuk memotong spesimen agar sesuai dengan kebutuhan pengujian.



Gambar 3.9 Dremel

### 3.3 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Serbuk Keramik $Al_2O_3$

Serbuk alumina (MERCK) yang dipakai adalah jenis *aluminium oxide anhidrat* ( $\gamma$ -alumina) dengan ukuran partikel dengan rata-rata  $>0,063$  mm sebesar 72%. Serbuk ini digunakan sebagai bahan dasar pembuatan *skin* keramik.



Gambar 3.10 Serbuk  $Al_2O_3$

#### 2. Binder Keramik

Binder keramik (DILMASIL) yang digunakan berbahan dasar sodium silikat  $Na_2(SiO_2)_x \cdot (H_2O)_x$ . Binder ini digunakan untuk campuran keramik dalam proses *hot pressing*.

Tabel 3.1 Kandungan binder

Kandungan	Persentase Berat
$Na_2O$	15,85-17,50%
$SiO_2$	31,70-42,00%
Ratio	2,00-2,40
$Fe_2O_3$	Max 150 mg/kg
<i>Insoluble matter</i>	Max 0,030%
$H_2O$	<i>Balance</i>



**Gambar 3.11** Binder keramik

### 3. Serbuk Keramik Titanium Dioksida

Serbuk keramik titanium dioksida (METACERAM 25040) digunakan untuk melapisi permukaan teratas TBC yang dibuat.

**Tabel 3.2** Kandungan serbuk *coating*

Kandungan	Persentase Berat (%)
TiO <sub>2</sub>	Balance
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,1
SiO <sub>2</sub>	<0,1
All others	<0,5
X-factor	1,7



**Gambar 3.12** Serbuk Titanium Dioksida

### 4. Carbon Fiber

Carbon fiber yang digunakan adalah HDC524-3K (PT. JUSTUS KIMIARAYA). Carbon fiber digunakan sebagai penguat dalam pembuatan komposit CFRP.



**Gambar 3.13** Carbon fiber

### 5. Epoxy LP1Q

Resin yang digunakan adalah resin berjenis epoxy dengan kode LP1Q (PT. JUSTUS KIMIARAYA). Resin ini berperan sebagai *matriks* pada proses komposit.



**Gambar 3.14** Resin epoxy LP1Q

6. *Hardener*

*Hardener* yang digunakan adalah campuran dari MEPOXY dan *Cobalt N 6%* (PT. JUSTUS KIMIARAYA). Kedua bahan dicampurkan dalam resin LP1Q dengan perbandingan resin dan hardener 100:1.



**Gambar 3.15** *Hardener*

7. *Mold Release Wax*

*Mold Release Wax* (MIRACLE GLOSS) digunakan untuk membantu proses pelepasan spesimen dari *plate*.



**Gambar 3.16** *Mold Release Wax*

8. *Sealant Tape*

*Sealant tape* yang digunakan berjenis ST204 kuning (PT. JUSTUS KIMIARAYA). *Sealant tape* digunakan sebagai perekat *vacuum bagging film* ke *plate*.



**Gambar 3.17** *Sealant Tape*

9. *Vacuum Bagging Film*

*Vacuum bagging film* yang digunakan adalah BF150A-6000 (PT. JUSTUS KIMIARAYA). *Vacuum bagging film* digunakan pada bagian paling atas agar spesimen bisa divacuum.





**Gambar 3.18** *Vacuum Bagging Film*

10. *Breather*

*Breather* yang digunakan adalah *breather fabrics* PB150 (PT. JUSTUS KIMIARAYA). *Breather* digunakan sebagai lapisan penyerap resin berlebih.



**Gambar 3.19** *Breather*

11. *Peel Ply*

*Peel ply* yang digunakan adalah PAS85RS-1000 (PT. JUSTUS KIMIARAYA). *Peel ply* digunakan sebagai lapisan pemisah dari laminasi CFRP ke *breather* agar mudah dipisahkan.



**Gambar 3.20** *Peel Ply*

12. *Polymide Tape*

*Polymide tape* digunakan untuk membantu pelepasan produk *hotpress* dari mold. *Polymide tape* yang digunakan memiliki ukuran 50 mm dan tahan hingga temperatur 250-300°C.



**Gambar 3.21** *Polyamide Tape*

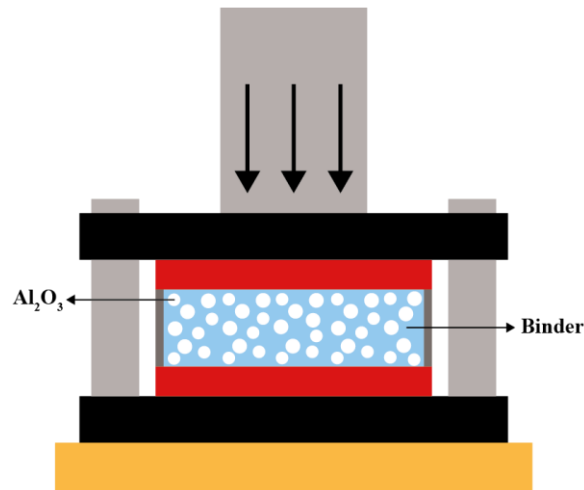
### 3.4 Metode Penelitian

#### 3.4.1 Pembuatan *Skin Barrier* dengan Metode *Hot Press*

Pembuatan *skin barrier*  $Al_2O_3$  diawali dengan mencampurkan serbuk  $Al_2O_3$  dan bindernya dengan menggunakan alat pengaduk. Selanjutnya campuran tersebut dimasukkan pada *mold* ukuran 110x110x3 mm. Terakhir, dilakukan proses *hot press* dengan parameter sebagai berikut.

**Tabel 3.3** Parameter metode *hot press*

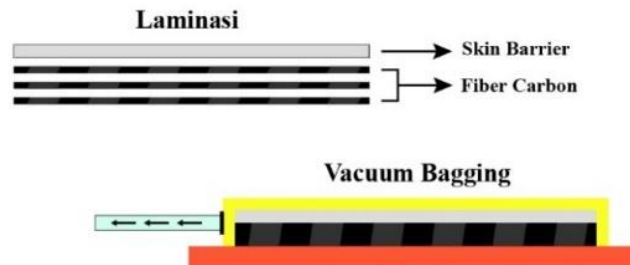
Material	Fraksi	Temperatur (°C)	Tekanan (MPa)	Tebal (mm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Binder Na <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>x</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>x</sub>	1:2,75	130	4	1,5



**Gambar 3.22** Skema *hot press*

### 3.4.2 Pembuatan Komposit CFRP/*Skin Barrier*

Pembuatan komposit diawali dengan pemotongan *carbon fiber* sebanyak tiga lapis. Selanjutnya dilakukan proses laminasi *fiber carbon* dan resin *epoxy* LP1Q. Pada bagian atas laminasi diletakkan *skin barrier* yang sudah dibuat sebelumnya. Setelah semua sudah dilaminasi, CFRP yang belum kering tersebut selanjutnya dilakukan proses *vacuum bagging*.



**Gambar 3.23** Skema *vacuum bagging*

### 3.4.3 Pemotongan Spesimen

Spesimen CFRP/*skin barrier* selanjutnya dipotong sesuai ukuran dari masing-masing pengujian yang akan dilakukan. Ukuran dari masing-masing spesimen disajikan pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Ukuran spesimen

	SEM	<i>Thermal Insulation</i>	TCM	Daya Lekat
Panjang (mm)	5	10	100	100
Lebar (mm)	5	10	50	50

### 3.4.4 Pelapisan Komposit dengan Metode *Thermal Spray*

Jenis alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *powder flame spray*. *Powder flame spray* merupakan alat *thermal spray* yang memakai bahan berupa *powder* dan memiliki temperatur jet sekitar 1200°C. Berikut parameter yang digunakan pada alat *powder flame spray*.

**Tabel 3.5** Parameter *powder flame spray*

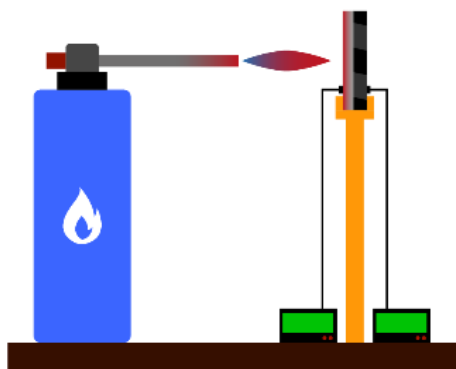
Preparasi Permukaan	Parameter Pelapisan					
	Sapuan (lapis)	<i>Feed Rate</i> (g/min)	Tekanan (bar)	Temp. Alat (°C)	Temp. Substrat (°C)	Jarak <i>nozzle</i> (mm)
Amplas Grade 80	3	20	2	1000-1200°C	80-120°C	120, 150, 180



**Gambar 3.24** Proses *thermal spray*

### 3.4.5 Validasi Insulasi Termal

Pengujian ini memiliki tujuan untuk memvalidasi data teoretis dengan data eksperimen. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat *torch* yang ditembakkan ke permukaan spesimen. Di depan dan belakang spesimen diberikan *thermocouple* untuk mengukur temperatur depan dan belakang. Pertama *burner* dinyalakan hingga mencapai temperatur target. Selanjutnya spesimen dikunci pada *holder* lalu spesimen diuji pada jarak 45 mm selama 30 detik. (Kim et al., 2021)



**Gambar 3.25** Pengujian validasi insulasi termal

## 3.5 Pengujian

### 3.5.1 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

*Scanning Electron Microscopy* atau SEM memiliki konsepi yang sama seperti mikroskop optik, namun sumber cahaya dari SEM berasal dari elektron dengan lensa yang menggunakan

medan magnet. SEM dapat menghasilkan gambar dengan perbesaran yang tinggi juga dengan *depth of field* yang tinggi sehingga area fokus yang lebih luas dan resolusi yang lebih baik. SEM dapat menganalisis topografi, morfologi, komposisi, dan kristalografi material. (Widyastuti et al., 2019). Mesin SEM yang digunakan pada penelitian ini adalah merk HITACHI SU3500.



**Gambar 3.26** Mesin SEM (Anshida Mayeen, 2018)

Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian SEM sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji termasuk melakukan pemotongan untuk melihat daerah melintang dengan ukuran 10x10 mm.
2. Membersihkan permukaan spesimen agar tidak ada pengotor.
3. Meletakkan spesimen pada *holder* dan diberikan perekat *carbon tape*.
4. Memasukkan spesimen ke dalam mesin SEM.
5. Melakukan perbesaran optik 70-500x, dengan tegangan 2 kV
6. Mengamati hasil yang terlihat pada komputer.

### 3.5.2 *Thermal Conductivity Meter (TCM)*

*Thermal Conductivity Meter* digunakan untuk mengukur konduktivitas termal suatu material. Mesin yang dipakai berjenis QTM-500 dengan prinsip *hot wire method/probe method*. Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian TCM sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji termasuk melakukan pemotongan dengan ukuran 110x50 mm.
2. Menaruh spesimen yang sudah dipreparasi pada *probe*.
3. Memanaskan spesimen hingga 10°C selama 1 menit.
4. Menghitung konduktivitas rata-rata konduktivitas termal dari 10 titik pengujian.



