



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS *GREEN DENSITY* AKIBAT PENGARUH  
VARIASI TEKANAN PADA PROSES KOMPAKSI  
SERBUK Cu-Sn10% MENGGUNAKAN *DISCRETE  
ELEMENT METHOD***

Muhammad Burhanuddin  
NRP. 0211164000037

Dosen Pembimbing  
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.  
NIP. 196807061999031004

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS *GREEN DENSITY* AKIBAT PENGARUH  
VARIASI TEKANAN PADA PROSES KOMPAKSI  
SERBUK Cu-Sn10% MENGGUNAKAN *DISCRETE  
ELEMENT METHOD***

Muhammad Burhanuddin  
NRP. 0211164000037

Dosen Pembimbing  
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.  
NIP. 196807061999031004

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT - TM184835

**GREEN DENSITY ANALYSIS DUE TO PRESSURE  
VARIATION ON THE Cu-Sn10% POWDER  
COMPACTION PROCESS USING DISCRETE  
ELEMENT METHOD**

Muhammad Burhanuddin  
NRP. 0211164000037

Advisor  
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.  
NIP. 196807061999031004

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS *GREEN DENSITY* AKIBAT PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA PROSES KOMPAKSI SERBUK Cu-Sn10% MENGGUNAKAN *DISCRETE ELEMENT METHOD*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Muhammad Burhanuddin**

NRP. 0211164000037

Disetujui oleh:

1. **Ir. Julendra B. Ariatedja, MT**..... (Pembimbing)  
NIP. 196807061999031004
2. **Agus Sigit Pramono, Ir. Dr. DEA**..... (Penguji 1)  
NIP. 196508101991021001
3. **Yusuf Kaelani, Ir. M.Sc.E**..... (Penguji 2)  
NIP. 196511031990021001
4. **Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng PhD**..... (Penguji 3)  
NIP. 198202102006041002

SURABAYA  
AGUSTUS 2020



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**ANALISIS *GREEN DENSITY* AKIBAT PENGARUH  
VARIASI TEKANAN PADA PROSES KOMPAKSI  
SERBUK Cu-Sn10% MENGGUNAKAN *DISCRETE  
ELEMENT METHOD***

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Burhanuddin  
**NRP** : 0211164000037  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Julendra B. Ariatedja, MT.

**ABSTRAK**

*Frangible bullet di Indonesia dikembangkan oleh workshop yang berada di bawah naungan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS, produk tersebut diproduksi menggunakan metode metalurgi serbuk konvensional. Kondisi terkini, produk memiliki kecacatan dimana mengalami deformasi atau hancur saat akan dimasukkan ke dalam selongsong peluru. Hipotesa penyebab kondisi tersebut adalah heterogenitas densitas peluru setelah melalui proses kompaksi serbuk.*

*Dalam penelitian ini metode elemen diskrit digunakan untuk memprediksi distribusi densitas pada proses kompaksi serbuk Cu-Sn10%, dengan variasi tekanan yaitu 500, 700, dan 900 Psi. Variasi tersebut diterapkan pada dua geometri peluru yaitu flat nose dan full round.*

*Dari penelitian ini didapatkan hasil distribusi bulk relative density pada green compact frangible bullet. Terdapat pola yang berulang pada seluruh variasi, dimana area yang dekat dengan sumber tekanan memiliki densitas bulk relatif yang lebih tinggi daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan. Hal ini menunjukkan bahwa area yang dekat dengan sumber tekanan merupakan daerah yang paling tangguh pada geometri tersebut. Dari penelitian ini juga didapatkan hubungan yang berbanding lurus antara tekanan terhadap bulk density, dimana bulk density terendah terjadi pada tekanan 500 Psi pada geometri full round*

yaitu senilai 1614,21 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan nilai bulk density tertinggi terjadi pada tekanan 900 Psi pada geometri full round dengan nilai 1952,608 kg/m<sup>3</sup>. Dari kedua kesimpulan tersebut, kesimpulan terkait fenomena deformasi pada frangible bullet saat akan dipasang pada selongsong peluru tidak diakibatkan oleh distribusi densitas yang heterogen, namun lebih mengarah pada densitas bulk (green density) yang tidak memenuhi spesifikasi frangible bullet layak tembak.

**Kata kunci : Frangible Bullet, Kompaksi Serbuk, Distribusi Bulk Relative Density, Metode Elemen Diskrit**

# **GREEN DENSITY ANALYSIS DUE TO PRESSURE VARIATION ON THE Cu-Sn10% POWDER COMPACTION PROCESS USING DISCRETE ELEMENT METHOD**

**Student Name** : Muhammad Burhanuddin  
**Student's ID** : 02111640000037  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Advisory Lecturer** : Ir. Julendra B. Ariatedja, MT.

## **ABSTRACT**

*Frangible bullet in Indonesia was developed by a workshop supervised by Material and Metallurgy Department of ITS, the product manufactured using conventional powder metallurgy methods. Current conditions about these products that the bullets start to deformed or destroyed when being put into a cartridge case. The hypothesis that causes this condition pointed to the heterogeneity of the bullet density after through the powder compacting process.*

*In this study, discrete element method used to predict the density distribution in the compacting process of Cu-Sn10% powder, using pressure variation of 500, 700, and 900 Psi. This variation applied to both of frangible bullet geometries, that is flat nose and full round.*

*This study obtained the bulk relative density distribution in green compact of frangible bullet. There is recurring pattern for all variations, whereas the area close to the pressure source has a higher density than the area that far from the pressure source. This patterns shows that the area close to the pressure source was the most toughness area in the geometry. From this study also obtained a relationship between bulk density due to applied pressure, There is direct relation on both. The lowest bulk density occurs at pressure of 500 Psi on a full round geometry that's obtained 1614,21 kg / m<sup>3</sup>, while the highest bulk density occur at pressure of*

*900 Psi on full round geometry with 1952,608 kg / m<sup>3</sup>. From these two conclusions, the deformation phenomenon of frangible bullet's when it assembled on the cartridge shell isn't caused by heterogeneous density distribution, but rather caused by bulk density (green density) that's not in range of required density of shootable frangible bullet.*

**Keywords : Frangible bullet, Powder Compacting, Bulk Relative Density Distribution, Discrete Element Method**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya sampaikan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, serta rizki sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Moh. Jamiluddin dan Ibu Kodriyah, serta keluarga yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan nasehat kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Eng.Sc., Bapak Alief Wikarta, S.T., M. Eng., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik dalam penyusunan tugas akhir.
4. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS yang telah memberikan bekal berupa ilmu pengetahuan serta sarana dan prasarana selama perkuliahan.
5. EDEM Team selaku penyedia *software* EDEM yang telah memberikan *free trial software* untuk melakukan simulasi dalam tugas akhir.
6. Rekan BPH dan Sekdep HMM 2018/2019 serta ITS Team Sapuangin 2019/2020 yang telah memberikan banyak pelajaran hidup utamanya jiwa sosial.
7. Bagus Erman dan rekan – rekan penghuni terakhir kos kurnia yang selalu menemani penulis dalam masa pandemi Covid-19.
8. Seluruh rekan saya di ITS khususnya rekan Departemen Teknik Mesin utamanya angkatan M59.

Semoga amal dan kebaikan yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari Allah SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

|   |            |
|---|------------|
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....                            | <b>i</b>   |
| <b>ABSTRAK</b> .....                                      | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                     | <b>v</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                               | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                                   | <b>ix</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                                | <b>xi</b>  |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                                 | <b>xv</b>  |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....                            | <b>1</b>   |
| 1.1 Latar Belakang .....                                  | 1          |
| 1.2 Rumusan Masalah.....                                  | 2          |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                               | 2          |
| 1.4 Batasan Masalah .....                                 | 3          |
| 1.5 Manfaat Penelitian .....                              | 3          |
| <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKSA</b> .....                      | <b>5</b>   |
| 2.1 Balistika .....                                       | 5          |
| 2.2 <i>Frangible bullet</i> .....                         | 6          |
| 2.3 Komposit Cu-Sn10% .....                               | 7          |
| 2.4 Metalurgi Serbuk .....                                | 9          |
| 2.4.1 Mixing.....   | 10         |
| 2.4.2 Kompaksi .....                                      | 10         |
| 2.4.3 Sintering.....                                      | 17         |
| 2.5 <i>Overlap</i> .....                                  | 19         |
| 2.6 Densitas.....   | 20         |
| 2.7 Volumetric Strain.....                                | 21         |
| 2.8 Discrete Element Method oleh EDEM <sup>TM</sup> ..... | 22         |
| 2.8.1 Persamaan Gerak pada DEM.....                       | 24         |
| 2.8.2 Edinburg Elasto – Plastic Adhesive Model .....      | 25         |
| 2.8.3 Rayleigh Time Step .....                            | 29         |
| 2.9 Penelitian Terdahulu .....                            | 30         |
| <b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....                  | <b>33</b>  |
| 3.1 Metodologi.....                                       | 33         |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 3.1.1        | Diagram Alir Penelitian.....                    | 33        |
| 3.2          | Spesifikasi Material .....                      | 34        |
| 3.2.1        | Material Serbuk .....                           | 34        |
| 3.2.2        | Material Cetakan dan Punch.....                 | 35        |
| 3.3          | Spesifikasi Geometri.....                       | 35        |
| 3.3.1        | Geometri Cetakan .....                          | 35        |
| 3.3.2        | Geometri Punch .....                            | 36        |
| 3.4          | Permodelan dengan EDEM .....                    | 38        |
| 3.4.1        | Diagram Alir Simulasi.....                      | 38        |
| 3.4.2        | Modelling .....                                 | 38        |
| 3.4.3        | Define Material Property .....                  | 39        |
| 3.4.4        | Define Particle Physic Property.....            | 39        |
| 3.4.5        | Define Equipment Kinematics .....               | 40        |
| 3.4.6        | Define Factory .....                            | 41        |
| 3.4.7        | Define Contact.....                             | 42        |
| <b>BAB 4</b> | <b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>               | <b>45</b> |
| 4.1          | Hasil Produksi Partikel .....                   | 45        |
| 4.2          | Analisis <i>Displacemet</i> Hasil Simulasi..... | 46        |
| 4.2.1        | Komparasi <i>Displacement Punch</i> .....       | 48        |
| 4.3          | Analisis <i>Overlap</i> Partikel.....           | 51        |
| 4.4          | Analisis <i>Bulk Density</i> .....              | 54        |
| 4.4.1        | Analisis Distribusi <i>Bulk Density</i> .....   | 56        |
| 4.4.2        | Komparasi <i>Bulk Density</i> .....             | 62        |
| 4.5          | Validasi Produk <i>Frangible bullet</i> .....   | 65        |
| <b>BAB 5</b> | <b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>               | <b>69</b> |
| 5.1          | Kesimpulan.....                                 | 69        |
| 5.2          | Saran .....                                     | 69        |
|              | <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                     | <b>71</b> |
|              | <b>BIODATA PENULIS .....</b>                    | <b>81</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Anatomi Proyektil .....  | 5  |
| Gambar 2. 2 <i>Frangible bullet</i> Cu-Sn10%wt.....  | 6  |
| Gambar 2. 3 Ilustrasi mesin <i>mixing</i> serbuk .....   | 10 |
| Gambar 2. 4 Ilustrasi proses kompaksi serbuk logam.....  | 11 |
| Gambar 2. 5 Pengaruh tekanan kompaksi terhadap <i>green density</i><br>tembaga .....   | 13 |
| Gambar 2. 6 Hubungan antara tekanan dan <i>Green Density</i> dari<br>serbuk logam .....  | 14 |
| Gambar 2. 7 <i>Single action die compaction and double action die<br/>compaction</i> .....   | 15 |
| Gambar 2. 8 Perbandingan persebaran densitas hasil simulasi<br>pada <i>single action</i> dan <i>double action die compaction</i> ..... | 16 |
| Gambar 2. 9 Fase dari proses <i>sintering</i> .....  | 18 |
| Gambar 2. 10 Tumbukan pada dua partikel (kiri) <i>normal force</i><br>(kanan) <i>normal overlap</i> .....                              | 19 |
| Gambar 2. 11 <i>Tangential force</i> saat partikel bertumbukan .....   | 20 |
| Gambar 2. 12 Flowmeter hall.....   | 21 |
| Gambar 2. 13 Deformasi normal elemen material .....  | 21 |
| Gambar 2. 14 (a) pendekatan hard-sphere (b) pendekatan soft-<br>sphere .....   | 23 |
| Gambar 2. 15 gaya yang bekerja pada partikel .....   | 24 |
| Gambar 2. 16 ilustrasi perhitungan pergerakan partikel yang<br>menyangkut nilai percepatan, kecepatan, dan posisi .....                | 25 |
| Gambar 2. 17 Kurva hubungan antara gaya normal – <i>overlap</i><br>untuk permodelan (a) non – linear (b) linear .....                  | 25 |
| Gambar 2. 18 Gaya kontak yang terjadi pada partikel .....  | 27 |
| Gambar 2. 19 Visualisasi displacement punch sebesar 0.02 m<br>(kiri) dan 0.03 m (kanan).....   | 30 |
| Gambar 2. 20 Hubungan <i>displacement</i> terhadap densitas relatif<br><i>bulk</i> .....   | 30 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2. 21 Hasil simulasi proses kompaksi menggunakan permodelan Hertz pada (a) 0 MPa (b) 2 MPa (c) 25 MPa (d) 50 MPa.....                          | 31 |
| Gambar 2. 22 hubungan antara densitas relatif – tekanan.....  | 31 |
| Gambar 2. 23 Hasil permodelan proses kompaksi (a) <i>loading process</i> (b) <i>unloading process</i> (c) <i>ejection process</i> .....               | 32 |
| Gambar 2. 24 Hubungan antara bulk plasticity dengan particle plasticity .....   | 32 |
| <br>  |    |
| Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian .....   | 34 |
| Gambar 3. 2 Geometri cetakan ( <i>die</i> ) .....   | 36 |
| Gambar 3. 3 Geometri 3D cetakan ( <i>die</i> ).....   | 36 |
| Gambar 3. 4 Geometri pendorong ( <i>punch</i> ).....  | 37 |
| Gambar 3. 5 Geometri 3D pendorong ( <i>punch</i> ).....   | 37 |
| Gambar 3. 6 Diagram alir simulasi.....  | 38 |
| Gambar 3. 7 Properti material (kiri) Serbuk Tembaga (tengah) Serbuk Timah (kanan) <i>Punch</i> dan <i>Die</i> .....                                   | 39 |
| Gambar 3. 8 Properti partikel (atas) Serbuk Tembaga (bawah) Serbuk Timah .....  | 40 |
| Gambar 3. 9 (kiri) Pengaturan <i>displacement</i> dan kecepatan <i>punch</i> (kanan) vektor dari <i>displacement</i> dan kecepatan <i>punch</i> ..... | 41 |
| Gambar 3. 10 Jumlah partikel (kiri) Serbuk Tembaga (kanan) Serbuk Timah .....   | 42 |
| Gambar 3. 11 Nilai koefisien kontak partikel dan geometri.....  | 43 |
| <br>  |    |
| Gambar 4. 1 (kiri) sebelum partikel diproduksi (kanan) setelah partikel diproduksi.....   | 45 |
| Gambar 4. 2 Perbandingan jumlah partikel .....  | 46 |
| Gambar 4. 3 Hubungan tekanan terhadap <i>displacement punch</i> .....   | 47 |
| Gambar 4. 4 Hubungan <i>displacement punch</i> – gaya tekan.....  | 49 |
| Gambar 4. 5 Hubungan tekanan – ketinggian <i>green compact</i> .....  | 50 |
| Gambar 4. 6 Perbandingan distribusi <i>overlap</i> .....  | 52 |
| Gambar 4. 7 Hubungan tekanan – <i>normal overlap average</i> .....  | 53 |
| Gambar 4. 8 Hubungan antara tekanan – <i>bulk density</i> .....   | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4. 9 Distribusi partikel pada tiap variasi .....      | 59 |
| Gambar 4. 10 Distribusi <i>bulk density relative</i> .....   | 60 |
| Gambar 4. 11 Hubungan densitas relatif – ketinggian .....    | 61 |
| Gambar 4. 12 Pola distribusi densitas relatif .....          | 63 |
| Gambar 4. 13 Hubungan tekanan – densitas relatif.....        | 64 |
| Gambar 4. 14 Hubungan tekanan kompaksi – densitas serbuk ... | 66 |