**Gambar 3.27** Alat *thermal conductivity meter*

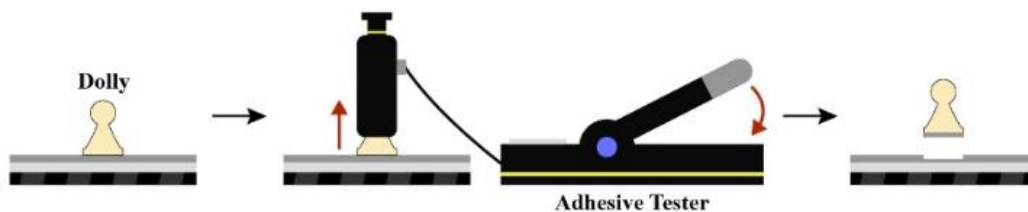
### 3.5.3 Adhesive Pull-Off Test

Pengujian menggunakan alat *Portable Adhesive Tester Tipe II* dengan standar uji ASTM D4541. Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian *adhesive pull-off test* sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen dan peralatan uji termasuk melakukan pemotongan dengan ukuran 110x30 mm
2. Melekatkan *dolly* ke permukaan spesimen menggunakan lem *araldite*. Tunggu hingga kering.
3. Memasukkan alat tarik ke *dolly*.
4. Mengkalibrasi alat hingga menunjukkan angka nol. Kemudian menentukan satuan yang digunakan. Dalam percobaan ini menggunakan MPa.
5. Menekan tuas hingga *dolly* terlepas.
6. Mencatat hasil *adhesion strength* yang muncul.



Gambar 3.28 Alat *adhesive tester*



Gambar 3.29 Skema pengujian *adhesive pull-off test*

### 3.6 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian dan jadwal penelitian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.6 dan tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3.6 Rancangan penelitian

Serbuk <i>Coating</i>	Jarak <i>Nozzle</i> (mm)	Pengujian				
		SEM		Insulasi Termal	TCM	<i>Adhesive Pull-Off Test</i>
		Sebelum Pemanasan	Sesudah Pemanasan			
TiO <sub>2</sub>	120	✓	✓	✓	✓	✓
	150	✓	✓	✓	✓	✓
	180	✓	✓	✓	✓	✓

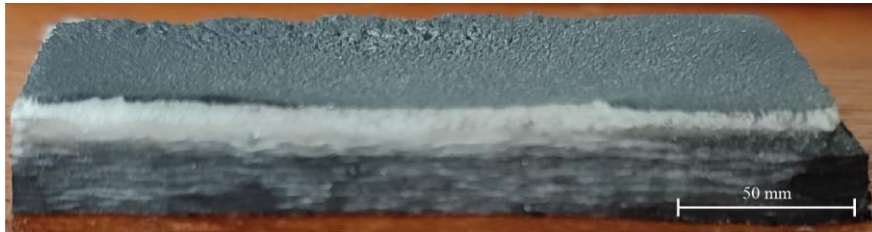
**Tabel 3.7** Jadwal penelitian

No.	Kegiatan	Feb		Maret				April				Mei				Juni			
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur																		
2	Penyusunan proposal																		
3	Asistensi																		
4	Persiapan alat dan bahan																		
5	Pembuatan <i>skin barrier</i>																		
6	Pembuatan komposit CFRP/ <i>skin barrier</i>																		
7	Pelaksanaan <i>coating</i>																		
8	Pengujian SEM																		
9	Pengujian <i>Pull-Off Test</i>																		
10	Pengujian TCM																		
11	Penyusunan laporan akhir																		

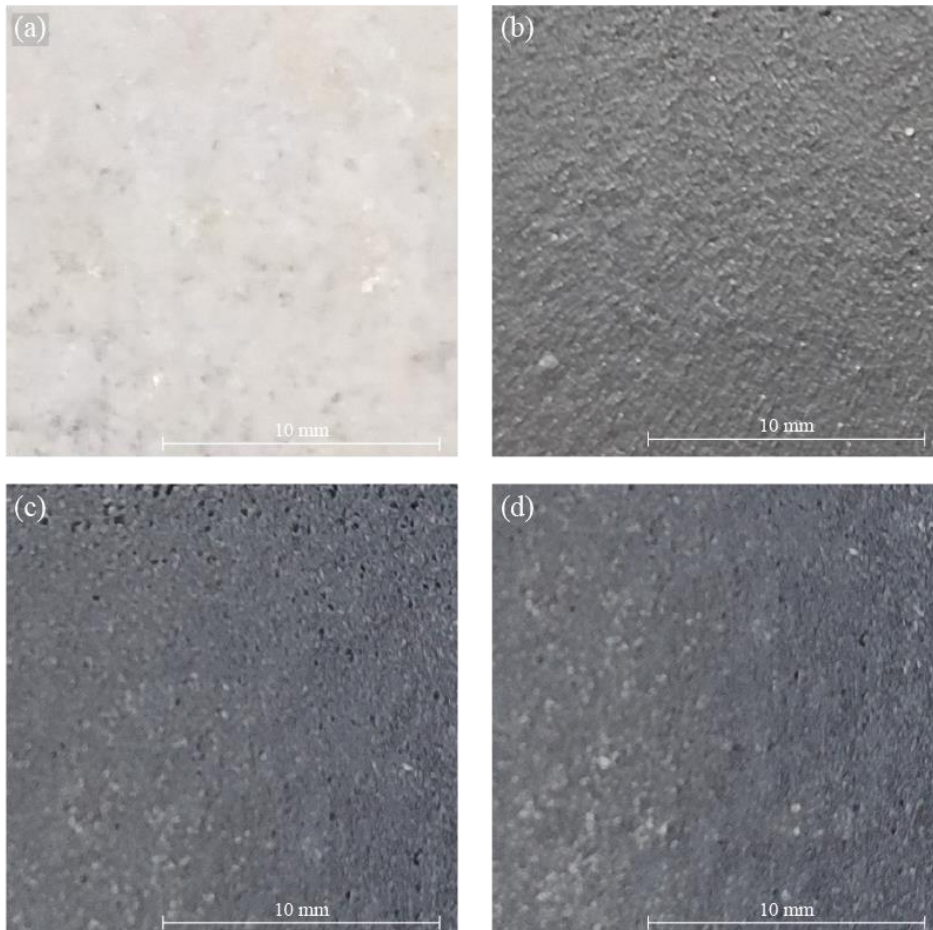
## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pembuatan TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada Komposit CFRP

Berikut adalah visual penampang melintang dari komposit TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ditampilkan pada Gambar 4.1. Susunan lapisan dari TBC tersebut dimulai dari bawah adalah komposit CFRP, *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan *coating* TiO<sub>2</sub>.



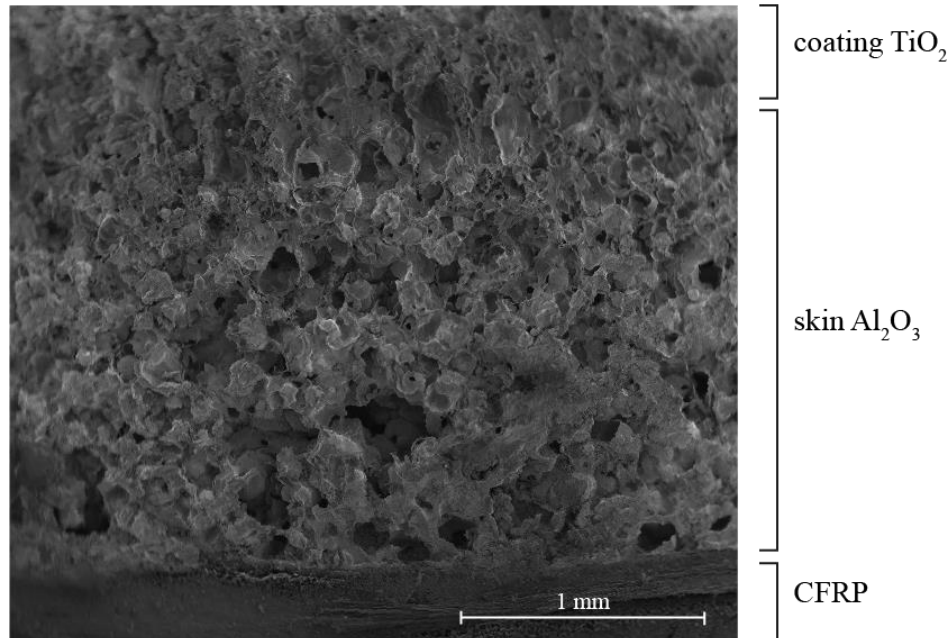
**Gambar 4.1** Visual komposit TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Gambar 4.2** (a) Visual permukaan *skin* Al<sub>2</sub>O yang belum *dicoating*, Visual permukaan hasil *coating* TiO<sub>2</sub> dengan jarak *nozzle* (b) 120 (c) 150 (d) 180 mm

Sedangkan jika dilihat dari visual permukaannya secara makro, pelapisan TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memiliki hasil *coating* lebih merata daripada jarak *nozzle* 150 dan 180 mm. Pada TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm terdapat beberapa lubang kecil dan bagian yang tidak terlapsi merata (bintik putih). Visual tersebut ditampilkan pada Gambar 4.2.

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan dan penampang melintang TBC secara mikro dengan perbesaran tertentu. Berikut adalah morfologi penampang melintang dari TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm ditampilkan pada Gambar 4.3.

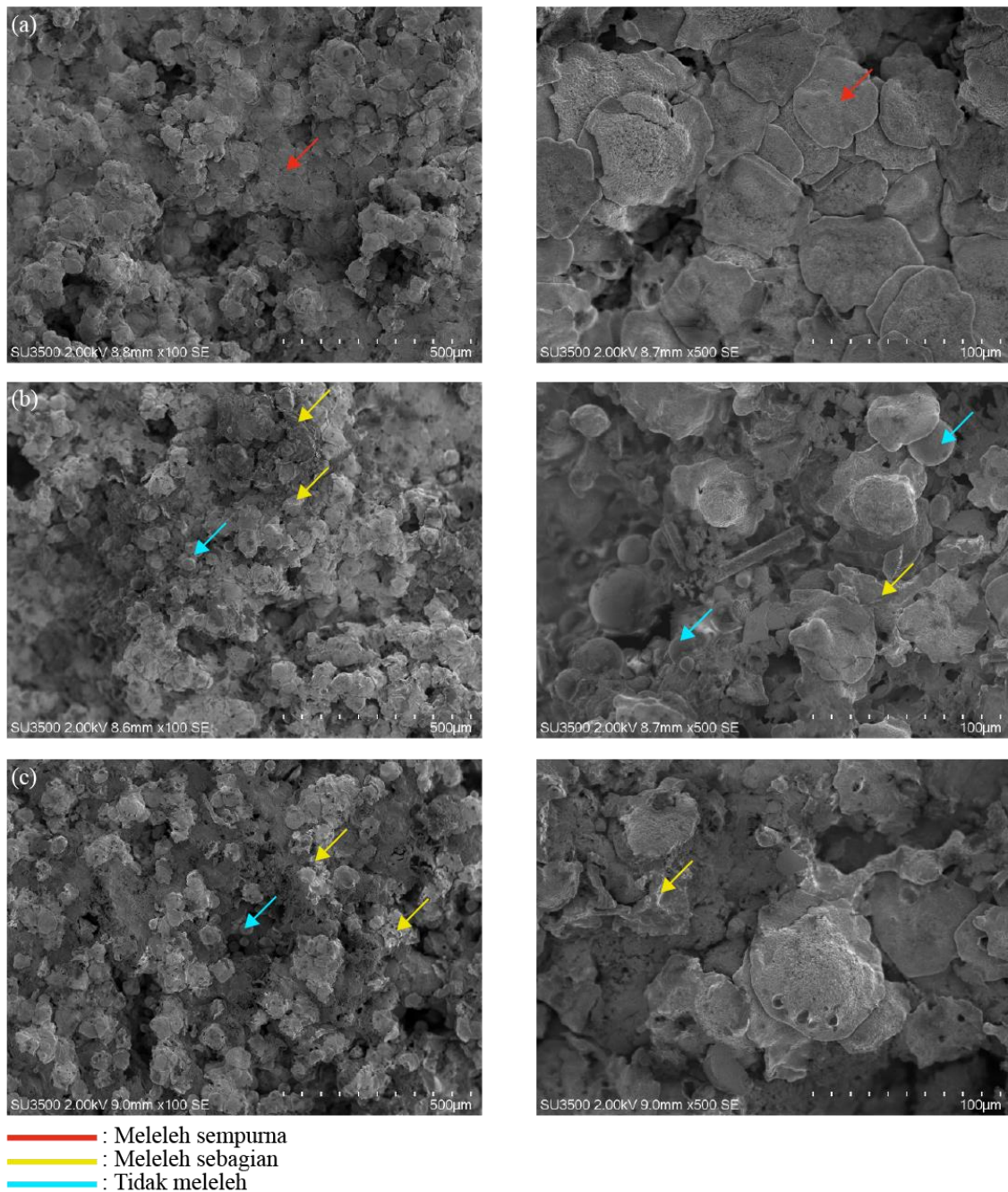


**Gambar 4.3** Morfologi penampang melintang komposit TBC setelah *thermal spray* dengan perbesaran 25x

Pada Gambar 4.3, CFRP pada lapisan paling bawah memiliki bentuk yang *bulk*. Sedangkan pada lapisan *skin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* terlihat memiliki pori. Begitupula pada lapisan *coating TiO<sub>2</sub>* juga memiliki pori yang lebih kecil lagi. Menurut penelitian Vincent pada tahun 2012, material berpori memiliki konduktivitas termal lebih rendah daripada material yang tidak berpori (Vincent et al., 2012). Sehingga pori yang terbentuk tersebut dapat meningkatkan kinerja TBC dalam menurunkan temperatur lingkungan.

Dilakukan juga pengujian SEM pada permukaan tiap spesimen lalu dilakukan identifikasi kondisi partikel setelah *thermal spray*. Didapatkan tiga kondisi umum dari partikel yang terdeposit pada permukaan *skin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Kondisi pertama adalah partikel meleleh sempurna yang memiliki bentuk seperti kepingan. Kondisi kedua adalah partikel meleleh sebagian yang memiliki bentuk seperti kepingan yang pecah atau kepingan dengan beberapa bagian masih berbentuk lingkaran. Sedangkan yang terakhir adalah partikel yang tidak meleleh sehingga masih dalam wujud partikel berbentuk bulat. Berikut adalah morfologi permukaan dari masing-masing spesimen yang sudah diberikan label berdasarkan kondisi partikel disajikan pada Gambar 4.4.

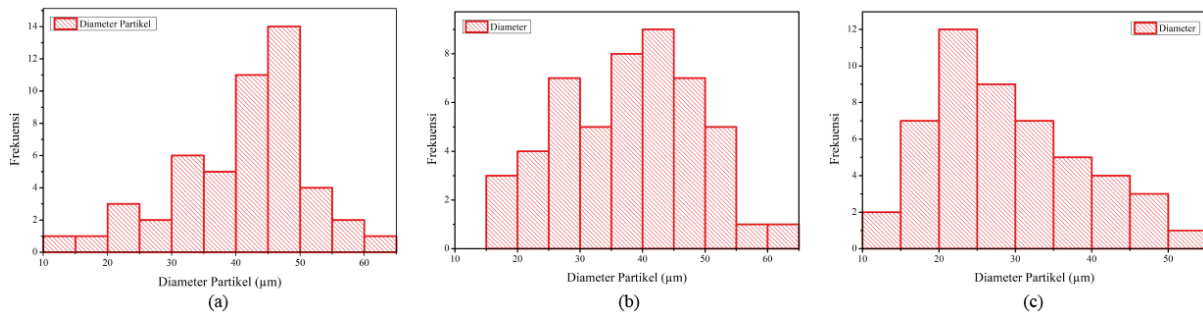




**Gambar 4.4** Morfologi permukaan TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm dengan perbesaran 100x (kiri) dan 500x (kanan)

Pada Gambar 4.4, hasil *coating* pada jarak *nozzle* 120 mm memiliki morfologi permukaan dengan partikel yang meleleh sempurna hampir di seluruh permukaan hasil *coating*. Seiring dengan naiknya jarak *nozzle*, partikel yang terdeposit semakin beragam. Pada jarak *nozzle* 150 mm ditemukan partikel yang meleleh sebagian dan tidak meleleh, begitu pula pada jarak *nozzle* 180 mm. Hal ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Lee dkk. Pada tahun 2012. Dimana semakin jauh jarak *nozzle* dapat menyebabkan partikel yang semula keluar dari ujung *nozzle* dalam kondisi lelehan memiliki kesempatan mengalami pendinginan lebih dahulu di udara. Sehingga saat mengenai substrat, partikel sudah dalam kondisi meleleh sebagian dan bahkan tidak meleleh (Lee et al., 2012).

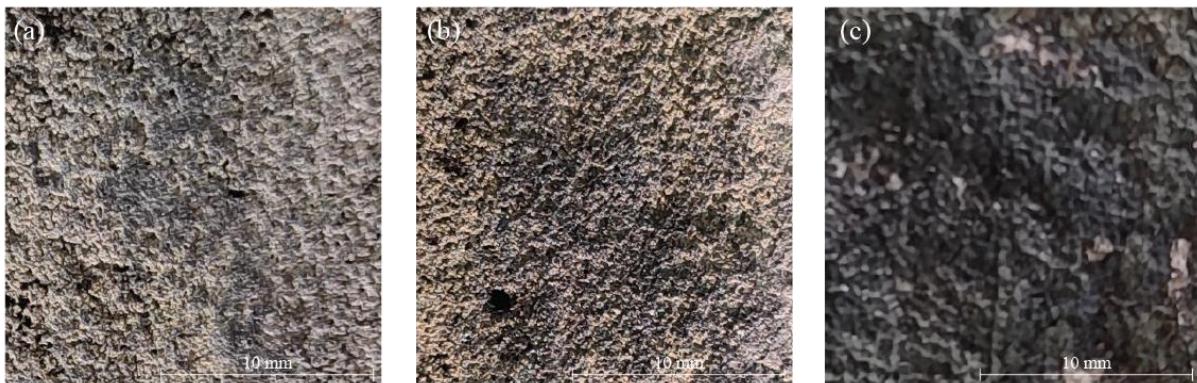
Dari hasil pengujian morfologi permukaan, juga dapat dihitung persebaran diameter partikel yang terdeposit pada permukaan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Berikut grafik persebaran diameter partikel yang ditampilkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Grafik persebaran diameter partikel yang terdeposit pada TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm

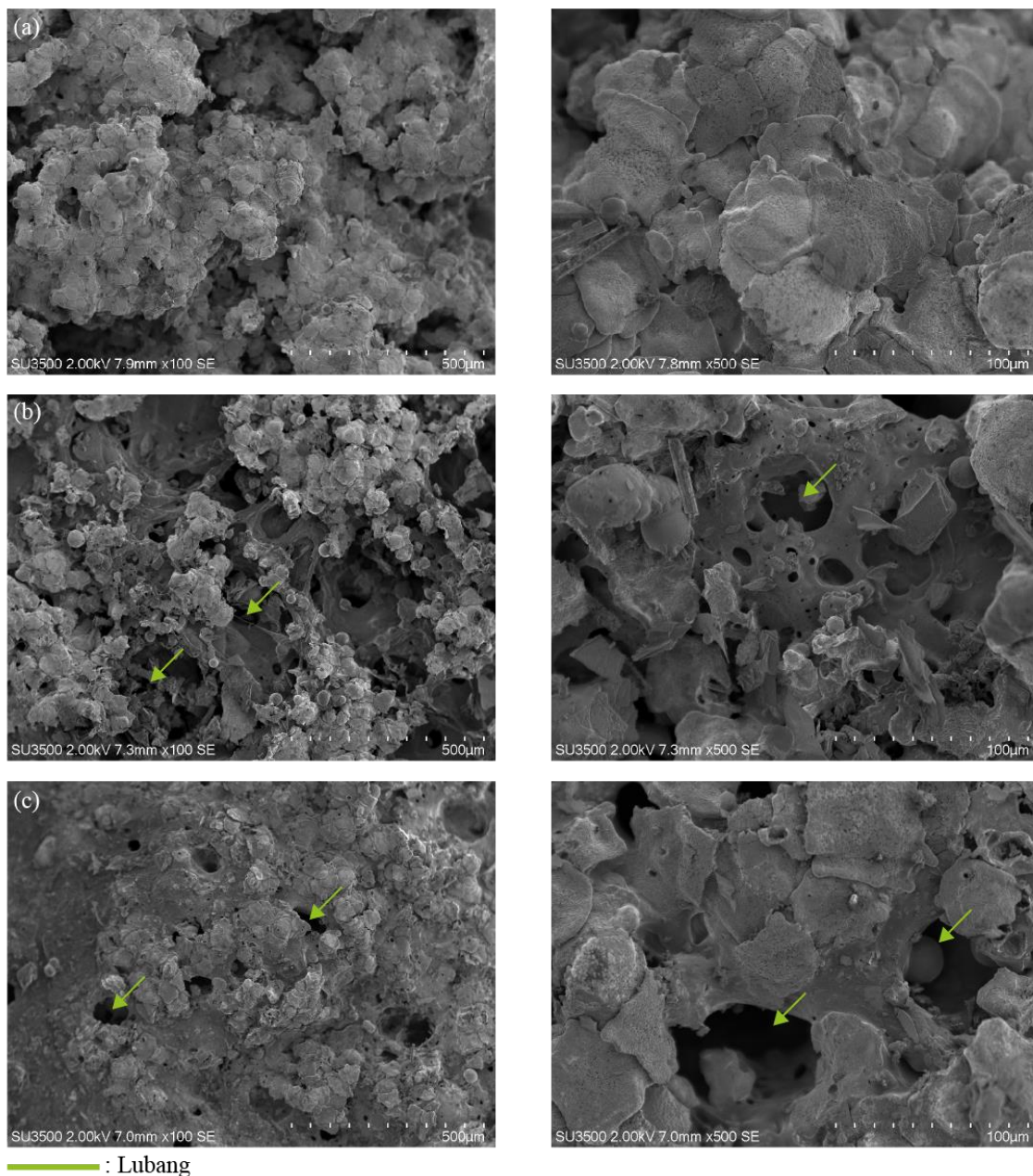
Pada variasi jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm memiliki persebaran diameter partikel pada rentang 10 hingga 60  $\mu\text{m}$  dengan rata-rata 41,23, 37,63 dan 29  $\mu\text{m}$ . Semakin dekat jarak *nozzle*, diameter partikel yang terdeposit memiliki ukuran yang semakin besar pula. Hal ini disebabkan karena semakin dekat jarak *nozzle* dengan substrat, maka partikel keramik TiO<sub>2</sub> masih dalam kondisi meleleh sempurna ketika mengenai substrat. Sehingga partikel yang terbentuk memiliki bentuk kepingan. Sedangkan jika partikel sudah tidak dalam kondisi meleleh sempurna ketika mengenai substrat, maka partikel yang terbentuk adalah bulatan yang mempunyai diameter hampir sama dengan diameter serbuk yang digunakan (J.R. Davis, 2004).