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Karakteristik <i>frangible bullet</i> .....          | 7  |
| Tabel 2. 2 Tabel properti material tembaga.....                 | 8  |
| Tabel 2. 3 Tabel properti material timah .....                  | 8  |
| Tabel 2. 4 Ukuran partikel lubrikan .....                       | 17 |
| Tabel 2. 5 Perbedaan antara pendekatan kontinum dan diskrit ... | 23 |
| <br>  |    |
| Tabel 3. 2 Tabel properti material Cu .....                     | 35 |
| Tabel 3. 3 Tabel properti material Sn.....                      | 35 |
| Tabel 3. 4 Tabel properti material ST60 .....                   | 35 |
| <br>  |    |
| Tabel 4. 1 Tabel interval lokasi partikel.....                  | 56 |
| Tabel 4. 2 Lokasi penempatan partikel.....                      | 57 |
| Tabel 4. 3 Tabel data lokasi partikel .....                     | 57 |
| Tabel 4. 4 Hasil pengelompokan jumlah partikel.....             | 58 |

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penelitian dalam sektor pertahanan dan keamanan negara terus berkembang, utamanya mengenai persenjataan. Proyektil dan balistika merupakan bidang yang sedang gencar dilakukan inovasi dan penyempurnaan. Salah satu inovasi yang sedang dilakukan adalah pengembangan sebuah produk peluru untuk menggantikan peluru konvensional. Alasan dibalik itu adalah karena peluru konvensional terbuat dari bahan timbal (Pb) yang dapat mengakibatkan polusi udara dan berdampak serius pada kesehatan, selain itu peluru konvensional ketika ditembakkan akan mengalami efek *ricochet* atau efek pantulan peluru secara acak ketika mengenai suatu objek keras, dimana kondisi ini sangat berbahaya bagi lingkungan sekitar bahkan bagi sang penembak itu sendiri. Hadirnya *frangible bullet* merupakan suatu penemuan penting dalam bidang persenjataan. *Frangible bullet* merupakan peluru yang didesain khusus agar hancur ketika mengenai suatu objek tembak, hal tersebut dikarenakan peluru ini memiliki sifat *brittle*, sehingga hadirnya peluru ini diharapkan dapat menghindari terjadinya efek *ricochet*.

Penelitian *frangible bullet* di Indonesia saat ini dilakukan oleh *workshop frangible bullet* dibawah pengawasan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. Peluru diproduksi menggunakan bahan campuran serbuk Tembaga dan Timah (Cu-10%Sn wt) yang diklaim lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan timbal (Pb). *Frangible bullet* diproduksi menggunakan proses metalurgi serbuk yang terdiri dari rangkaian produksi berupa *mixing*, *compacting*, dan *sintering*. Riset *frangible bullet* masih dilakukan secara eksperimental dengan *metode trial and error*. Riset dengan metode tersebut dapat dikategorikan kurang efisien karena membutuhkan banyak bahan dan sumber daya untuk mencapai hasil yang akurat, ditambah dengan ketersediaan alat yang belum memadai dan belum memenuhi

standar dapat mengakibatkan hasil yang tidak akurat, karena perlakuan yang diberikan pada tiap percobaan memiliki kemungkinan inkonsisten.

Kondisi terkini mengenai riset *frangible bullet*, produk peluru memiliki suatu kecacatan, yakni peluru sudah mulai hancur saat akan dimasukkan ke dalam selongsong peluru. Dalam upaya mengatasi kecacatan tersebut, perlu dilakukan investigasi pada tiap – tiap rangkaian proses produksi. Khususnya pada proses kompaksi serbuk, karena proses ini merupakan proses yang vital, salah satu kekurangan dari proses kompaksi adalah heterogenitas distribusi *green density* (densitas produk hasil kompaksi). Ketika produk memiliki tingkat heterogenitas yang tinggi, maka dapat mengakibatkan retakan hingga distorsi pada proses setelahnya.

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan permodelan dan simulasi dari proses kompaksi serbuk agar didapat hasil berupa persebaran densitas dari *green compact*. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan pedoman dalam pengembangan produk *frangible bullet* khususnya dalam proses kompaksi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan rumusan masalah sebagai berikut, yaitu:

- A. Bagaimana pengaruh tekanan kompaksi terhadap *bulk density*?
- B. Bagaimana distribusi *bulk density* pada *green compact*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut, yaitu:

- A. Mengetahui dan menganalisis pengaruh variasi tekanan kompaksi terhadap *bulk density*
- B. Mengetahui dan menganalisis distribusi *bulk density* pada *green compact*

#### 1.4 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang tidak menyimpang dari rumusan masalah dan sesuai dengan tujuan penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- A. Ukuran dan geometri partikel serbuk dianggap homogen, baik untuk material tembaga (Cu) maupun timah (Sn)
- B. Distribusi partikel dianggap homogen
- C. Variasi geometri: *flat nose* dan *full round*
- D. Variasi tekanan: 500 psi, 700 psi, dan 900 psi
- E. Menggunakan sistem *single die action compaction* dan proses kompaksi pada temperatur ruang
- F. Fase yang diteliti pada akhir proses kompaksi

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

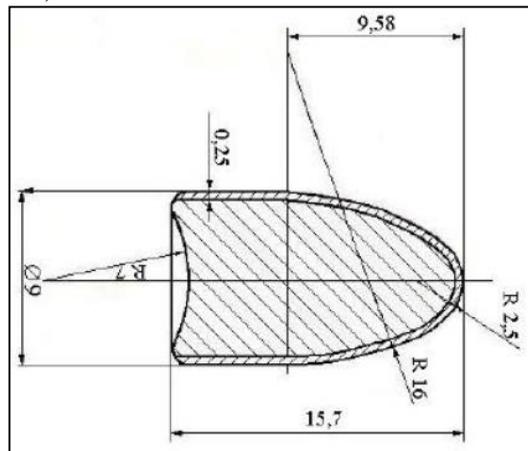
- A. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis secara numerikal dan gambaran hasil *compacting powder*. Sehingga hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam melakukan pengembangan maupun penyempurnaan pada proses produksi *frangible bullet* khususnya pada proses kompaksi.
- B. Meningkatkan kemampuan mahasiswa menggunakan *software* yang berkaitan dengan bidang dan metode yang digeluti

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKSA

### 2.1 Balistika

Balistika adalah ilmu yang mempelajari tentang proyektil dan peluru, yang terbagi dalam balistika dalam, balistika luar dan balistika akhir. Bagian peluru atau amunisi termasuk dalam ketiga pembagian balistika diatas. Ketika peluru berada dalam senjata dan siap ditembakkan sampai sesaat setelah keluar dari ujung pistol, dikategorikan sebagai balistika dalam. Kondisi peluru yang berada di udara saat ditembakkan sampai sesaat sebelum menyentuh permukaan target disebut balistika luar. Dan keadaan peluru setelah mengenai target, mencakup deformasi dan hamburan peluru disebut dengan balistika akhir. Peluru tersusun atas beberapa bagian, diantaranya adalah *propellant* (bubuk mesiu), *cartridge case* (selongsong), *primer* (pemantik), dan *projectile* (proyektil). Tumbukan antara pelatuk senapan dengan bagian *primer* peluru akan menghasilkan percikan api yang kemudian membakar bagian serbuk mesiu sehingga menghasilkan ledakan. Ledakan inilah yang kemudian akan meluncurkan proyektil (Benini, 2000).



**Gambar 2.1** Anatomi proyektil (Benini, 2001)

## 2.2 *Frangible bullet*

*Frangible bullet* merupakan salah satu jenis proyektil yang memiliki karakteristik unik, proyektil ini akan hancur menjadi serpihan ketika menumbuk suatu objek yang keras. *Frangible bullet* di desain sedemikian rupa untuk menghindari kemungkinan terjadinya efek *ricochet* yang dapat berbahaya bagi lingkungan sekitar objek tembak bahkan bagi penembak itu sendiri (Mullins, 2001).

*Frangible bullet* memiliki kemampuan penetrasi yang terbatas serta memiliki kemungkinan pemantulan saat mengenai target keras sangat kecil, hal tersebut terjadi karena peluru yang hancur ketika mengenai target, sehingga peluru dengan cepat kehilangan energi kinetik dalam jumlah besar (Banovic, 2006). *Frangibility factor* atau tingkat mudah pecah dari suatu *frangible bullet* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain yaitu desain dan bentuk proyektil, sifat mekanik dari bahan penyusun proyektil, teknologi dan spesifikasi yang digunakan dalam produksi, dan kondisi impak dari proyektil ketika mengenai objek. Gambaran dari *frangible bullet* saat masih utuh dan hancur dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2.2** *Frangible bullet* Cu-Sn10% wt (Rydlo, 2010)

Densitas *frangible bullet* pada umumnya memiliki nilai dalam kisaran 1,75 – 8,25 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan densitas yang sesuai

dengan karakteristik uji tembak memiliki nilai densitas dalam kisaran 7,1 – 8,5 g/cm<sup>3</sup> (Hansen, 2006). Karakteristik lain yang harus dimiliki oleh *frangible bullet* adalah harus memiliki kekuatan tekan pada kisaran 31 – 310 MPa, dengan nilai kekerasan permukaan pada tingkat 54 – 119 HV (Kruachaturrat, 2009).

**Tabel 2. 1** Karakteristik *Frangible Bullet* (Rydlo, 2010)

| Karakteristik                              | Simbol              | Satuan             | Sinterfire | SR      |
|--|---------------------|--------------------|------------|---------|
| Kaliber                                    | $d$                 | m                  | 0.009      | 0.009   |
| Panjang peluru                             | $l_s$               | m                  | 0.0161     | 0.01435 |
| Massa peluru                               | $m_s$               | kg                 | 0.00648    | 0.0055  |
| Densitas peluru                            | $\rho_s$            | kg.m <sup>-3</sup> | 7443       | 6763    |
| Modulus elastisitas saat penekanan         | $K_s$               | MPa                | 10597      | 3999    |
| Tekanan relatif maksimal peluru            | $\epsilon_{xx,lim}$ | -                  | 0.01172    | 0.01255 |
| Batas kecepatan peluru                     | $v_{lim,s}$         | m.s <sup>-1</sup>  | 69.4       | 32.9    |
| Batas energi kinetik peluru                | $E_{ks,lim}$        | J                  | 15.6       | 2.9     |
| Energi kinetik peluru jarak 2 m dari laras | $E_{k2}$            | J                  | 470.3      | 366.4   |
| <i>Frangibility factor</i> peluru          | $FF$                | -                  | 30.1       | 126.3   |

### 2.3 Komposit Cu-Sn10%

Komposit adalah material yang tersusun atas campuran dua atau lebih material dengan sifat kimia dan fisika yang berbeda, dimana material baru tersebut menghasilkan sifat yang berbeda dengan material penyusunnya. Komposit terdiri dari *bulk of material* sebagai matriks dan *minor component* sebagai penguat. Komposit dibuat untuk mendapatkan material yang memiliki sifat lebih baik daripada bahan penyusunnya, jika ditinjau dari kekuatan dan ketangguhan (Ikasari,2017). Matriks adalah material pengikat yang memiliki fungsi sebagai media transfer beban ke penguat,

menahan persebaran retakan, dan melindungi penguat dari lingkungan di luar komposit, sedangkan penguat berfungsi memberikan kontribusi kekuatan pada material tersebut.

*Frangible bullet* yang dikembangkan oleh Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS dibuat menggunakan komposisi campuran 90% serbuk tembaga (Cu) dan 10% serbuk timah (Sn). Penggunaan campuran kedua bahan tersebut untuk menggantikan bahan timbal (Pb) merupakan langkah baik dalam perkembangan bidang persenjataan, karena peluru yang menggunakan bahan timbal dapat mengakibatkan polusi lingkungan yang berdampak buruk bagi kesehatan, dan juga memiliki resiko terjadinya efek *ricochet* yang besar ketika menumbuk objek keras. Bahan tembaga (Cu) dipilih sebagai bahan utama dalam produksi *frangible bullet* karena bahan tembaga tidak beracun dan bersifat lunak, sedangkan penambahan bahan timah (Sn) digunakan untuk menambah kekuatan dari matriks tembaga sehingga dapat mempengaruhi modulus elastisitas dari komposit, kelebihan lain dari penambahan bahan timah (Sn) pada komposit karena memiliki nilai titik lebur yang rendah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pengikat.

**Tabel 2. 2** Tabel Properti Material Tembaga (Copper Development Association Inc.)

| No. | Properti material    | Nilai | Satuan            |
|-----|----------------------|-------|-------------------|
| 1.  | Densitas             | 1500  | Kg/m <sup>3</sup> |
| 2.  | <i>Modulus young</i> | 117   | MPa               |
| 3.  | <i>Poisson ratio</i> | 0.36  | -                 |

**Tabel 2. 3** Tabel Properti Material Timah (80 Pometon, American Elements)

| No. | Properti material    | Nilai | Satuan            |
|-----|----------------------|-------|-------------------|
| 1.  | Densitas             | 3500  | Kg/m <sup>3</sup> |
| 2.  | <i>Modulus young</i> | 50    | GPa               |
| 3.  | <i>Poisson ratio</i> | 0.36  | -                 |

## 2.4 Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan studi tentang rangkaian pengolahan partikel kering logam paduan atau keramik dengan diameter dibawah 150 mikrometer, termasuk memperelajari tahapan fabrikasi, karakterisasi, dan konversi serbuk logam menjadi sebuah komponen (Thummler, 1993).

Dalam proses produksi *frangible bullet*, Teknik metalurgi serbuk digunakan untuk menghasilkan matriks komposit yang memiliki karakteristik mendekati timbal. Sifat dari bahan non timbal mudah dikendalikan, dapat direkayasa sedemikian rupa.

Keuntungan dari proses manufaktur dengan teknik metalurgi serbuk antara lain:

1. memiliki *rate of production* yang tinggi
2. dapat mengakomodasi produk dengan desain yang rumit
3. proses produksi yang relatif bersih dan tidak menimbulkan polusi
4. *lifetime* dari komponen yang relatif tinggi
5. dapat menggunakan campuran metal dan non – metal
6. produk yang dihasilkan cenderung bebas dari kecacatan seperti rongga, lubang, dan cacat lain (untuk desain yang tidak begitu rumit).
7. Tidak ada material bahan yang terbuang

Namun proses metalurgi serbuk juga memiliki kekurangan, antara lain:

1. Harga material bubuk relatif lebih mahal
2. Harga alat dan komponen mesin yang lebih mahal, dikategorikan sebagai *unprofitable manufacture process* jika hanya digunakan dalam skala kecil
3. Kemungkinan cacat berupa fraktur untuk produk dengan desain rumit
4. Produk yang dihasilkan memiliki nilai plastisitas yang rendah

(Thummler, 1993)

Secara garis besar proses metalurgi serbuk terdiri dari tiga proses utama yaitu *mixing*, *compacting*, dan *sintering*.

### 2.4.1 Mixing

*Mixing* adalah proses pencampuran material, dalam hal ini adalah material serbuk. Bertujuan untuk mendapatkan campuran dengan tingkat homogenitas yang tinggi. Dalam proses *mixing* juga dikenal istilah proses pencampuran kering dan juga proses pencampuran basah, kedua proses ini dibedakan berdasarkan sifat kimia material yang digunakan. Proses pencampuran kering digunakan untuk mencampur material yang tidak mudah teroksidasi, sedangkan proses pencampuran basah dilakukan khusus untuk logam-logam yang mudah teroksidasi, sehingga perlu ditambahkan pelarut polar. Dalam proses ini, bahan serbuk tembaga merupakan logam yang mudah teroksidasi, sehingga perlu ditambahkan pelarut polar berupa etanol. sehingga komposisi yang digunakan adalah 90% tembaga, 10% timah, dan 0,5% *zinc stearate*, serta etanol dengan rasio penggunaan adalah 10 ml setiap 10 butir proyektil *frangible bullet*.

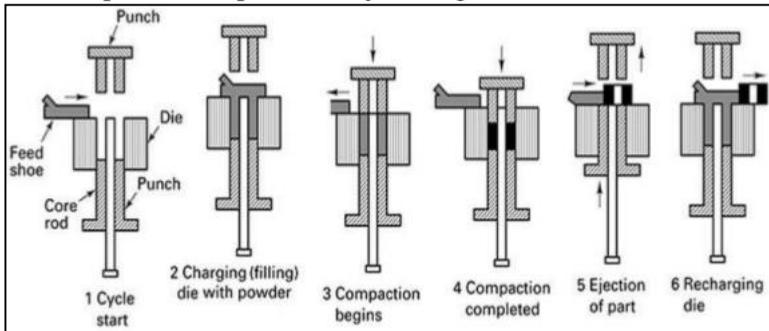


**Gambar 2.3** Ilustrasi mesin *mixing* serbuk (Van Der Wel, 1999)

### 2.4.2 Kompaksi

Kompaksi adalah proses pemadatan material, dalam konteks ini material tersebut berupa serbuk yang diletakkan dalam sebuah cetakan, kemudian diberi tekanan tertentu, sehingga dihasilkan

produk dengan dimensi dan bentuk yang sesuai dengan kebutuhan. Ilustrasi proses kompaksi ditunjukkan gambar berikut



**Gambar 2.4** Ilustrasi proses kompaksi serbuk logam (Degarmo, 1988)

Siklus kompaksi diawali dengan tahap persiapan, dimana setiap bagian berada pada posisi masing – masing dengan kondisi *die* masih belum terisi oleh serbuk. Proses dimulai dengan pengisian *die* oleh serbuk, setelah *die* terisi oleh serbuk logam, maka *punch* (penekan) akan mulai menekan serbuk, jika proses kompaksi telah sesuai dengan kondisi yang diatur (jarak perpindahan *punch* dan *dwelling time* telah terpenuhi) maka *punch* akan berhenti menekan dan akan kembali pada posisi semula, diikuti oleh gerakan *ejection punch* untuk mengeluarkan hasil kompaksi, siklus proses kompaksi akan kembali pada kondisi semula.

Kualitas hasil kompaksi bergantung pada proses densifikasi yang terjadi, dimana persebaran densitas lokal yang menjadi faktor utama. Kekuatan dan properti material lainnya meningkat seiring dengan meningkatnya densitas, maka dari itu sangat penting untuk dapat membuat produk yang memiliki persebaran densitas yang tinggi dan seragam. Jika terdapat perbedaan densitas yang mencolok pada *green compact*, maka lokal yang memiliki nilai densitas rendah akan menjadi titik lemah dan akan mengurangi kualitas *green compact* (German, 2005).

Ketika tekanan diberikan, partikel - partikel akan mengalami *rearrangement* menjadi konfigurasi yang lebih padat, yang

mengakibatkan celah antar partikel akan semakin kecil, sehingga nilai densitas akan meningkat dan nilai porositas akan menurun. Ketika terus ditekan, partikel akan mengalami deformasi elastis, sehingga rongga antar partikel akan terisi, seiring dengan meningkatnya tekanan yang diberikan, maka partikel akan mengalami deformasi plastis secara homogen mulai dari permukaan partikel yang kemudian akan menyebar ke seluruh bagian partikel secara homogen. Tujuan dari pemberian tekanan hingga partikel mengalami deformasi plastis adalah agar saat tekanan dihilangkan, produk tidak kembali ke bentuk semula. Tahap selanjutnya adalah hingga partikel mengalami hancur menjadi kepingan yang lebih halus, hal ini akan menyebabkan peningkatan kekerasan akibat *work hardening*.

Hasil dari proses kompaksi dikenal dengan istilah *green compact*, dimana *green compact* memiliki dua karakteristik utama, yaitu *green strength* dan *green density*. Dimana *green strength* merupakan kekuatan mekanik produk hasil kompaksi, sedangkan *green density* merupakan nilai densitas dari produk kompaksi.

*Green strength* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\text{Green strength} = \frac{3PL}{2wt^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

*Green density* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\delta = \frac{m}{V_b} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

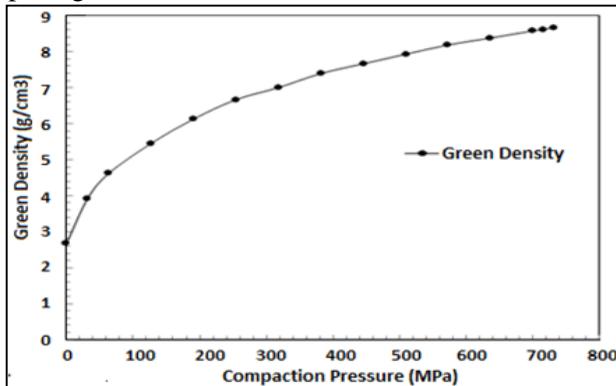
- P = Tekanan
- L = Jarak antar *supporting end*
- w = Lebar spesimen
- t = Tebal spesimen
- m = Massa spesimen
- $V_b$  = Volume setelah kompaksi
- $\delta$  = Densitas hasil kompaksi (*green density*)

Karakteristik *green compact* sangat penting untuk diperhatikan, karena karakteristik inilah yang memiliki

kemampuan untuk mempertahankan geometri sebelum melalui proses *sintering*, kekuatan karakteristik *green compact* dapat ditingkatkan dengan melakukan hal berikut:

1. Meningkatkan kekasaran permukaan partikel, sehingga banyak *site* yang mengalami *interlocking* mekanik
2. Meningkatkan luas permukaan serbuk, dapat dilakukan dengan meningkatkan ketidakberaturan dan pengurangan ukuran partikel
3. Menurunkan densitas *apparent*
4. Menurunkan oksidasi dan kontaminasi permukaan partikel
5. Meningkatkan *green density*
6. Menurunkan jumlah zat aditif/pelumas, karena dapat menghambat terjadinya *interlocking* (Upadyaya, 2002)

Setelah melalui proses kompaksi, diharapkan dapat menghasilkan produk dengan nilai densitas dan kekuatan yang sesuai. Hubungan antara tekanan kompaksi dengan densitas dapat dilihat pada gambar berikut



**Gambar 2.5** Pengaruh tekanan kompaksi terhadap *green density* tembaga (Srivastra, 2018)

dari gambar di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar nilai tekanan pada proses kompaksi maka nilai densitas dari produk yang dihasilkan akan semakin meningkat.