Pada penelitian ini diamati juga mengenai ketahanan TBC dalam menerima beban termal *torch*. Berikut pada Gambar 4.6 merupakan visual dari permukaan TBC setelah menerima beban termal *torch*.



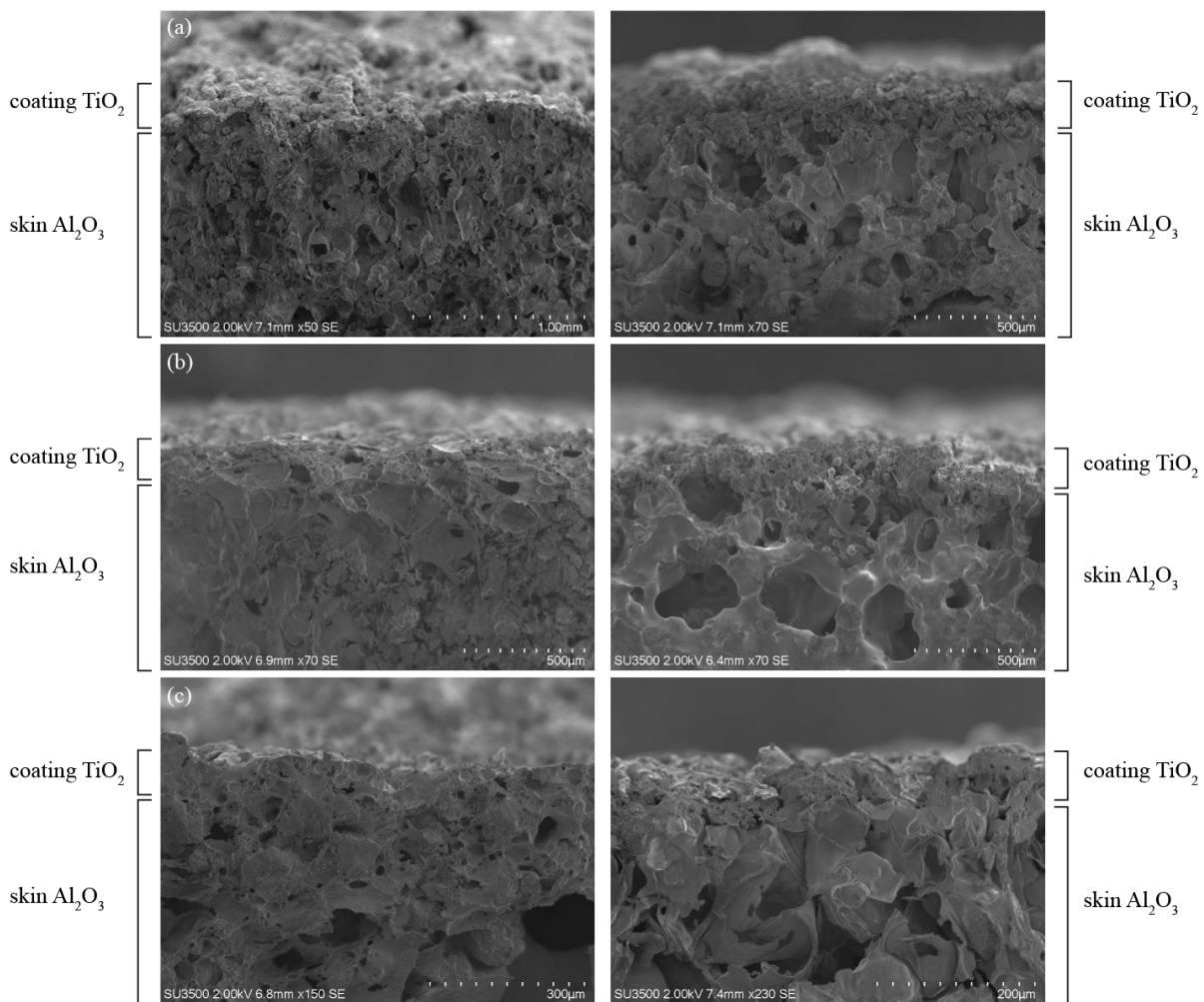
**Gambar 4.6** Visual permukaan TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm setelah menerima beban termal *torch*

Pada Gambar 4.6, terlihat TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm tidak mengalami perubahan struktur, hanya mengalami perubahan warna menjadi lebih hitam. Sedangkan TBC dengan jarak *nozzle* 150 mm mempunyai beberapa lubang di permukaannya. Lalu untuk TBC dengan jarak *nozzle* 180 mm mengalami delaminasi pada permukaan *caottingnya*. Hal ini serupa dengan hasil pengujian morfologi dimana diperlihatkan pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7** Morfologi permukaan TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm setelah pengujian insulasi termal dengan perbesaran 100x (kiri) dan 500x (kanan)

Seperti pada pengamatan secara makro, TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm tidak mengalami perubahan struktur (tidak didapati cacat) sedangkan pada jarak *nozzle* 150 dan 180 mm ditemukan cacat berupa lubang yang disebabkan karena pecahnya pori dari *skin*  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cacat tersebut disebut *cratering* (Goldschmidt & Streitberger, 2007). Lubang tersebut ditemukan juga di sepanjang penampang melintang dari TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.8 di bawah ini.

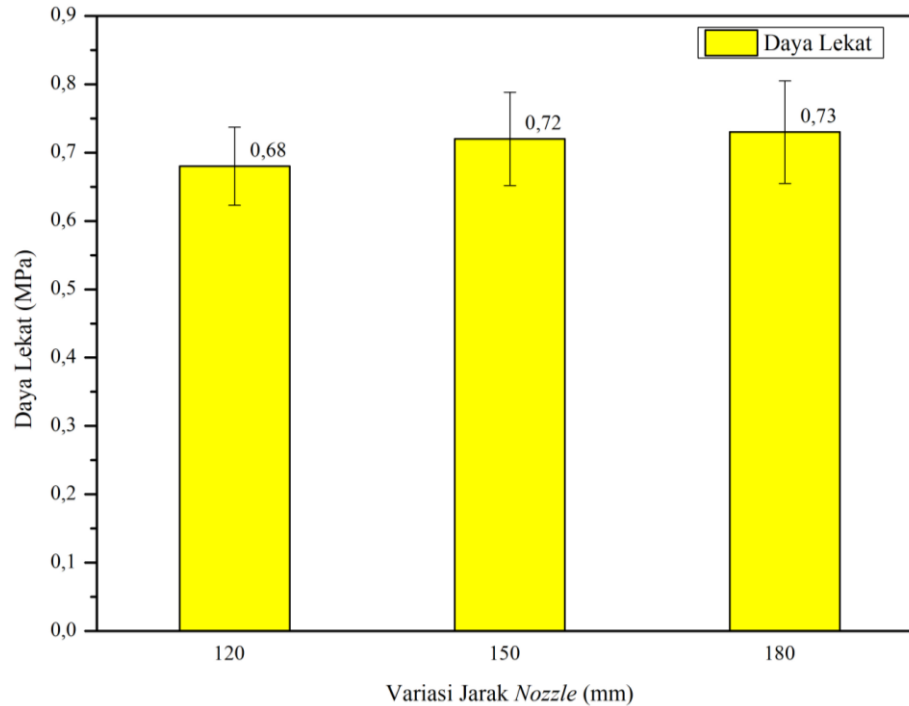


**Gambar 4.8** Morfologi penampang melintang TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) pengujian insulasi termal

Terlihat pada Gambar 4.8, TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm mengalami perubahan struktur dengan munculnya lubang karena *cratering*. Luas cacat yang terjadi dari TBC 150 dan 180 mm sebesar 11 dan 9%. Hal ini tidak terjadi pada TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm karena permukaannya memiliki permukaan yang tertutup rata oleh lapisan TiO<sub>2</sub>. Sedangkan pada TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm, lapisan *coating* tidak menutup rata permukaan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Bagian tersebut mengalami perambatan panas secara langsung kearah *skin* dan memicu *cratering* akibat ketahanan termal *skin* yang rendah.

#### 4.2 Pengaruh Jarak *Nozzle* terhadap Daya Lekat

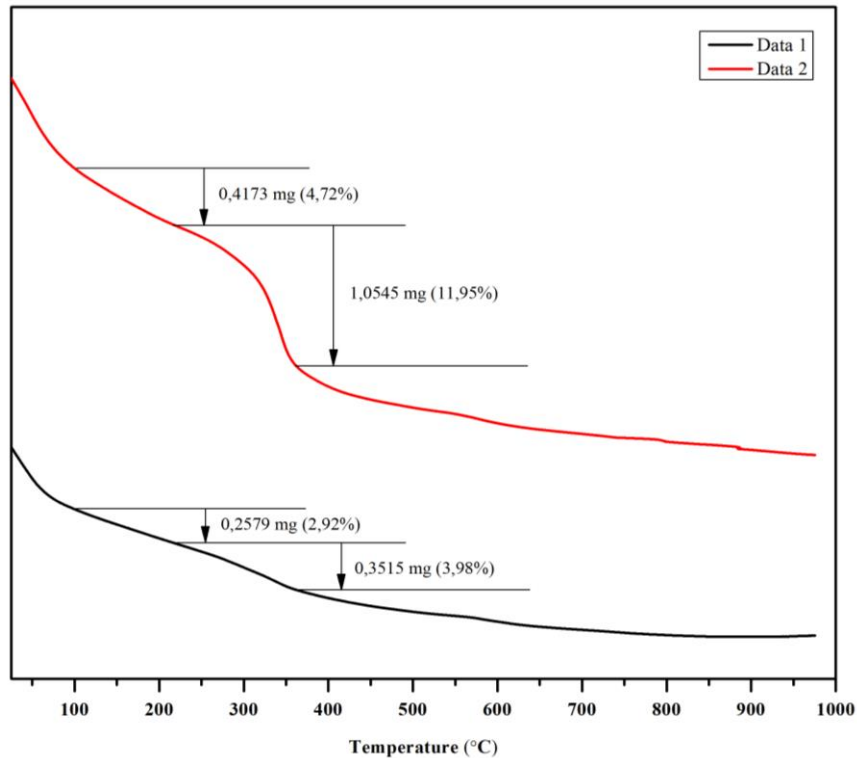
Pengujian *pull-off test* dilakukan untuk mendapatkan nilai daya lekat TBC terhadap substrat CFRP. Berikut data hasil pengujian *pull-off test* dapat dilihat pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Diagram nilai daya lekat TBC

Pada Gambar 4.9, TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm mempunyai daya lekat rata-rata sebesar 0,68, 0,72, 0,73 MPa. Sehingga dapat dianalisis pada penelitian ini jika semakin jauh jarak *nozzle* dapat meningkatkan daya lekat *coating* yang dimiliki. Namun hal ini berbeda dengan hasil yang didapatkan oleh Qin dkk. Pada tahun 2018. Pada penelitian mereka dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak *nozzle* dapat menurunkan daya lekat hasil *coating* yang dihasilkan karena kondisi partikel yang menempel semakin heterogen (Qin et al., 2018). Kondisi partikel yang heterogen tersebut juga didapati pada penelitian ini seiring bertambahnya jarak. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4. dimana pada TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm terdapat partikel meleleh sempurna, meleleh sebagian dan tidak meleleh (heterogen) yang semestinya memiliki daya lekat lebih rendah daripada TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm.