Hubungan antara tekanan kompaksi dan densitas rata – rata hasil proses kompaksi dapat dituliskan dalam persamaan beriku:

$$\ln P = A.V + B \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

- P = Tekanan yang diberikan
- V = Volume relatif ( $V_{\text{sebelum kompaksi}} / V_{\text{hasil kompaksi}}$ )
- A,B = Konstanta

(Balshin, 1938)

Hubungan antara tekanan kompaksi dan porositas dapat diadaptasi menggunakan persamaan hasil studi dari porositas tanah sebagai fungsi dari kedalaman tanah dibawah permukaan. Berdasarkan hubungan tersebut didapatkan persamaan:

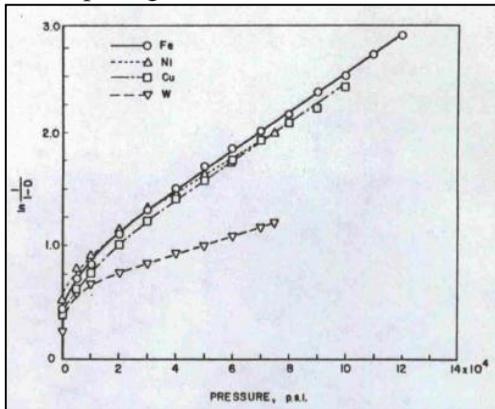
$$P = \frac{1}{k} \left[ \left( \ln \frac{1}{1-D} \right) + B \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

- P = Tekanan yang diberikan
- D = Densitas hasil kompaksi
- K,B = Konstanta

(Heckel, 1961)

Persamaan di atas dapat diterapkan pada berbagai serbuk logam dengan metode produksi yang berbeda, hubungan tersebut dapat ditunjukkan pada gambar berikut



**Gambar 2.6** Hubungan antara tekanan dan *green density* dari serbuk logam (Heckel, 1960)

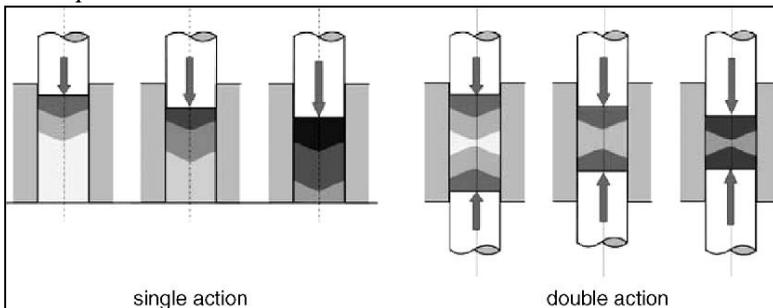
### 2.4.2.1 Macam – Macam Proses Kompaksi

proses kompaksi dapat dikategorikan berdasarkan arah tekan dan temperature kerja.

#### a. Proses Kompaksi Berdasarkan Arah Tekan

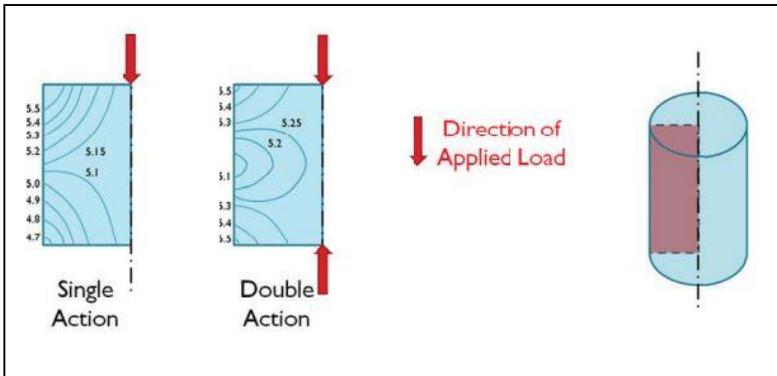
Berdasarkan arah tekan, proses kompaksi dapat dibagi menjadi 2, yaitu:

1. *Single action die compaction*, merupakan proses kompaksi material serbuk yang dilakukan dengan menggunakan 1 penekan (*punch*) yang bergerak dengan 1 arah tekan.
2. *Double action die compaction*, merupakan proses kompaksi material serbuk yang dilakukan dengan menggunakan 2 penekan (*punch*) yang bergerak dari 2 arah tekan berlawanan, dimana *punch* atas menekan ke bawah dan *punch* bawah menekan ke atas



**Gambar 2.7** *Single action die compaction* dan *double action die compaction* (Oberacker, 1993)

*Single action die compaction* menghasilkan perbedaan densitas yang cukup mencolok antara bagian yang mengalami kontak langsung dengan penekan dan bagian pasif, sedangkan untuk *double action die compaction* terlihat lebih homogen dan seolah terbagi secara merata untuk tiap titik lokasi (Selig, 2012).



**Gambar 2.8** Perbandingan persebaran densitas hasil simulasi pada *single action* dan *double action die compaction* (Selig, 2012)

### b. Proses Kompaksi Berdasarkan Temperatur Kerja

Berdasarkan temperature kerja, maka proses kompaksi dapat dibagi menjadi 2, yaitu:

1. *Hot compaction*, pada proses ini baik serbuk maupun die dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu selama proses kompaksi. Kompaksi dengan teknik seperti ini menghasilkan *green strength* yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses tanpa pemanasan. Hal tersebut terjadi karena lubrikan yang diberikan pada proses *mixing* akan berpindah menuju dinding *die* sehingga mengurangi jarak antar partikel, sehingga kontak antar partikel semakin banyak
2. *Cold compaction*, proses pepadatan serbuk logam ini dilakukan pada temperature ruang (25°C). Metode ini baik dilakukan untuk memadatkan serbuk logam dengan sifat mudah teroksidasi.

### c. Proses Kompaksi Berdasarkan Pemberian Lubrikan

Dalam proses kompaksi, penambahan lubrikan harus disesuaikan dengan proses yang digunakan. Fraksi volume dari pelumas merupakan variabel yang harus diperhatikan selama proses kompaksi. Fraksi volume dapat dikategorikan berdasarkan

volume rongga antar partikel serbuk yang terisi oleh lubrikan atau yang disebut juga *degree of pore saturation* (DPS). Dalam kategori tersebut DPS terbagi menjadi 3 yakni *saturated* dengan kondisi DPS lebih dari 1, *funicular* dengan nilai DPS antara 0,3 hingga 1, dan *pendular* untuk DPS 0,3 ke bawah.

Pada proses kompaksi material serbuk akan digunakan proses dengan DPS sekitar 0,3 atau dengan kata lain menggunakan lubrikan dalam jumlah yang sedikit.

Penambahan lubrikan atau pelumas pada proses kompaksi berfungsi untuk mengurangi gesekan internal (gesekan antar partikel) dan gesekan eksternal (gesekan antara partikel dengan *die wall*), selain itu penambahan lubrikan juga dapat membuat hasil kompaksi memiliki persebaran densitas yang lebih merata, dan juga membuat proses pengeluaran produk kompaksi membutuhkan daya yang kecil (Selig, 2012). Terdapat karakter yang harus dimiliki lubrikan adalah tidak boleh mudah bereaksi dengan serbuk yang dikompaksi dan juga memiliki nilai titik didih yang rendah, sehingga saat proses *sintering*, lubrikan akan menguap.

Proses penambahan lubrikan pada umumnya dapat dilakukan dengan dua metode berbeda, yaitu penambahan lubrikan pada proses pencampuran serbuk atau disebut sebagai *internal lubricant compacting* dan penambahan lubrikan pada *die wall* yang disebut sebagai *die wall lubricant compacting*. Beberapa senyawa yang umum digunakan sebagai lubrikan antara lain adalah Zinc Streate, Amide Wax, Kenolube, dan Metallube (Larsson, 2013).

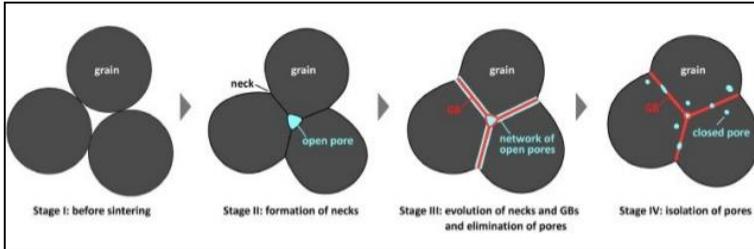
**Tabel 2.4** Ukuran Partikel Lubrikan

| Aspek           | Zinc Streate    | Amide Wax       | Kenolube         | Metallube        |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Ukuran Partikel | 4 $\mu\text{m}$ | 7 $\mu\text{m}$ | 20 $\mu\text{m}$ | 45 $\mu\text{m}$ |

### 2.4.3 Sintering

*Sintering* adalah proses memanaskan produk hasil kompaksi (*green compact*) hingga mencapai temperatur tertentu. Tujuan utama dari proses *sintering* adalah mengurangi tingkat porositas produk kompaksi, dengan mekanisme meningkatkan temperature

sehingga bentuk partikel akan mengalami perubahan dimana sudut dari partikel yang lancip akan menjadi lebih bulat dan tumpul, yang menjadikan kontak antar partikel semakin besar, sehingga pori – pori dari green compact semakin sedikit dan terisolasi. (Khalil, 2012)



**Gambar 2.9** Fase dari proses *sintering* (Khalil, 2012)

Dalam proses *sintering* terdapat beberapa parameter yang dapat mempengaruhi hasil akhir dari proses ini, antara lain

1. Temperatur *sintering*

Semakin tinggi temperatur *sintering* yang digunakan, maka penyusutan dan pertumbuhan butir akan semakin besar.

2. Ukuran partikel

Semakin kecil ukuran serbuk yang digunakan, maka laju proses *sintering* akan semakin cepat, dan menghasilkan produk dengan level *impuritas* yang baik.

3. Durasi *sintering*

Semakin lama durasi *sintering*, maka dihasilkan produk dengan diameter butir serbuk besar.

4. Green density

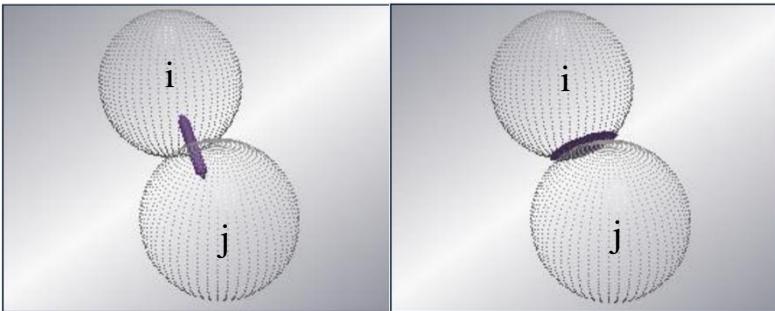
*Green density* yang tinggi membuat penyusutan *sintering* yang rendah, sehingga porositas akan rendah.

5. Tekanan pada proses kompaksi

Semakin tinggi nilai tekanan yang diberikan pada proses kompaksi mengakibatkan banyak terjadi dislokasi butir, sehingga proses *sintering* dapat semakin cepat.

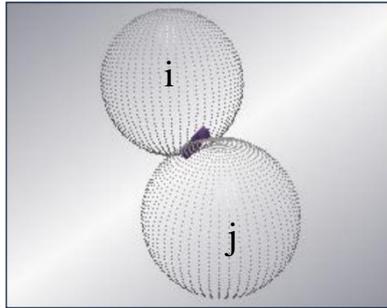
## 2.5 *Overlap*

Dalam *discrete element method*, deformasi yang terjadi ketika terdapat kontak antara partikel terhadap partikel maupun geometri disekitarnya, digambarkan menggunakan *overlap*. *Overlap* sendiri terbagi menjadi dua, yang pertama adalah *normal overlap* yang diakibatkan oleh *normal force*, lalu ada *tangential overlap*, yaitu *overlap* yang diakibatkan oleh *tangential force*. Gambar 2.10 akan menunjukkan fenomena yang terjadi saat dua partikel saling bertumbukan.



**Gambar 2. 10** Tumbukan pada dua partikel (kiri) *Normal force* (kanan) *Normal overlap*

Gambar di atas menunjukkan tumbukan antara partikel *i* dan partikel *j*, terjadi kontak antar keduanya dan menghasilkan *normal force* diantara keduanya, sehingga akan terjadi *normal overlap* yang menggambarkan *normal deformasi* pada partikel. Daerah dalam irisan yang memiliki warna gelap tersebutlah yang dikenal dengan istilah *normal overlap* (EDEM User Guide).



**Gambar 2. 11** *Tangential force* saat partikel bertumbukan

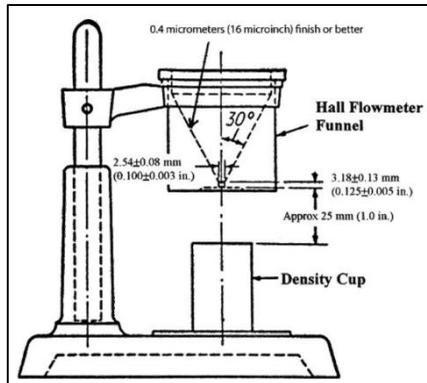
Gambar di atas menunjukkan *tangential force* yang terjadi saat partikel bertumbukan, gaya tersebut menghasilkan *tangential overlap* yang dapat diartikan sebagai perpindahan tangensial titik kontak awal hingga akhir kontak terjadi. Hal ini menggambarkan fenomena partikel ketika mengalami putaran atau slip. *Tangential overlap* menggambarkan deformasi tangensial pada partikel (EDEM User Guide).