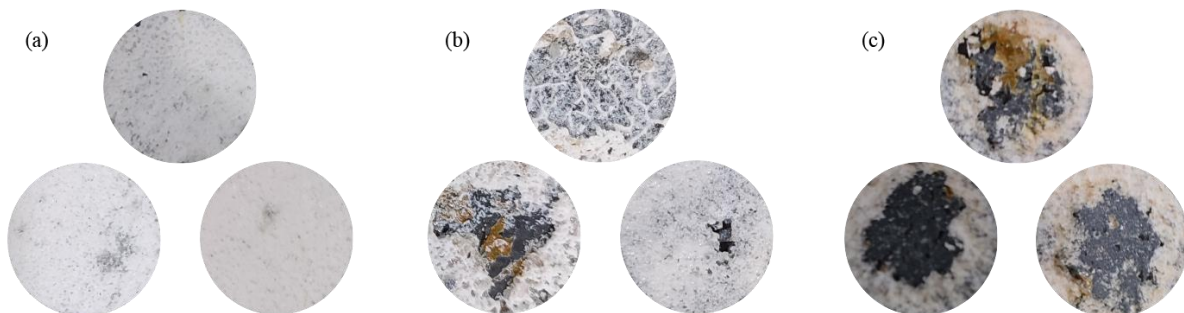
Perbedaan teori yang didapatkan tersebut disebabkan karena ketidakmampuan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam menerima paparan panas yang dihasilkan alat *thermal spray*. Temperatur substrat saat pelapisan pada TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm adalah 120, 100, 80°C. Sedangkan jika dilihat pada hasil pengujian *thermal gravimetric analysis* (TGA) yang ditampilkan pada Gambar 4.10, penurunan massa dimulai dari temperatur 0-380°C. Pada temperatur 0-100°C, *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mengalami penurunan massa dari sisa kandungan air yang masih tersisa setelah proses *hotpress*. Selanjutnya *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mengalami penurunan masa binder Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> pada temperatur 100-420°C (Saadatkah et al., 2020). Dengan kata lain ketika temperatur substrat saat pelapisan mencapai temperatur diatas 100°C maka *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sudah mulai mengalami deformasi yang diawali pada permukaan *skin*. Sehingga ini dapat menyebabkan penurunan ikatan antar keramik *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan *coating* TiO<sub>2</sub> karena *skin* sudah rapuh.



**Gambar 4.10** Grafik *thermal gravimetric analysis* skin  $Al_2O_3$

Selain itu juga coba dihitung tingkat pengaruh variasi jarak *nozzle* terhadap daya lekat TBC  $TiO_2$ -*skin*  $Al_2O_3$  menggunakan metode One Way ANOVA. Hal ini dilakukan karena selisih antara masing-masing variasi hanya berkisar 0,1-0,4 MPa. Setelah dilakukan perhitungan One Way ANOVA didapatkan bahwa data daya lekat mengalami persebaran yang normal namun tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Dengan kata lain, jarak *nozzle* tidak terlalu berpengaruh terhadap daya lekat *coating* TBC yang dihasilkan.

Jenis patahan setelah pengujian *pull-off test* juga coba dianalisis pada penelitian ini. Hal yang coba diamati adalah permukaan TBC yang ditampilkan pada Gambar 4.11 di bawah ini.



Keterangan:

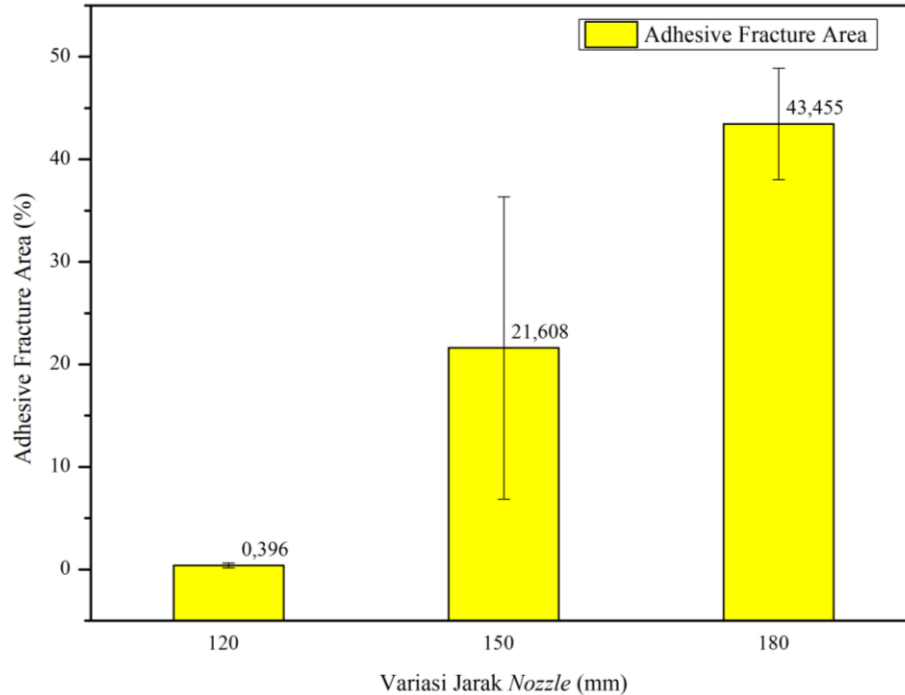
Putih: Visual ketika lapisan  $TiO_2$  lepas

Hitam: Visual ketika lapisan  $TiO_2$  dan *skin*  $Al_2O_3$  lepas

**Gambar 4.11** Visualisasi setelah pengujian *pull-off test* pada TBC dengan jarak *nozzle* (a) 120 (b) 150 (c) 180 mm

Pada Gambar 4.11 dapat dilihat dua jenis patahan yang ditandai dengan dua warna. Warna putih menunjukkan visual ketika hanya lapisan *coating*  $TiO_2$  yang terlepas dari TBC.

Sedangkan warna hitam menunjukkan visual ketika lapisan *coating* TiO<sub>2</sub> dan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang terlepas dari TBC. Patahan berwarna putih tersebut diakibatkan karena ikatan antar TiO<sub>2</sub> dengan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buruk sehingga disebut *cohesive fracture*. Sedangkan patahan berwarna hitam tersebut diakibatkan karena ikatan antara CFRP dengan keramik buruk, namun ikatan antar *coating* TiO<sub>2</sub> dan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kuat sehingga disebut *adhesive fracture*. Hal ini serupa dengan penelitian yang dilakukan Zotti dkk pada tahun 2016 (Zotti et al., 2016).



**Gambar 4.12** Diagram luas daerah *adhesive fracture*

Pada Gambar 4.12, TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm memiliki luas daerah *adhesive fracture* sebesar 0,389, 21,608, dan 43,355%. Dari data tersebut terlihat kecenderungan ketika jarak *nozzle* meningkat, maka luas daerah *adhesive fracture*nya juga meningkat. Semakin luas daerah *adhesive fracture* akan diikuti dengan semakin meningkatnya nilai daya lekat. Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan pada penelitian ini, dimana hal tersebut didapatkan pada TBC dengan jarak *nozzle* 180 mm.

### 4.3 Pengaruh Jarak *Nozzle* terhadap Kemampuan Insulasi Termal

Pengujian *thermal conductivity meter* (TCM) dilakukan untuk mengetahui besar konstanta konduktivitas termal dari TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CFRP. Hasil yang didapatkan merupakan rata-rata dari pengambilan data di sepuluh titik pada permukaan spesimen.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian *thermal conductivity meter*

Jarak <i>nozzle</i> (mm)	Tebal (mm)			Total	Konduktivitas Termal (W/m.K)
	<i>Coating</i> TiO <sub>2</sub>	<i>Skin</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CFRP		
120	0,35	2,04	0,8	3,19	0,3005
150	0,31	1,94	0,8	3,05	0,3070
180	0,39	2,07	0,8	3,26	0,3035

Pada proses rekayasa permukaan dengan metode TBC, coba dicari komposisi material yang mempunyai nilai konduktivitas yang paling rendah. Dengan arti lain, komposisi tersebut dapat menurunkan temperatur dari lingkungan lebih baik. Jika dilihat pada Tabel 4.1, TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memiliki konduktivitas termal terendah sebesar 0,3005 W/m.K, disusul oleh TBC dengan jarak *nozzle* 180 dan 150 mm sebesar 0,3035 dan 0,3070 W/m.K. Jika diurutkan berdasarkan kinerja dalam menurunkan temperatur lingkungan, TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memiliki kinerja terbaik. Hal ini dapat dihubungkan dengan kondisi dari masing-masing permukaan *coating* yang dihasilkan. Seperti pada Gambar 4.2 terlihat TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memiliki permukaan *coating* yang lebih merata dibandingkan TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm yang memiliki permukaan yang tidak merata yang menyebabkan panas dapat merambat lebih cepat. Hal itu divalidasi dalam pengujian insulasi termal dengan temperatur lingkungan 500°C. Hasil dari pengujian tersebut disajikan pada Tabel 4.2 di bawah ini.