## 2.6 Densitas

Densitas merupakan perbandingan massa terhadap volume suatu benda. Dalam hal ini dikenal beberapa istilah yang berkaitan dengan densitas, salah satunya merupakan densitas relatif, dimana densitas relatif merupakan perbandingan densitas padatan ( $\rho_x$ ) terhadap densitas padatan tanpa porositas ( $\rho_s$ ) (Heckel, 1962).

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_x}{\rho_s} \dots \dots \dots (2.5)$$

Istilah lain yang dikenal adalah *apparent density* yaitu perbandingan massa terhadap volume suatu serbuk dalam keadaan longgar (*loose*), tanpa mengalami agitasi (German, 1994). Densitas *apparent* dapat ditentukan menggunakan *flowmeter hall* seperti pada gambar berikut



**Gambar 2.12** Flowmeter hall (Upadyaya, 2002)

## 2.7 Volumetric Strain

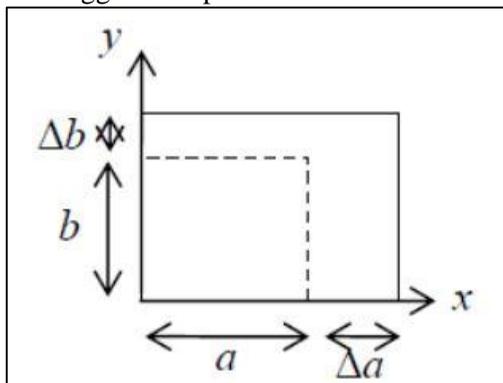
*Volumetric strain* merupakan satuan perubahan volume, yaitu perubahan volume dibagi dengan volume awal (Kelly, 2015).

*Strain invariant*

$$I_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \quad (2.7)$$

$$I_2 = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xy}^2 \quad (2.8)$$

Berdasarkan deformasi material, *volumetric strain* dapat digambarkan menggunakan persamaan berikut



**Gambar 2.13** Deformasi normal elemen material (Kelly, 2013)

$$\begin{aligned}\frac{\Delta V}{V} &= \frac{(a+\Delta a)(b+\Delta b)-ab}{ab} \\ \frac{\Delta V}{V} &= (1 + \varepsilon_{xx}) + (1 + \varepsilon_{yy}) - 1 \\ \frac{\Delta V}{V} &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} \dots\dots\dots (2.9)\end{aligned}$$

Jika nilai regangan kecil, bentuk  $\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}$  akan jauh lebih kecil daripada bentuk lainnya, sehingga *volumetric strain* dapat diberikan sebagai fungsi

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \dots\dots\dots (2.10)$$

Karena perubahan volume merupakan sebuah *invariant*, *strain* normal pada sistem koordinat manapun dapat digunakan dalam melakukan evaluasi. Perubahan volume tidak bergantung pada sumbu tertentu, pada gambar menampilkan grafik perubahan volume pada elemen dua dimensi. Secara khusus, *principal strain* dapat digunakan persamaan

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk peregangan pada arah x dan y, namun hasil persamaan tersebut berlaku untuk deformasi sembarang (Kelly, 2013).

## 2.8 Discrete Element Method oleh EDEM™

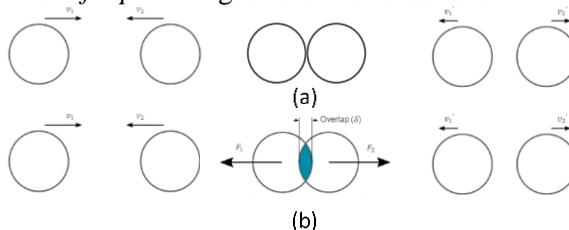
Pendekatan *continuum* merupakan salah satu metode pendekatan yang paling sering digunakan saat ini untuk tujuan simulasi secara numerik dari suatu proses atau fenomena, salah satu yang paling sering digunakan adalah *finite element method*. Pendekatan *continuum* mengasumsikan bahwa suatu zat atau benda akan sepenuhnya mengisi ruang yang ditempati, sehingga mengabaikan perilaku dari tiap partikel diabaikan. Berbeda dengan pendekatan *continuum*, pendekatan diskrit adalah salah satu teknik dalam Analisis numerikal yang digunakan untuk mensimulasikan perilaku dari sebuah populasi partikel (Cundall dan Stark, 1979). Pada Analisis ini setiap partikel di representasikan secara numerik dan diidentifikasi dengan property yang spesifik, baik dari bentuk, ukuran, property material, dan parameter lain, sehingga jika ditinjau secara keseluruhan maka perilaku system yang terbentuk

merupakan hasil dari perilaku dan interaksi antar partikel didalamnya. Metode ini digunakan dalam permodelan objek dengan skala partikel, seperti batu bara, bijih, dan serbuk.

**Tabel 2. 5** Perbedaan Antara Pendekatan Kontinum dan Diskrit

| <i>Continuum</i>   | <i>Discrete</i>   |
|--|---|
| Sistem kontinum  | Sistem diskontinum  |
| Partikel dianggap mengisi penuh setiap ruang dan dianggap sebagai satu kesatuan              | Permodelan untuk setiap elemen partikel                               |
| Hubungan antara stress-strain pada persamaan   | Perilaku keseluruhan sistem ditinjau dari interaksi antar partikel    |
| Untuk keperluan pengamatan dalam skala besar, dimana tidak dibutuhkan perilaku tiap partikel | Untuk keperluan pengamatan fenomena yang terjadi dalam skala partikel |

Terdapat dua metode utama dalam simulasi menggunakan diskrit elemen, yaitu pendekatan *hard-sphere* dan *soft-sphere*. Pada pendekatan *hard-sphere*, interaksi antar partikel diasumsikan sebagai interaksi yang impulsive, sehingga partikel dianggap hanya terjadi pertukaran momentum saat bertabrakan atau mengalami kontak satu sama lain. Sedangkan pada pendekatan *soft-sphere*, fenomena *overlap* tetap diperhitungkan untuk merepresentasikan suatu deformasi selama terjadi kontak. Metode pendekatan *soft-sphere* digunakan dalam EDEM.



**Gambar 2. 14** (a) Pendekatan *hard-sphere* (b) Pendekatan *soft-sphere*

**2.8.1 Persamaan Gerak pada DEM**

Setiap partikel pada dasarnya memiliki enam *degree of freedom* (DOF) dan dapat memiliki dua jenis gerakan yaitu translasi dan rotasi. Hukum kedua Newton digunakan dalam DEM untuk menghitung percepatan translasi dan rotasi, yang nantinya akan terintegrasi dengan *time step* untuk mengetahui nilai kecepatan dan posisi partikel pada satuan waktu tertentu.

Gerakan rotasi dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

$I$  = momen inersia

$M$  = resultan kontak torsi yang bekerja pada partikel

$\omega$  = kecepatan sudut

$t$  = waktu

Gerakan translasi pada partikel dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$m \frac{dv}{dt} = F_s + F_c + F_{nc} \dots\dots\dots (2.13)$$

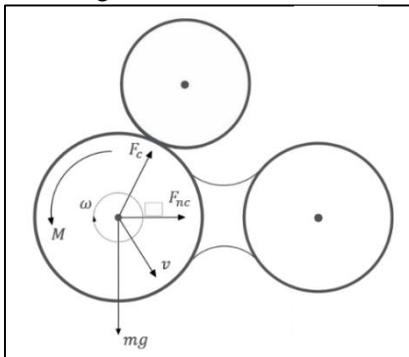
Dimana:

$v$  = kecepatan translasi partikel

$m$  = massa partikel

$F_s$  = resultan gaya gravitasi

$F_c$  dan  $F_{nc}$  = resultan gaya kontak dan non kontak antara partikel dan dinding



**Gambar 2. 15** gaya yang bekerja pada partikel

Percepatan partikel terintegrasi dengan time step untuk memperbarui nilai dari kecepatan partikel dan juga posisi partikel, yang diekspresikan dalam persamaan berikut:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \dots\dots\dots (2.14)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \alpha(t)\Delta t \dots\dots\dots (2.15)$$

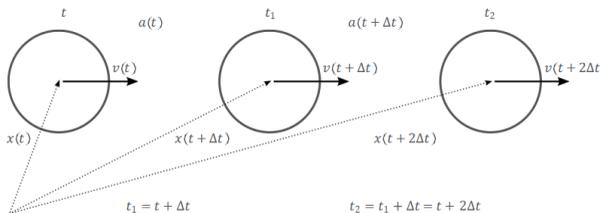
Dimana:

$v(t)$  = kecepatan partikel pada waktu  $t$

$x(t)$  = lokasi partikel pada waktu  $t$

$\alpha(t)$  = percepatan partikel pada waktu  $t$

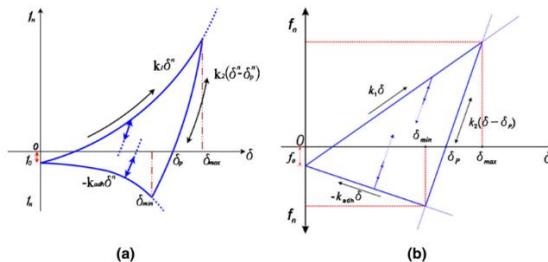
$\Delta t$  = time step



**Gambar 2. 16** ilustrasi perhitungan pergerakan partikel yang menyangkut nilai percepatan, kecepatan, dan posisi

### 2.8.2 Edinburg Elasto – Plastic Adhesive Model

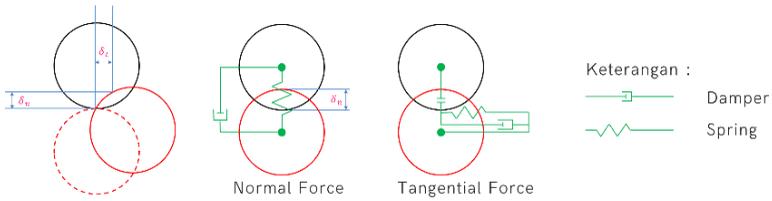
Ketika dua atau lebih partikel diberi tekanan secara bersamaan, maka mereka akan mengalami deformasi dari regime elastis – plastis dengan asumsi terjadi peningkatan kekuatan adhesif seiring peningkatan area plastis.



**Gambar 2. 17** Kurva hubungan antara gaya normal – overlap untuk permodelan (a) non – linear (b) linear

kurva tersebut menjelaskan mengenai permodelan antara normal kontak force terhadap *overlap* yang melibatkan gaya adesif partikel. terdapat dua grafik, perbedaan utama terdapat pada fungsi permodelan dimana yang Gambar 2.15 (a) merujuk pada permodelan non linier sedangkan Gambar 2.15 (b) merupakan permodelan linier. Dalam kurva tersebut sumbu Y sebagai *normal force* yang bekerja pada partikel, sedangkan sumbu X sebagai *overlap* yang terjadi. Terdapat tiga cabang yaitu *loading*, *unloading/reloading*, dan *adhesive* yang mana dipengaruhi oleh lima parameter antara lain *virgin loading stiffness parameter* ( $k_1$ ), *unloading/reloading stiffness parameter* ( $k_2$ ), *adhesive stiffness parameter* ( $k_{adh}$ ), *constant pull – off force* ( $f_0$ ), dan *stiffness exponent* ( $n$ ). dimana parameter – parameter tersebut akan digunakan sesuai dengan proses yang sedang dilakukan. *Virgin loading stiffness parameter* ( $k_1$ ) dapat diartikan sebagai parameter untuk proses pembebanan mula, digunakan pada saat proses pemberian beban pada partikel. Lalu *unloading/reloading stiffness parameter* ( $k_2$ ) yang sesuai namanya merupakan parameter yang digunakan saat proses *unloading* beban ataupun pemberian beban ulang. Yang terakhir ada *adhesive stiffness parameter* ( $k_{adh}$ ) yang digunakan untuk menentukan besarnya *overlap* yang terjadi karena energi adhesif. lalu ada *pull off force* ( $f_0$ ), yaitu gaya yang terjadi antar partikel sebelum diberi gaya eksternal (dalam hal ini salah satu contoh *pull off force* adalah *Van Der Waal Force*, yaitu gaya tarik menarik antar partikel dikarenakan muatan elektron dan proton). Sedangkan *stiffness exponent* digunakan untuk menentukan permodelan kurva, dengan nilai  $n = 1$  untuk kurva linear, dan  $n > 1$  untuk non linear.

Pada permodelan ini, terdapat dua gaya kontak yang mempengaruhi partikel, yaitu gaya kontak dan gaya non kontak. Untuk gaya kontak terjadi karena adanya gaya normal dan tangensial partikel, sedangkan gaya non kontak terjadi karena ada dua partikel berdekatan dan memiliki gaya Tarik – menarik.