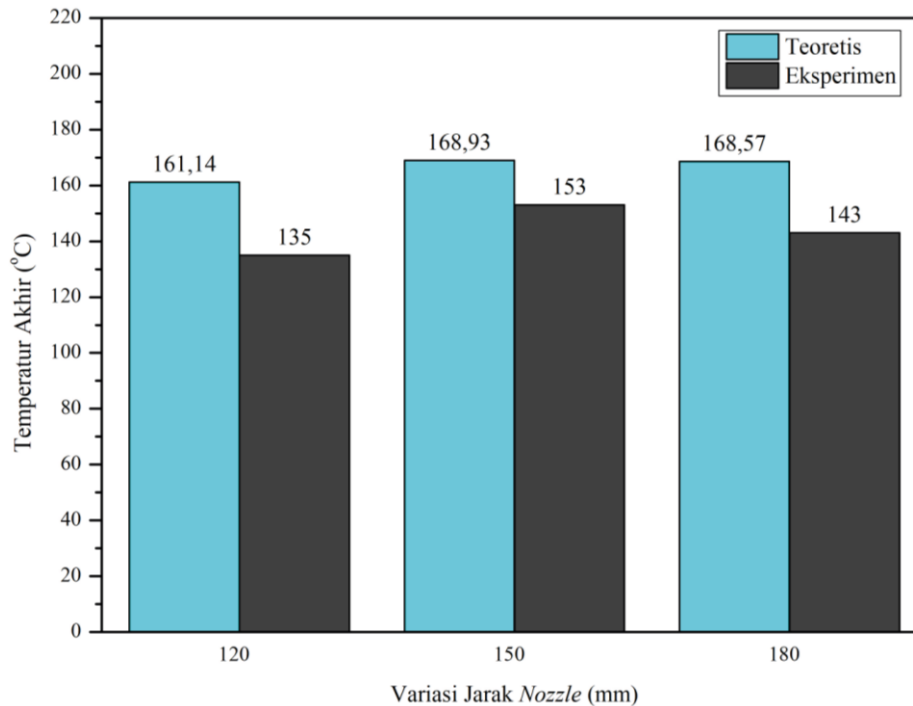
**Tabel 4.2** Hasil pengujian insulasi termal

Jarak <i>nozzle</i> (mm)	Temperatur akhir (°C)	Kinerja insulasi (%)
120	135	73
150	153	69
180	143	71

Pada Tabel 4.2, TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm dapat menurunkan temperatur lingkungan awal sebesar 500°C menjadi 135, 153 dan 143°C. Jika dibandingkan dengan nilai konduktivitas termal, keduanya mempunyai kecenderungan yang serupa, dengan urutan dari yang terkecil hingga terbesar, yaitu TBC dengan jarak *nozzle* 120, 180 dan 150 mm. Kinerja insulasi termal yang didapatkan bisa mencapai 69-73%. Hal ini disebabkan karena panas yang mengenai lapisan TBC diteruskan dan diturunkan secara bergantian oleh lapisan *coating* TiO<sub>2</sub>, *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CFRP. Hal ini sesuai dengan fungsi dari TBC sebagai *composite walls* yang dapat menurunkan temperatur lingkungan secara paralel (Frank P. Incropera et al., 2007). Untuk aplikasi pada temperatur tinggi diatas 1000°C, *coating* TiO<sub>2</sub> dapat menahan temperatur lingkungan hingga 600°C, namun karena menggunakan sistem TBC maka 1000°C tersebut dapat diteruskan ke lapisan *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CFRP.

Kinerja insulasi termal tersebut juga coba dibandingkan secara teoretis dan eksperimen menggunakan data temperatur akhir masing-masing. Hal tersebut ditampilkan pada Gambar 4.13

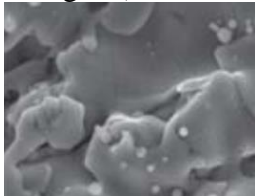
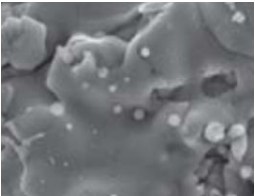
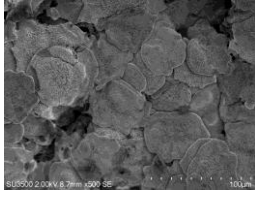
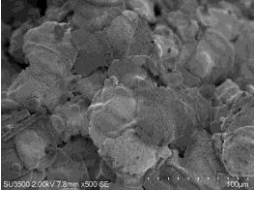
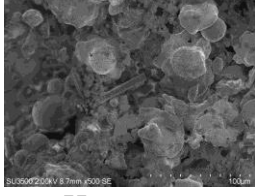
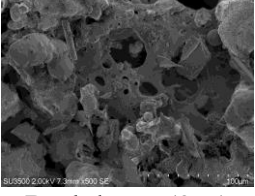
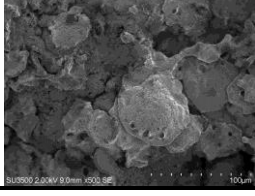
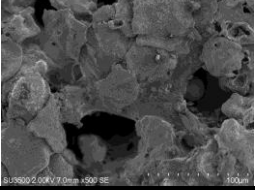




**Gambar 4.13** Grafik perbandingan temperatur akhir teoretis dan eksperimen

Dari Gambar 4.13 di atas, didapatkan temperatur akhir teoretis dari TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150 dan 180 mm sebesar 161,14, 168,93 dan 168,57°C. Jika dibandingkan dengan temperatur akhir rill masing-masing sebesar 135, 153 dan 143°C maka terjadi error sebesar 16,2, 9,4 dan 15,2% untuk TBC dengan jarak *nozzle* 120, 150, 180°C. Dari kedua data temperatur akhir tersebut memiliki kecenderungan yang serupa dengan data konduktivitas termal masing-masing. Sehingga ada hubungan antara nilai konduktivitas dengan kinerja insulasi termal. Semakin rendah nilai konduktivitas termal dari suatu material maka semakin baik pula kinerja insulasi termalnya. Selanjutnya, jika semakin baik kinerja insulasi termal suatu material, maka produk TBC yang dibuat dapat disebut berhasil, yaitu dengan jarak *nozzle* 120 mm.

**Tabel 4.3** Tabulasi Karakterisasi TBC

Jarak <i>Nozzle</i> (mm)	Morfologi Insulasi Termal		Konduktivitas Termal (W/m.K)	Kinerja Insulasi Termal (%)	Daya Lekat (MPa)	<i>(Good or Not Good)</i>
	Sebelum	Sesudah				
Ref.	Kim H., 2021		Kim H., 2021	Kim H., 2021	Lopez, 2015	
Standar (CFRP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Homogen ( <i>Fullmelted</i> ) 	Tidak rusak 	< 3,38	50	0,3-1,5	<i>Good</i>
TBC 120 (CFRP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> )	<b>Homogen</b> 	<b>Tidak rusak</b> 	<b>0,3005</b>	<b>73</b>	<b>0,68</b>	<b><i>Good</i></b>
TBC 150 (CFRP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> )	Heterogen 	Berlubang (11%) 	<b>0,3070</b>	<b>69</b>	<b>0,71</b>	<b><i>Not Good</i></b>
TBC 180 (CFRP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> )	Heterogen 	Berlubang (9%) 	<b>0,3035</b>	<b>71</b>	<b>0,73</b>	<b><i>Not Good</i></b>

---

Pada Tabel 4.3 disajikan perbandingan data hasil penelitian terhadap standar material TBC yang sudah diteliti sebelumnya. Huruf cetak tebal memiliki arti bahwa variasi jarak *nozzle* yang digunakan telah memenuhi standar. Pada pengujian morfologi, TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm memenuhi standar yaitu partikelnya homogen dan tidak mengalami kerusakan setelah terkena paparan panas. Sedangkan TBC dengan jarak *nozzle* 150 dan 180 mm tidak memenuhi standar karena partikelnya heterogen dan mengalami kerusakan berupa lubang. Pada pengujian insulasi termal, ketiga variasi jarak *nozzle* yang digunakan memenuhi standar yaitu memiliki konduktivitas termal lebih rendah dari TBC *skin*  $Al_2O_3$  sebesar 3,38 W/m.K dan kinerja insulasi termal dari ketiga jarak *nozzle* bisa mencapai 73% pada TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm. Pada pengujian daya lekat, ketiga variasi jarak *nozzle* yang digunakan memenuhi standar daya lekat keramik sejenis yaitu pada *range* 0,3-1,5 MPa. Dari penjelasan di atas, hanya TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm yang memenuhi semua standar. Sehingga TBC dengan jarak *nozzle* 120 mm dapat diaplikasikan untuk sistem perlindungan termal pada CFRP.

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun kesimpulan yang dapat diambil untuk penelitian ini adalah.

1. Kenaikan jarak *nozzle* meningkatkan daya lekat TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nilai tertinggi didapatkan pada jarak *nozzle* 180 mm sebesar 0,73 MPa.
2. Kenaikan jarak *nozzle* menurunkan kinerja insulasi termal TBC TiO<sub>2</sub>-*skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kinerja insulasi terbaik didapatkan pada jarak *nozzle* 120 mm dengan konduktivitas termal sebesar 0,3005 W/m.K yang mempunyai kinerja insulasi termal sebesar 69%.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini adalah.

1. Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan upaya peningkatan ketahanan termal *skin* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sepanjang proses *thermal spray*.
2. Penggunaan peralatan dan prosedur *thermal spray* yang sesuai dengan spesifikasi serbuk untuk meningkatkan performa *coating*.
3. Jika terdapat metode pengujian insulasi termal terbaru, dapat dilakukan pengujian dengan metode tersebut.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, R. A., Ajeel, S. A., Ali Bash, M. A., & Kadhim, M. J. (2021). Effect of plasma spray distance on the features and hardness reliability of YSZ thermal barrier coating. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2553–2560. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.578>
- Adamczyk, W. P., Pawlak, S., & Ostrowski, Z. (2018). Determination of thermal conductivity of CFRP composite materials using unconventional laser flash technique. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 124, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.022>
- Ahmad, S., Ali, S., Salman, M., & Baluch, A. H. (2021). A comparative study on the effect of carbon-based and ceramic additives on the properties of fiber reinforced polymer matrix composites for high temperature applications. In *Ceramics International* (Vol. 47, Issue 24, pp. 33956–33971). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.356>
- Akmal Johan. (2009). Karakterisasi Sifat Fisik dan Mekanik Bahan Refraktori  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pengaruh Penambahan TiO<sub>2</sub>. *Jurnal Penelitian Sains*.
- Anshida Mayeen. (2018). *Field-Emission Scanning Electron Mi-croscopy*.
- Atkinson, H. v, & Davies, S. (2000). *Fundamental Aspects of Hot Isostatic Pressing: An Overview*.
- Bharath, D., Sandhya Rani, B., Saritha, V., Irshad Khan, P., & Kumar Chokka, S. (2021). Tensile and erosion behaviour of medium calcined alumina microparticles on GFRP composites fabricated with vacuum bagging process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 307–310. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.166>
- Feuerstein, A., Knapp, J., Taylor, T., Ashary, A., Bolcavage, A., & Hitchman, N. (2008). Technical and economical aspects of current thermal barrier coating systems for gas turbine engines by thermal spray and EBPVD: A review. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 17, Issue 2, pp. 199–213). Springer Science and Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9148-y>
- Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, & Adrienne S. Lavine. (2007). *fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition*.
- Gao, T., & Jelle, B. P. (2013). Thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanotubes. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(3), 1401–1408. <https://doi.org/10.1021/jp3108655>
- Gardon, M., & Guilemany, J. M. (2014). Milestones in functional titanium dioxide thermal spray coatings: A review. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 23, Issue 4, pp. 577–595). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0066-5>
- Goldschmidt, A. 1938-, & Streitberger, H.-J. 1945-. (2007). *BASF handbook on basics of coating technology*.
- Golewski, P., & Sadowski, T. (2019). Description of thermal protection against heat transfer of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) coated by stiffened ceramic mat (TBC). *Composite Structures*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111489>
- Gou, J. J., Dai, Y. J., Li, S., & Tao, W. Q. (2015). Numerical study of effective thermal conductivities of plain woven composites by unit cells of different sizes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 829–840. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.074>
- Hegde, S., Satish Shenoy, B., & Chethan, K. N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658–662. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.749>
- Ibrahim, A., Lima, R. S., Berndt, C. C., & Marple, B. R. (2007). Fatigue and mechanical properties of nanostructured and conventional titania (TiO<sub>2</sub>) thermal spray coatings.

- Surface and Coatings Technology*, 201(16–17), 7589–7596.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.025>
- J.R. Davis. (2004). *Handbook of thermal spray technology*. ASM International.
- Kandare, E., Kandola, B. K., Myler, P., & Edwards, G. (2010). Thermo-mechanical responses of fiber-reinforced epoxy composites exposed to high temperature environments. Part I: Experimental data acquisition. *Journal of Composite Materials*, 44(26), 3093–3114.  
<https://doi.org/10.1177/0021998310373511>
- Kandola, B. K., & Kandare, E. (2008). Composites having improved fire resistance. In *Advances in Fire Retardant Materials* (pp. 398–442). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1533/9781845694701.3.398>
- Kandola, B., Sarker, F., Luangtriratana, P., & Myler, P. (2016). Thermal protection of carbon fiber-reinforced composites by ceramic particles. *Coatings*, 6(2).  
<https://doi.org/10.3390/coatings6020022>
- Katagiri, K., Honda, S., Nakaya, S., Kimura, T., Yamaguchi, S., Sonomura, H., Ozaki, T., Kawakita, S., Takemura, M., & Sasaki, K. (2021). Tensile strength of CFRP with curvilinearly arranged carbon fiber along the principal stress direction fabricated by the electrodeposition resin molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106271>
- Kim, H., Kim, J., Lee, J., & Lee, M. W. (2021). Thermal barrier coating for carbon fiber-reinforced composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 225.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109308>
- Kodur, V. K. R., Bhatt, P. P., & Naser, M. Z. (2019). High temperature properties of fiber reinforced polymers and fire insulation for fire resistance modeling of strengthened concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 175.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107104>
- Lazuardi, M. S., & Widyastuti. (2015). *Pengaruh Kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Jarak Flame Spray terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Daya Lekat YSZ/YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/DL-TBC untuk Nosel Rocket*.
- Lee, J. bin, Shin, D. H., Moon, J. H., & Lee, S. H. (2012). Effect of flame spray distance on the adhesive characteristics of Ni-20mass%Cr layers on SCM415 substrates. *Materials Transactions*, 53(11), 2043–2048. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012217>
- Liu, B., Liu, Y., Zhu, C., Xiang, H., Chen, H., Sun, L., Gao, Y., & Zhou, Y. (2019). Advances on strategies for searching for next generation thermal barrier coating materials. In *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 35, Issue 5, pp. 833–851). Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.11.016>
- Luangtriratana, P., Kandola, B. K., & Myler, P. (2015). Ceramic particulate thermal barrier surface coatings for glass fibre-reinforced epoxy composites. *Materials and Design*, 68, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.057>
- Mouritz, A. P., Feih, S., Kandare, E., Mathys, Z., Gibson, A. G., des Jardin, P. E., Case, S. W., & Lattimer, B. Y. (2009). Review of fire structural modelling of polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 1800–1814.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.001>
- Mustika, T., Soegiyono, B., & Jujur, D. I. N. (2011). *Pembuatan Komposit AC8A/SICP dengan Metode Hot Press Metalurgi Serbuk*.
- Ogasawara, T., Hirano, Y., & Yoshimura, A. (2010). Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(8), 973–981.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.001>



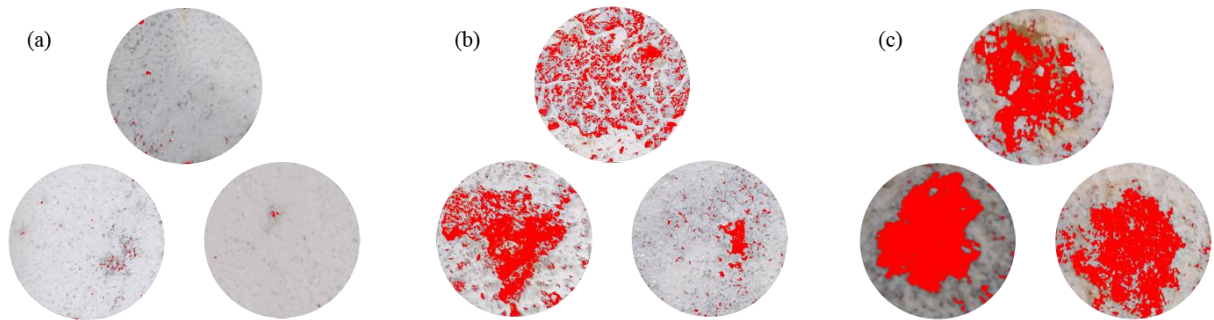
- Poór, D. I., Geier, N., Pereszlai, C., & Xu, J. (2021). A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 223). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>
- Qin, Y., Jiao, Q., Zheng, G., Zhang, F., He, J., & Yin, F. (2018). Effects of spray distance on the microstructure and mechanical properties of reactive plasma sprayed TiCN coatings. *Ceramics International*, 44(14), 17230–17239. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.181>
- Rezzoug, A., Abdi, S., Kaci, A., & Yandouzi, M. (2018). Thermal spray metallisation of carbon fibre reinforced polymer composites: Effect of top surface modification on coating adhesion and mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*, 333, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.066>
- Rickerby, D. S. (1988). A Review of the Methods for the Measurement of Coating Substrate Adhesion. In *Surface and Coatings Technology* (Vol. 36).
- Saadatkah, N., Carillo Garcia, A., Ackermann, S., Leclerc, P., Latifi, M., Samih, S., Patience, G. S., & Chaouki, J. (2020). Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA. In *Canadian Journal of Chemical Engineering* (Vol. 98, Issue 1, pp. 34–43). Wiley-Liss Inc. <https://doi.org/10.1002/cjce.23673>
- Shackelford, J. F., & Doremus, R. H. (2008). Ceramic and glass materials: Structure, properties and processing. In *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73362-3>
- Sohlberg, K., Nie, X., Zhuo, S., & Maeng, G. (2009). Doping of TiO<sub>2</sub> polymorphs for altered optical and photocatalytic properties. *International Journal of Photoenergy*, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/294042>
- The American Ceramic Society. (2009). *Progress In Thermal Barrier Coatings*.
- Varavallo, R., Manfrinato, M. D., Rossino, L. S., Maluf, O., & Camargo, F. (2012). Adhesion of thermally sprayed metallic coating. *Journal of ASTM International*, 9(2). <https://doi.org/10.1520/JAI103414>
- Vincent, C., Silvain, J. F., Heintz, J. M., & Chandra, N. (2012). Effect of porosity on the thermal conductivity of copper processed by powder metallurgy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73(3), 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2011.11.033>
- West System. (2010). *Vacuum Bagging Techniques A guide to the principles and practical application of vacuum bagging for laminating composite materials with WEST SYSTEM® Epoxy*.
- Widyastuti, Ardhyananta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (2019). Buku Karakterisasi Material 2020. ITS Press, 1.
- Zhang, D. (2011). Thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). In *Thermal Barrier Coatings* (pp. 3–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090829.1.3>
- Zotti, A., Zuppolini, S., Zarrelli, M., & Borriello, A. (2016). Fracture Toughening Mechanisms in Epoxy Adhesives. In *Adhesives - Applications and Properties*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65250>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### 1.HASIL PENGUJIAN *PULL OFF TEST*

Variasi (mm)	Kuat Daya Lekat (MPa)			Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi
	Data 1	Data 2	Data 3		
120	0,74	0,63	0,66	0,68	0,057
150	0,64	0,74	0,77	0,72	0,068
180	0,73	0,81	0,66	0,73	0,075



Keterangan:  
Putih: *Cohesive fracture*  
Hitam: *Adhesive fracture*

### 2.HASIL PERHITUNGAN *ADHESIVE FRACTURE*

Variasi (mm)	Luas Daerah <i>Adhesive Fracture</i> (%)			Rata-Rata (%)	Standar Deviasi
	Data 1	Data 2	Data 3		
120	0,495	0,501	0,110	0,369	0,224
150	26,781	33,063	4,980	21,608	14,739
180	37,347	47,703	45,314	43,455	5,423

### 3.HASIL PERHITUNGAN TEMPERATUR AKHIR TEORETIS VS EKSPERIMEN

Variasi (mm)	T akhir Teoretis (°C)	T akhir Riil (°C)	Error (%)
120	161,14	135	16,2
150	168,93	153	9,4
180	168,57	143	15,2

### 4.PERHITUNGAN TEMPERATUR AKHIR TEORETIS

Perhitungan Energi Kalor yang Digunakan

Diketahui:

k TBC120 = 0,3005 W/m.K

k TBC150 = 0,3070 W/m.K

k TBC180 = 0,3035 W/m.K

T1 = 773 K

T2 TBC120 = 408 K

T2 TBC150 = 426 K

T2 TBC180 = 416 K

t = 30 second

L TBC120 = 0,00319 m

L TBC150 = 0,00305 m

$$L \text{ TBC180} = 0,00326 \text{ m}$$

$$A = 0,0004 \text{ m}^2$$

Ditanya: Q

Dijawab:

$$Q = k \cdot A \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

$$Q = 0,3005 \cdot 0,0004 \cdot 30 \cdot \frac{(773 - 408)}{0,00319}$$

$$Q = 412,60 \text{ J}$$

Tabel hasil perhitungan energi kalor yang digunakan

Variasi	Kalor yang digunakan (Joule)
TBC120	412,60
TBC150	419,13
TBC180	398,83

Perhitungan T akhir teoretis

Diketahui:

$$Q \text{ TBC120} = 412,60 \text{ J}$$

$$Q \text{ TBC150} = 419,13 \text{ J}$$

$$Q \text{ TBC180} = 398,83 \text{ J}$$

$$q \text{ TBC120} = 13,75 \text{ W}$$

$$q \text{ TBC150} = 13,97 \text{ W}$$

$$q \text{ TBC180} = 13,29 \text{ W}$$

$$k \text{ coat TiO}_2 = 8,5 \text{ W/m.K}$$

$$k \text{ skin Al}_2\text{O}_3 = 0,2687 \text{ W/m.K}$$

$$k \text{ CFRP} = 0,36 \text{ W/m.K}$$

$$T1 = 773 \text{ K}$$

$$t = 30 \text{ second}$$

$$A = 0,0004 \text{ m}^2$$

$$La \text{ TBC120} = 0,00035 \text{ m}$$

$$La \text{ TBC150} = 0,00031 \text{ m}$$

$$La \text{ TBC180} = 0,00039 \text{ m}$$

$$Lb \text{ TBC120} = 0,00204 \text{ m}$$

$$Lb \text{ TBC150} = 0,00194 \text{ m}$$

$$Lb \text{ TBC180} = 0,00207 \text{ m}$$

$$Lc = 0,0008 \text{ m}$$

Ditanya: T4

Dijawab:

$$q = \frac{T1 - T4}{\frac{La}{(ka \cdot A)} + \frac{Lb}{(kb \cdot A)} + \frac{Lc}{(kc \cdot A)}}$$