**Gambar 2. 18** Gaya kontak yang terjadi pada partikel

Untuk menentukan gaya normal yang terjadi pada partikel, digunakan persamaan berikut:

$$F_n = (F_{hys} + F_{nd}) \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

- $F_n$  = Gaya normal
- $F_{hys}$  = *Hysterestic spring force*
- $F_{nd}$  = *Normal damping force*

Untuk menentukan nilai  $F_{hys}$ , harus memperhatikan syarat berikut

$$F_{hys} \begin{cases} \rightarrow F_o + k_1 \delta^n & \text{jika } k_2(\delta^n - \delta_p^n) \geq k_1 \delta^n \\ \rightarrow F_o + k_2(\delta^n - \delta_p^n) & \text{jika } k_1 \delta^n > k_2(\delta^n - \delta_p^n) > k_{adh} \delta^n \\ \rightarrow F_o - k_{adh} \delta^n & \text{jika } k_{adh} \delta^n \geq k_2(\delta^n - \delta_p^n) \end{cases}$$

*Normal damping force* ( $F_{nd}$ ), didapatkan menggunakan persamaan berikut

$$F_{nd} = \beta_n V_n \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

- $F_{nd}$  = *Normal damping force*
- $\beta_n$  = *Normal dashpot coefficient*
- $V_n$  = *Magnitude of relative velocity*

Untuk mengetahui *Normal dashpot coefficient* digambarkan dalam persamaan berikut

$$\beta_n = \sqrt{\frac{4m^*k_1}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana:

$m^*$  = *Equivalent mass of particle*  
 $e$  = koefisien restitusi  

$$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana:

- $m_1$  = Massa partikel 1
- $m_2$  = Massa partikel 2

Untuk menentukan gaya tangensial yang terjadi pada partikel, digunakan persamaan berikut:

$$F_t = (F_{ts} + F_{td}) \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

- $F_t$  = Gaya tangensial
- $F_{ts}$  = *Tangential spring force*
- $F_{td}$  = *Tangential damping force*

*Tangential spring force* diekspresikan dalam persamaan berikut

$$F_{ts} = F_{ts(n-1)} + \Delta F_{ts} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana:

- $F_{ts}$  = Gaya tangensial
- $F_{ts(n-1)}$  = *Tangential spring force at previous timestep*
- $\Delta F_{ts}$  = *Increment of tangential force*

Untuk mendapatkan nilai *Increment of tangential force*, menggunakan persamaan:

$$\Delta F_{ts} = -k_t \delta_t \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

- $k_t$  = *Tangential stiffness parameter*
- $\delta_t$  = *Increment of tangential overlap*

Untuk mendapatkan *tangential damping force* ( $F_{td}$ ), dapat menggunakan persamaan berikut

$$F_{td} = -\beta_t V_t \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana:

- $F_{td}$  = *Tangential damping force*
- $\beta_t$  = *Tangential dashpot coefficient*
- $V_t$  = *Magnitude of relative velocity*

Untuk mengetahui *tangential dashpot coefficient* digambarkan dalam persamaan berikut

$$\beta_t = \sqrt{\frac{4m^*k_t}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana:

- $m^*$  = *Equivalent mass of particle*
- $e$  = koefisien restitusi

### 2.8.3 Rayleigh Time Step

Pemilihan *time step* ( $\Delta t$ ) sangat penting dalam simulasi metode elemen diskrit. Nilai *time step* harus dipilih dengan nilai sekecil mungkin. Pemilihan nilai *time step* yang kecil mencegah terjadinya tumpang tindih (*overlaps*) yang berlebihan yang mana dapat mengakibatkan hasil yang tidak realistis dan juga menghindari terjadinya efek gelombang Rayleigh. Nilai *time step* yang wajar digunakan dalam simulasi elemen diskrit berada pada rentang  $1 \times 10^{-4}$  hingga  $1 \times 10^{-6}$  s.

Pergerakan partikel dalam sebuah aliran sekumpulan partikel tidak hanya dipengaruhi oleh kontak dengan partikel yang berdekatan, namun juga dipengaruhi oleh gangguan dari partikel yang berjauhan. Dengan memilih *time step* yang kecil, maka gangguan yang disebabkan oleh sebuah partikel akan berdampak lebih kecil terhadap partikel lain di sekitarnya.

*Time step* yang paling cocok digunakan (Rayleigh timestep) dapat diperkirakan berdasarkan kecepatan gelombang permukaan Rayleigh, yang digunakan untuk memastikan perpindahan gaya yang realistis dan mencegah ketidakstabilan numerik.

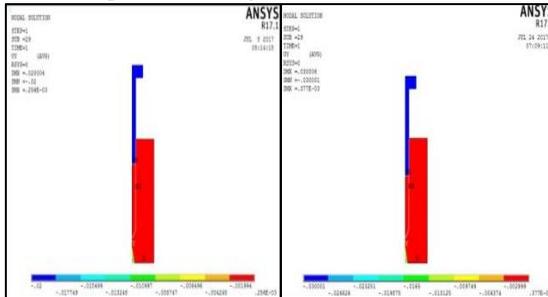
$$T_R = \frac{\pi R \left(\frac{\rho}{G}\right)^{\frac{1}{2}}}{0.1631\nu + 0.8766} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana:

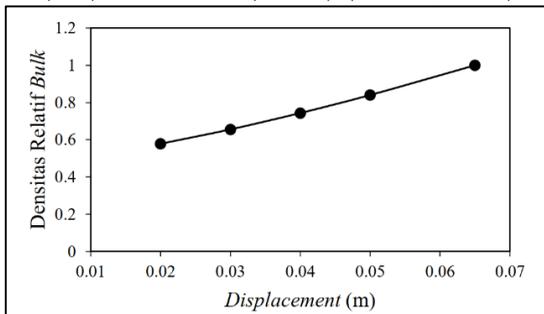
- $T_R$  = Rayleigh *time step*
- $R$  = jari – jari partikel
- $\rho$  = densitas
- $G$  = *shear modulus*
- $\nu$  = poisson rasio

## 2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian pertama dilakukan oleh Deshinta Ikasari pada 2017 dengan judul Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan terhadap Distribusi *Green Density* pada Kompaksi Serbuk Cu - 10%wtSn dengan Metode Elemen Hingga. Peneliti melakukan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS MECHANICAL APDL untuk melihat bagaimana pengaruh tekanan terhadap *displacement punch* dan juga *relative green density*. Dalam penelitian ini didapati dua kesimpulan, yang pertama yaitu semakin besar tekanan yang diberikan pada *punch*, maka *displacement punch* juga semakin besar. Kesimpulan kedua yaitu semakin besar tekanan yang diberikan, maka semakin besar pula nilai *relative green density*.

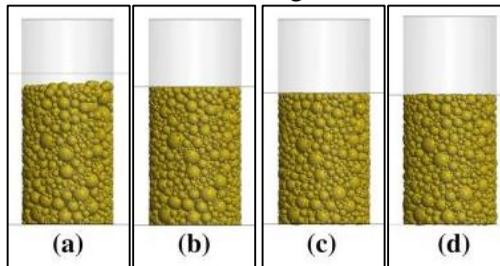


**Gambar 2.19** Visualisasi *displacement punch* sebesar 0.02 m (kiri) dan 0.03 m (kanan) (Ikasari, 2017)

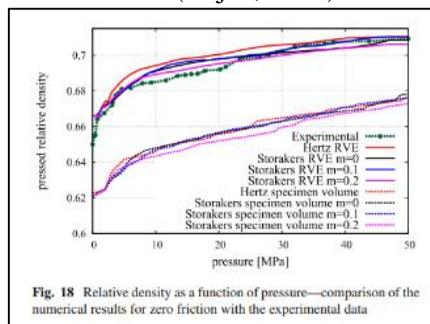


**Gambar 2. 20** Hubungan *displacement* terhadap densitas relatif *bulk* (Ikasari, 2017)

Penelitian kedua dilakukan oleh Jerzy Rojek, dkk. Pada tahun 2015 dengan judul *Discrete Element Simulation of Powder Compaction in Cold Uniaxial Pressing with Low Pressure*. Penelitian ini melakukan simulasi numerik untuk proses kompaksi serbuk NiAl. Penelitian ini menggunakan *discrete element method* untuk menganalisis perilaku serbuk NiAl selama proses kompaksi, dimana variable yang digunakan adalah besar tekanan yang diberikan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah metode elemen diskrit sesuai untuk mensimulasikan proses kompaksi serbuk dan menunjukkan grafik hubungan antara tekanan dengan densitas relatif, dimana semakin besar tekanan yang diberikan, maka densitas relatif akan semakin meningkat.



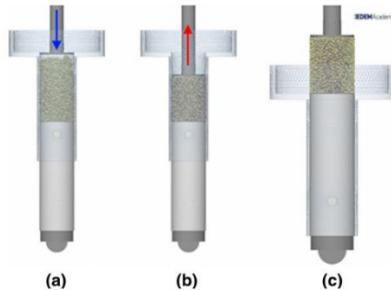
**Gambar 2. 21** Hasil simulasi proses kompaksi menggunakan permodelan Hertz pada (a) 0 MPa (b) 2 MPa (c) 25 MPa (d) 50 MPa (Rojek, 2016)



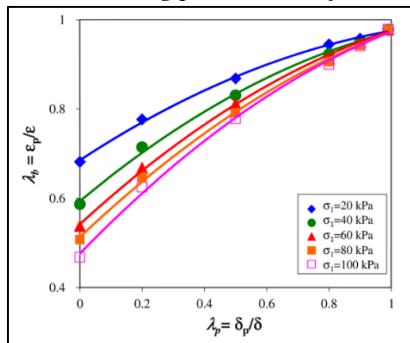
**Fig. 18** Relative density as a function of pressure—comparison of the numerical results for zero friction with the experimental data

**Gambar 2. 22** hubungan antara densitas relative dengan tekanan (Rojek, 2016)

Penelitian ketiga dilakukan oleh Subhash C. Thakur, dkk. Pada tahun 2014 dengan judul *Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model*. Penelitian ini melakukan simulasi pada proses kompaksi serbuk yang meliputi fase *loading*, *unloading*, dan juga *ejection*. Penelitian ini pula yang mendasari permodelan partikel *Elasto-Plastic Adhesion Model* pada software EDEM 2020. Dimana penelitian ini menyorot bahwa pada proses kompaksi partikel akan terjadi deformasi partikel dari regime elastis hingga plastis yang diiringi oleh peningkatan kekuatan adhesive seiring peningkatan luas area kontak plastis.



**Gambar 2. 23** Hasil permodelan proses kompaksi (a) *loading process* (b) *unloading process* (c) *ejection process*

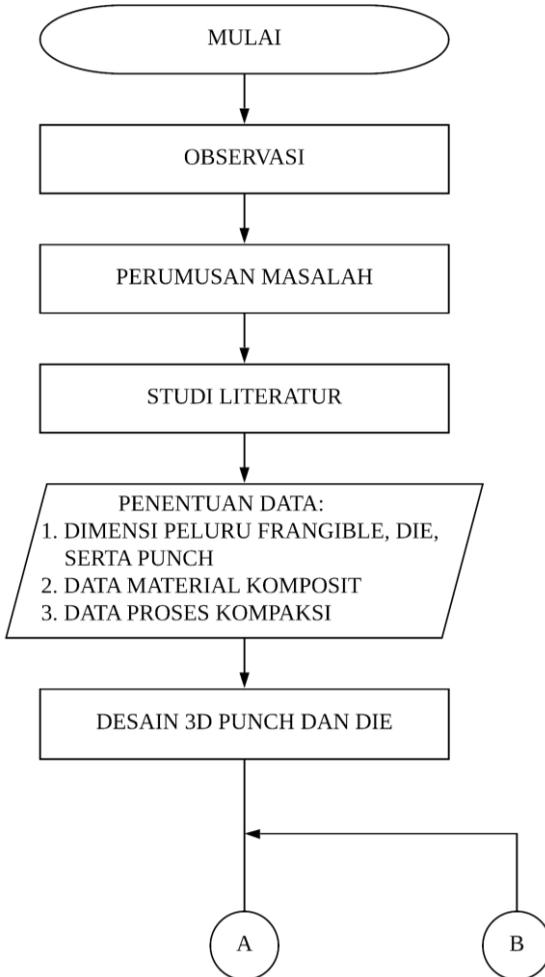


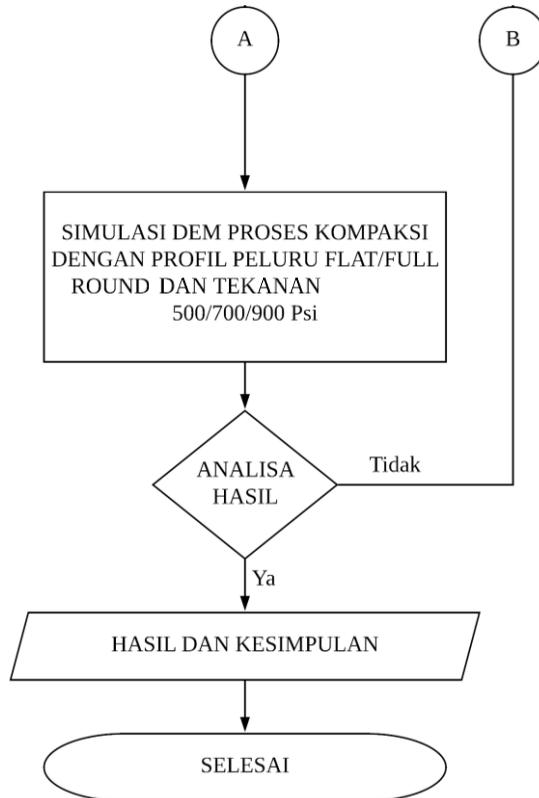
**Gambar 2. 24** Hubungan antara bulk plasticity dengan particle plasticity

# BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Metodologi

### 3.1.1 Diagram Alir Penelitian





**Gambar 3. 1** Diagram alir penelitian

## 3.2 Spesifikasi Material

### 3.2.1 Material Serbuk

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah serbuk Cu-Sn10% wt, yang berarti dalam suatu komposisi tertentu terdapat 90% partikel tembaga dan 10% partikel timah. Properti material serbuk tembaga dan timah yang digunakan ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 3. 1** Tabel properti material Cu

| <b>Sifat</b>            | <b>Satuan</b>   | <b>Nilai</b>       |
|-------------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Particle Radius</i>  | mm              | $1 \times 10^{-3}$ |
| <i>Apparent Density</i> | $\text{Kg/m}^3$ | 1500               |
| <i>Modulus Young</i>    | Pa              | $117 \times 10^6$  |
| <i>Poisson Ratio</i>    | -               | 0.36               |

**Tabel 3. 2** Tabel properti material Sn

| <b>Sifat</b>           | <b>Satuan</b> | <b>Nilai</b>       |
|------------------------|---------------|--------------------|
| <i>Particle Radius</i> | mm            | $1 \times 10^{-3}$ |
| <i>Modulus Young</i>   | Pa            | $50 \times 10^9$   |
| <i>Poisson Ratio</i>   | -             | 0.36               |

### 3.2.2 Material Cetakan dan Punch

Material cetakan (*die*) dan *punch* yang digunakan adalah baja ST60. Berikut merupakan sifat fisik dari baja ST60 ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 3. 3** Tabel properti material ST60 (Ikasari, 2017)

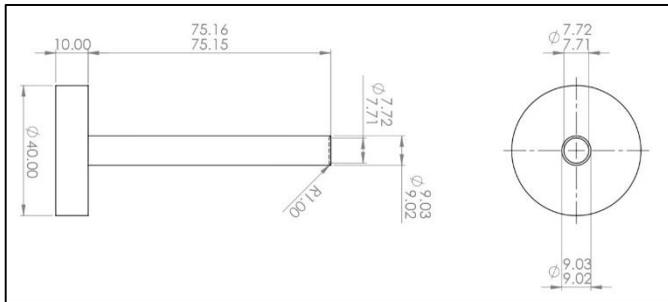
| <b>Sifat</b>        | <b>Satuan</b>   | <b>Nilai</b>      |
|---------------------|-----------------|-------------------|
| Densitas            | $\text{Kg/m}^3$ | 7870              |
| Modulus Elastisitas | Pa              | $200 \times 10^9$ |
| Poisson Ratio       | -               | 0.3               |

## 3.3 Spesifikasi Geometri

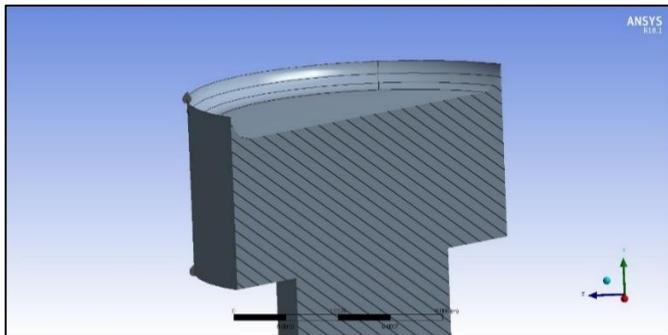
### 3.3.1 Geometri Cetakan

Cetakan digunakan untuk membentuk serbuk sehingga menjadi padatan dengan desain yang telah ditentukan. Berikut dimensi serta gambar geometri dari cetakan yang digunakan





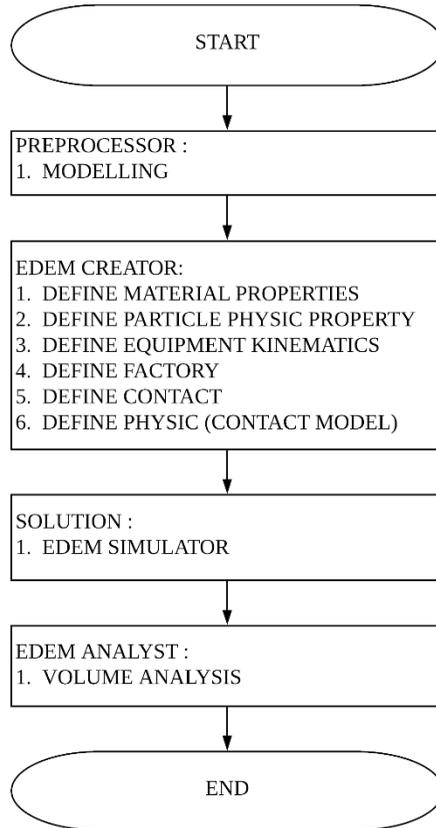
**Gambar 3. 4** Geometri pendorong (*punch*)



**Gambar 3. 5** Geometri 3D pendorong (*punch*)

### 3.4 Permodelan dengan EDEM

#### 3.4.1 Diagram Alir Simulasi



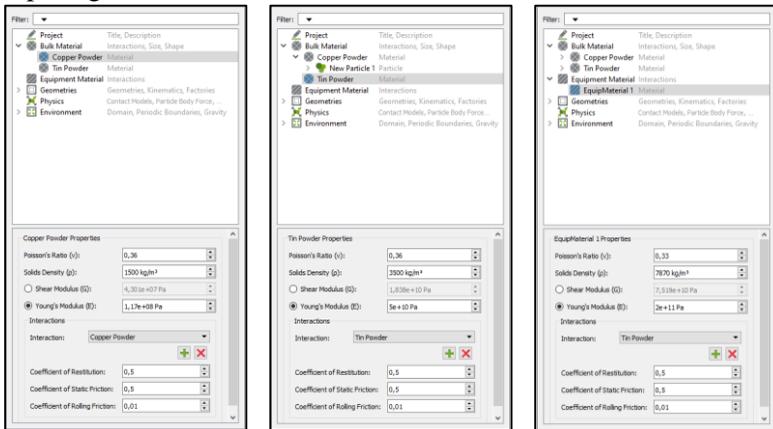
**Gambar 3. 6** Diagram alir simulasi

#### 3.4.2 Modelling

Proses perancangan geometri menggunakan software SOLIDWORK 2019. Geometri yang digunakan mengacu pada geometri yang telah dipatenkan oleh tim *frangible bullet* Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS dengan dilakukan sedikit penyederhanaan pada bagian *punch* dan cetakan (*die*). Dalam proses ini dibuat *assembly* dari ketiga macam *punch* dan *die* sesuai geometri peluru.

### 3.4.3 Define Material Property

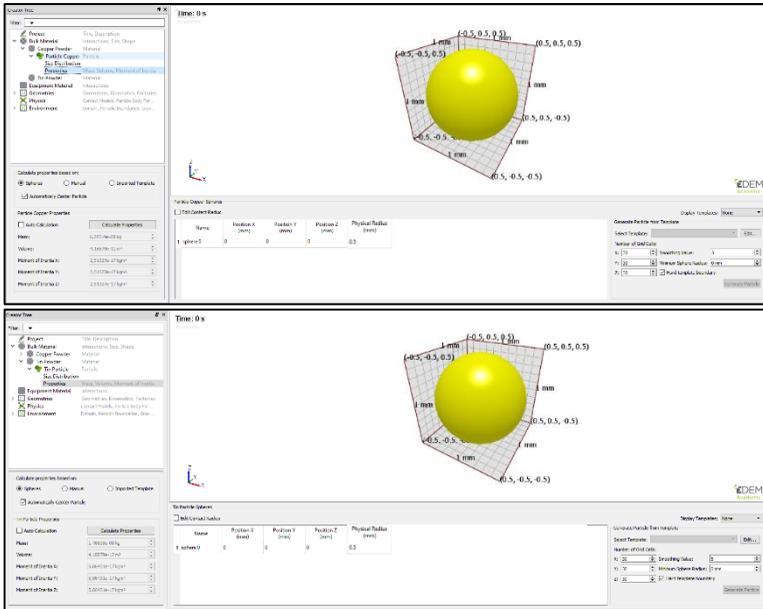
Pada penelitian ini terdapat 3 komponen yang memiliki properti yang berbeda. Komponen pertama adalah serbuk tembaga (Cu), serbuk timah (Sn), dan komponen *punch* dan *die* yang menggunakan material baja (*steel*). Property tersebut di definisikan seperti gambar berikut



**Gambar 3. 7** Properti material (kiri) Serbuk Tembaga (tengah) Serbuk Timah (kanan) *Punch* dan *Die*

### 3.4.4 Define Particle Physic Property

Objek penelitian ini adalah perilaku partikel, sehingga perlu dibuat model partikel sedemikian rupa menyerupai partikel pada kenyataannya, sehingga hasil simulasi dapat dianggap valid. Proses produksi *frangible bullet* menggunakan komposit yang terdiri dari serbuk tembaga (Cu) dan timah (Sn), maka kedua partikel tersebut harus ditetapkan ukuran bentuk partikel tersebut. Dalam penelitian ini, kedua serbuk tersebut dibuat memiliki bentuk yang serupa, yakni *single sphere* dan ukuran jari – jari sebesar 500 mikrometer.

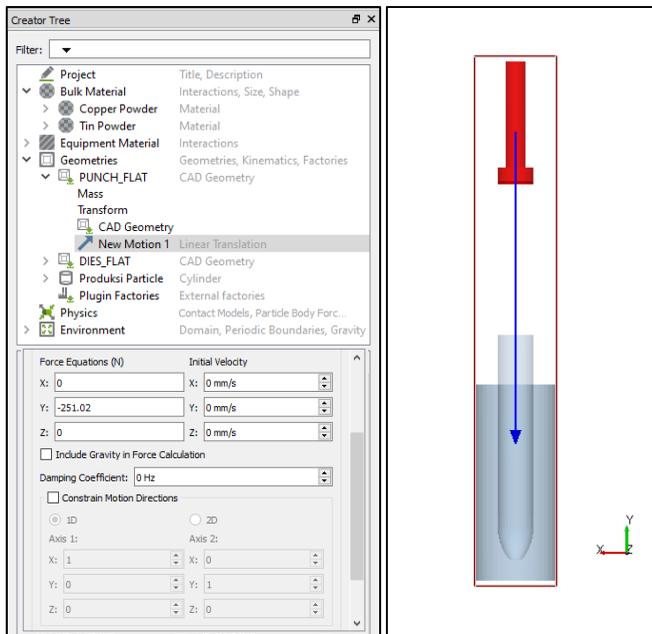


**Gambar 3. 8** Properti partikel (atas) Serbuk Tembaga (bawah) Serbuk Timah

### 3.4.5 Define Equipment Kinematics

Permodelan proses kompaksi yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan membatasi gerak pendorong (*punch*) ke arah radial, sedangkan *punch* bebas bergerak terdapat arah aksial.

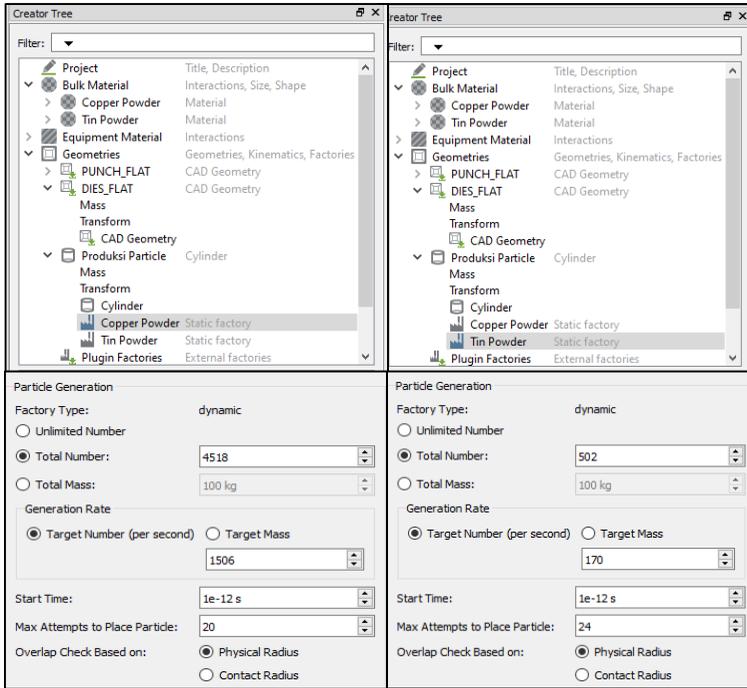
Dalam penelitian ini, kondisi yang ditetapkan berupa *displacement* pada *punch* sebesar 78.3 mm. selain diberikan *displacement*, pada ujung *punch* juga diberikan nilai *force* sebesar 251.02 N, 351.43 N, dan 451.84 N untuk dapat menghasilkan nilai tekanan sebesar 500 Psia, 700 Psia, dan 900 Psia pada ujung *punch* yang berhubungan langsung dengan serbuk.