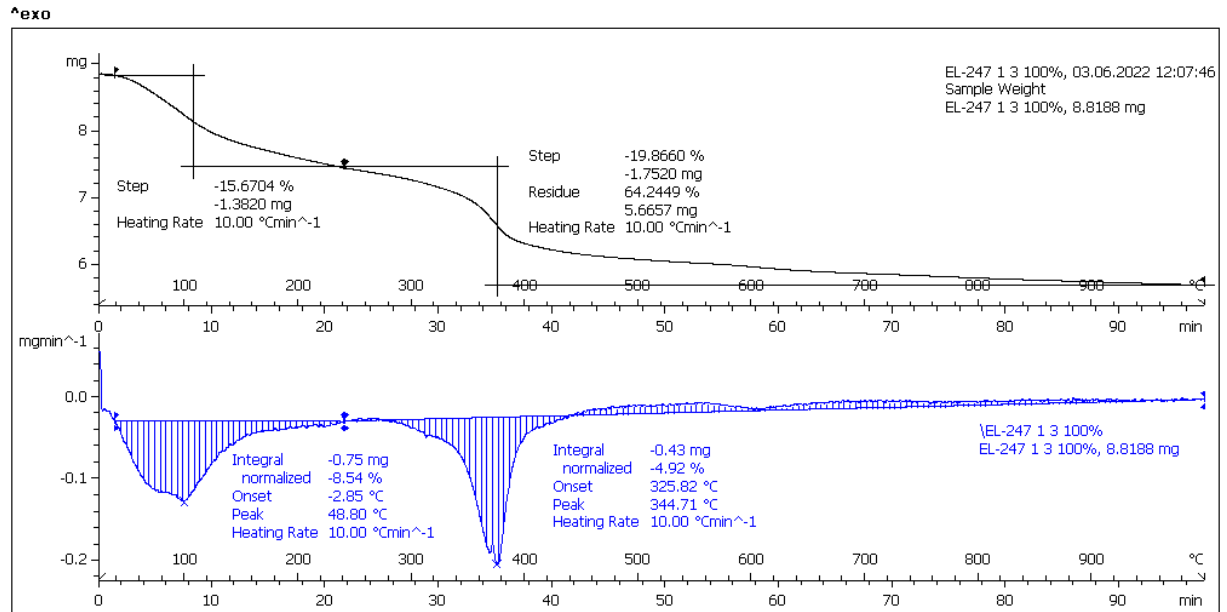
$$13,75 = \frac{773 - T4}{\frac{0,00035}{(8,5 \cdot 0,0004)} + \frac{0,00204}{(0,2687 \cdot 0,0004)} + \frac{0,0008}{(0,36 \cdot 0,0004)}}$$

$T_4 = 161,14^\circ\text{C}$

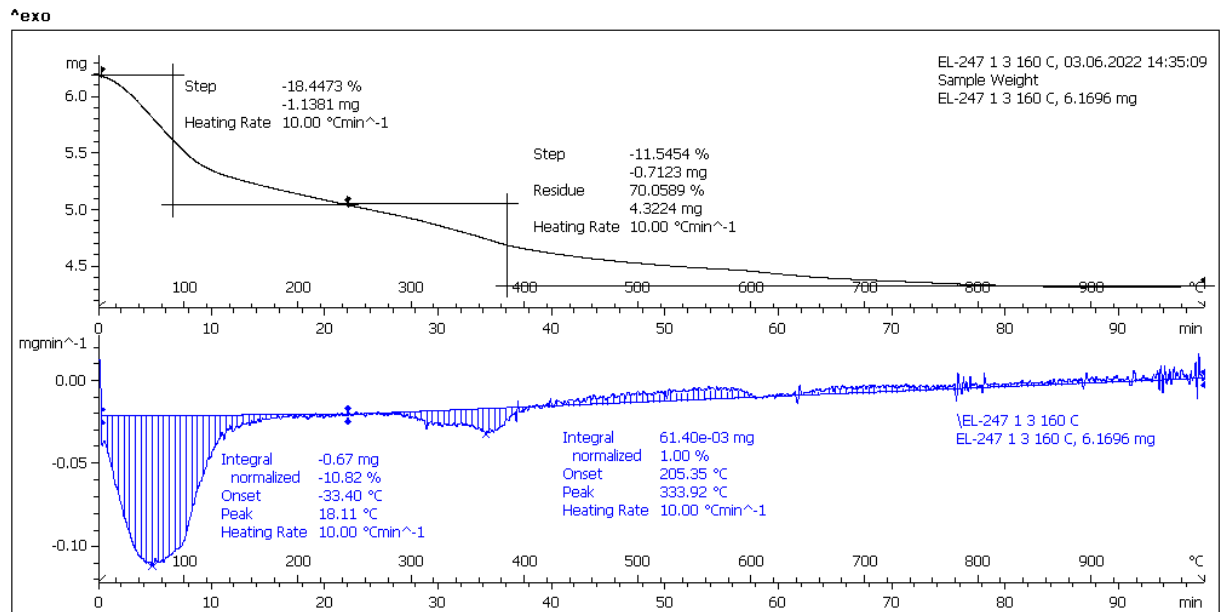
Tabel T akhir teoretis

Variasi	T akhir ( $^\circ\text{C}$ )
TBC120	161,14
TBC150	168,93
TBC180	168,57

### 5.GRAFIK TGA SKIN $\text{Al}_2\text{O}_3$ 1:3 $160^\circ\text{C}$



### 6.GRAFIK TGA SKIN $\text{Al}_2\text{O}_3$ 1:3 $100^\circ\text{C}$



## 7. PERHITUNGAN ANOVA UNTUK NILAI DAYA LEKAT

### Tests of Normality

Nilai Uji	Jenis Sampel	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
	120 mm	.282	3	.	.936	3	.510
	150 mm	.301	3	.	.912	3	.424
	180 mm	.196	3	.	.996	3	.878

Karena nilai signifikansi diatas 0,05, maka persebaran data normal.

### ANOVA

Nilai Uji

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.004	2	.002	.358	.713
Within Groups	.032	6	.005		
Total	.036	8			

Karena nilai signifikansi diatas 0,05 maka variasi tidak berpengaruh secara signifikan.

## 8. GAMBAR VISUAL *DOLLY* SETELAH PENGUJIAN *PULL OFF TEST*

Variasi 120 mm



Variasi 150 mm



Variasi 180 mm



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, penelitian ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, ucapan terima kasih tak lupa penulis sampaikan kepada pihak-pihak yang turut serta membantu, diantaranya:

1. Ayah, Ibu, Rara dan Arin, keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis di setiap kondisi.
2. Serly Hardiyanti sebagai patner penulis ketika di Kabinet Kontribusi, Proyek Nosecone Roket Sonde 2 Tingkat dan proyek workshop lainnya, hingga Tugas Akhir ini. Semoga bisa bekerja sama di kesempatan yang lain.
3. Mas Adhi, Adek Azhar, Mas Sugik, Mas Afrizal, Mbak Ninik dan semua keluarga besar Workshop Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan yang selalu membantu dan membimbing penulis saat melakukan penelitian.
4. Iyan, Yasin, Rizky, Eka, Rofiq, Abi, dan Nabela sebagai anggota Kontrakan Zabuza yang selalu menjadi teman baik penulis dari sebelum berkuliah di ITS.
5. Aldi, Hamdan, Akbar, Silvi, Mila, Erika, Aul dan Selsabil sebagai teman bercerita penulis selama berkuliah di DTMM sejak mahasiswa baru hingga tahun terakhir.
6. Yuslam, Syarif, Rikza, Fatah, Arga, Darell, Hanif dan semua keluarga besar Kos Family yang selalu menjadi teman bermain dan beramal.
7. Azon, Ega, Ari dan Bu Titi sebagai keluarga Kos Limolas yang menemani penulis pada tahun terakhir di ITS.
8. Keluarga Matahati sebagai tempat terbaik untuk penulis belajar tentang keilmuan DTMM.
9. Kabinet Kontribusi, Pemandu Pamungkas dan Forkom Baskara Abhipraya sebagai tempat penulis menuntut ilmu tentang manajerial.
10. Keluarga besar MT20 yang telah menjadi angkatan terbaik dalam menghiasi masa-masa perkuliahan.
11. Bapak/Ibu tenaga pendidik yang membantu kegiatan akademik selama berkuliah di ITS.
12. MT17, MT18, dan MT19 yang telah memberikan banyak teladan.
13. MT21 dan MT22 yang telah menjadi adik terbaik selama berkuliah.
14. Seluruh pihak yang telah ambil bagian dalam kehidupan penulis sehingga bisa sampai di titik ini.

Sekali lagi penulis ucapkan banyak terima kasih dan juga ingin memohon maaf jika penulis pernah melakukan kesalahan selama berkuliah. Semoga kebaikan yang telah kalian berikan dibalas oleh Allah SWT. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dalam penelitian lebih lanjut, dan khususnya demi kemajuan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS serta tanah air tercinta.

Surabaya, 5 Juli 2022  
Penulis

Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Wafiq Syeach Muhaqqi Al Haq. Merupakan anak pertama dari pasangan Nizarul Fauzi dan Sri Utami yang lahir pada tanggal 15 Juni 2000 di Trenggalek, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri 2 Pojokrejo, SMP Negeri 1 Kesamben, SMA Negeri 1 Sooko dan melanjutkan studi Strata-1 (S1) di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS melalui jalur SNMPTN pada tahun 2018. Selama berkuliah penulis aktif dalam kegiatan akademik seperti Grader Perlakuan Panas dan Proyek Nosecone Roket Sonde 2 Tingkat. Pada bidang non akademik penulis aktif di beberapa pelatihan kewirausahaan (LKMW TD), media dan desain (AMS), manajerial (LKMM TM) dan kepeemanduan ITS.

Selain itu juga penulis aktif di Himpunan Teknik Material dan Metalurgi ITS sebagai staf Dalam Negeri dan Wakil Ketua Himpunan pada periode selanjutnya. Penulis juga telah melakukan kerja praktik di perusahaan perkeretaapian yaitu PT. INKA Multi Solusi selama 90 hari di bagian *welding inspection*. Untuk menyelesaikan studi S1, penulis melakukan penelitian dalam bidang Material Inovatif tentang rekayasa permukaan material dengan judul tugas akhir “ANALISIS PENGARUH JARAK *NOZZLE* TERHADAP DAYA LEKAT DAN INSULASI TERMAL TBC  $\text{TiO}_2$ -*SKIN*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  PADA KOMPOSIT CFRP.”. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [syeach@gmail.com](mailto:syeach@gmail.com) dan nomor telepon +6281232744480.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*