**Gambar 3. 9** (kiri) Pengaturan *displacement* dan kecepatan *punch* (kanan) vektor dari *displacement* dan kecepatan *punch*

### 3.4.6 Define Factory

Partikel yang dihasilkan dari EDEM merupakan hasil pengaturan pada fitur *factory*, dalam penelitian ini, digunakan tipe *static factory* karena partikel yang akan disimulasikan dalam kondisi diam, dengan jumlah total partikel 5020 partikel, dengan pembagian 90% partikel serbuk tembaga sejumlah 4518 partikel, dan 10% partikel serbuk timah sejumlah 502 Partikel.



**Gambar 3. 10** Jumlah partikel (kiri) Serbuk Tembaga (kanan) Serbuk Timah

### 3.4.7 Define Contact

Sebelum melakukan simulasi dari permodelan kompaksi pada EDEM, harus ditetapkan terlebih dahulu kontak yang terjadi pada setiap material. Pada proses ini harus ditetapkan kontak antar partikel sesama serbuk, partikel antar serbuk, dan partikel serbuk terhadap material *punch* dan *die*. Nilai kontak antar partikel yang digunakan adalah nilai *default* dari EDEM.

Permodelan kontak *physics* diatur sebagai kontak *Edinburg Elasto-Plastic Adhesion Model Configuration*, yang mana permodelan ini sesuai digunakan untuk permodelan material untuk mencapai regime plastis.

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Coefficient of Restitution:      | 0,5  |
| Coefficient of Static Friction:  | 0,5  |
| Coefficient of Rolling Friction: | 0,01 |

| Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model Configuration                   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| Active Interactions   |                                       |
| Copper Powder:Copper Powder   | Constant pull-off force: 0 N          |
| Copper Powder:Tin Powder  | Surface Energy: 0 J/m <sup>2</sup>    |
| Tin Powder:Tin Powder   | Contact Plasticity Ratio: 0.5         |
|   | Slope Exp: 1.5                        |
|   | Tensile Exp: 1.5                      |
|   | Tangential Stiff Multiplier: 0.666667 |
| <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> |                                       |

**Gambar 3. 11** Nilai koefisien kontak antar partikel dan geometri

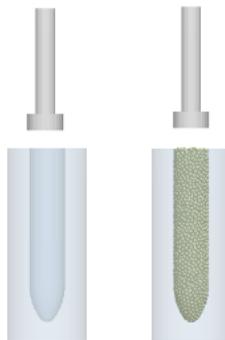
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

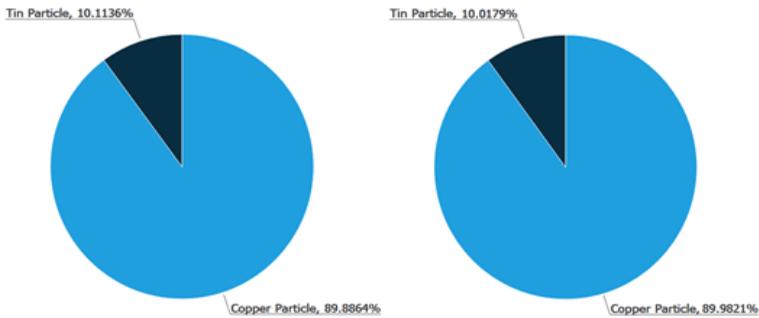
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* EDEM 2020 yang memiliki basis sistem *Discrete Element Method*. Setelah dilakukan proses simulasi dengan menggunakan variasi geometri cetakan peluru (*flat nose* dan *full round*), variasi gaya tekan (251.02 N, 351.43 N, dan 451.84 N untuk dapat menghasilkan nilai tekanan sebesar 500 Psia, 700 Psia, dan 900 Psia). Hasil yang didapatkan berupa *displacement punch* yang terjadi dan *compressive force* yang diterima oleh partikel.

### 4.1 Hasil Produksi Partikel

*Discrete element method* dapat digunakan untuk melakukan analisis terhadap objek berupa partikel, dimana dalam hal ini partikel yang mengisi suatu ruang dan dikenai gaya eksternal akan dianalisis sebagai individu yang terpisah (bukan sebagai satu objek utuh tanpa ada ruang/celah antar partikel). Maka salah satu tahap vital dalam penggunaan *software* berbasis DEM adalah proses *particle generation* atau produksi partikel pada suatu lokal tertentu. Gambar 4.1 menunjukkan hasil produksi partikel pada cetakan. Sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan bagaimana perbandingan partikel tembaga dan timah setelah diproduksi.



**Gambar 4. 1** (kiri) sebelum partikel diproduksi (kanan) setelah partikel diproduksi



**Gambar 4. 2** Perbandingan jumlah partikel (kiri) *flat nose* (kanan) *full round*

Gambar 4.1 menunjukkan lokasi partikel diproduksi, yaitu pada cetakan peluru yang digunakan. Terlihat partikel mengisi penuh ruang yang terdapat dalam cetakan tersebut. Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan kuantitas antara partikel tembaga dan timah yang dihasilkan pada proses *generate particle* pada software EDEM. Pada geometri *flat nose* dihasilkan jumlah partikel total sejumlah 2818 partikel, dengan rincian 2533 partikel tembaga dan 285 partikel timah. Sedangkan pada geometri *full round* dihasilkan 2795 partikel dengan rincian 2515 partikel tembaga dan 280 partikel timah.

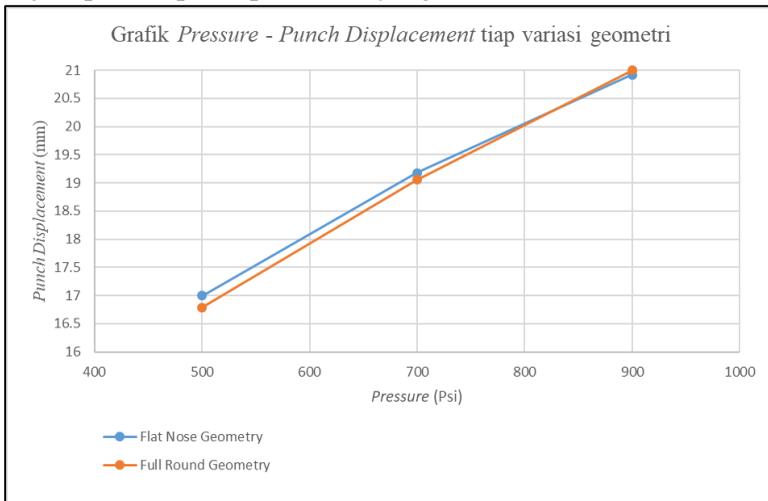
Jumlah tersebut tidak sesuai dengan jumlah yang diatur pada *powder factory*, karena jumlah yang digunakan pada penentuan *powder factory* adalah pembagian langsung antara volume cetakan terhadap volume partikel tanpa melihat celah yang terjadi antar partikel ketika bertumpukan. Namun secara komposisi, partikel yang dihasilkan masih sesuai seperti yang diharapkan, yaitu mengandung 90% partikel tembaga dan 10% partikel timah.

#### 4.2 Analisis Displacemet Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, variasi yang digunakan adalah Tekanan sebagai fungsi gaya tekan yang diberikan. Berdasarkan persamaan

tekanan ( $P = \frac{F}{A}$ ), terdapat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan terhadap gaya yang diberikan, dimana semakin tinggi tekanan maka semakin tinggi pula nilai gaya yang harus diberikan. Menurut hukum Hooke ( $F = \Delta \times k$ ), terdapat hubungan antara gaya terhadap *displacement* dan *stiffness parameter*. Pada objek pengamatan yang sama (*stiffness parameter* sama), maka semakin besar gaya diberikan, maka semakin besar pula *displacement* yang terjadi.

Gambar 4.3 menunjukkan hasil *displacement punch* yang terjadi pada tiap – tiap simulasi yang dilakukan



**Gambar 4. 3** Hubungan tekanan terhadap *displacement punch*

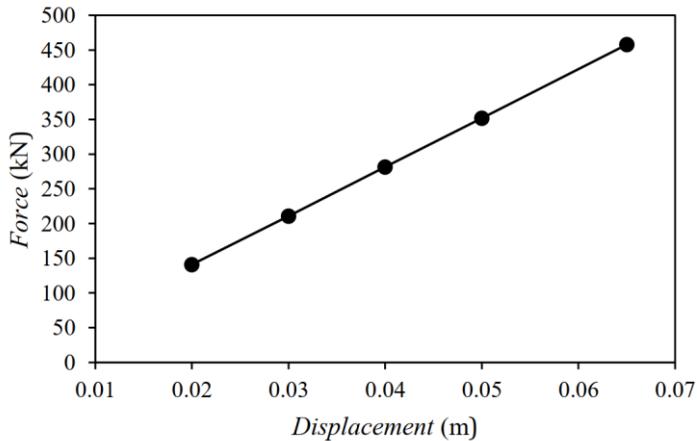
Pada gambar terlihat *displacement* terbesar pada tiap – tiap geometri terjadi saat pemberian tekanan sebesar 900 Psi. Pada pemberian gaya tekan tersebut, *punch* yang digunakan pada geometri *full round* mengalami *displacement* sebesar 20, 9987 mm dan pada *flat nose* sebesar 20, 9188 mm. pada tekanan 700 Psi, *punch* mengalami perpindahan sebesar 19,1802 mm untuk geometri *flat nose*, dan 19,0528 mm untuk geometri *full round*. *Displacement* terkecil terjadi pada variasi gaya tekan terkecil yang

digunakan yaitu 500 Psi, pada pemberian gaya tekan tersebut, *punch* yang digunakan pada geometri *full round* mengalami *displacement* sebesar 16,7909 mm dan pada *flat nose* sebesar 16,9981 mm.

Berdasarkan trend tersebut, dapat disimpulkan bahwa data hasil simulasi telah sesuai dengan teori yang ada, dimana terdapat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan sebagai fungsi dari gaya tekan yang diberikan terhadap *displacement* yang terjadi. Namun hasil tersebut masih belum sesuai dengan kondisi yang diharapkan, dimana pada kondisi lapangan diharapkan terjadi *displacement punch* sebesar 28,3 mm untuk mendapatkan geometri akhir sesuai standar yang telah ditentukan. Hal tersebut dapat terjadi karena beberapa faktor yang tidak dapat terlalu disesuaikan dengan kondisi relaita, dimana ukuran partikel yang sebenarnya lebih kecil dibandingkan ukuran yang digunakan pada permodelan. Serbuk tembaga dan timah yang digunakan pada proses produksi menggunakan serbuk dengan kualitas *fine* dengan kisaran diameter dibawah 100  $\mu m$  dan memiliki geometri pipih (*flake*). Sedangkan dikarenakan keterbatasan perangkat untuk melakukan permodelan dengan ukuran dan geometri tersebut, maka digunakan partikel dengan ukuran diameter 500  $\mu m$ .

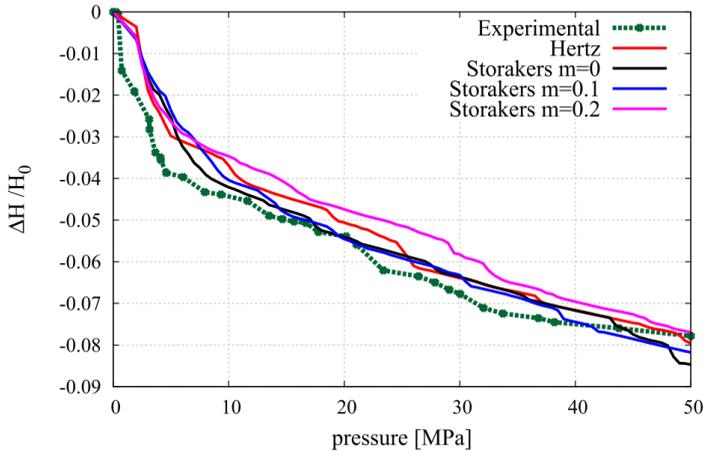
#### **4.2.1 Komparasi *Displacement Punch***

Dalam upaya membuktikan hasil simulasi sudah sesuai dengan kondisi sebenarnya atau sesuai dengan teori maka perlu dilakukan uji validasi. Dalam hal ini akan dilakukan uji validasi berupa komparasi terhadap penelitian serupa yang menghasilkan data berupa hubungan antara gaya terhadap *displacement punch* yang terjadi. Pengaruh tekanan terhadap *displacement punch* pada penelitian ini akan dikomparasikan terhadap dua penelitian yang pernah ada terkait proses kompaksi serbuk, dimana penelitian pertama oleh Deshinta Ikasari pada 2017 dan penelitian kedua oleh Jerzy Rojek, dkk pada tahun 2015.



**Gambar 4. 4** Hubungan *displacement punch* terhadap gaya tekan (Ikasari D., 2017)

Gambar di atas merupakan hasil grafik hubungan antara *displacement punch* terhadap gaya tekan yang dibutuhkan. Penelitian ini dilakukan oleh Deshinta Ikasari pada 2017 dengan judul Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan terhadap Distribusi *Green Density* pada Kompaksi Serbuk Cu - 10% wtSn dengan Metode Elemen Hingga. Pada penelitian dengan basis metode elemen hingga (FEM), didapatkan hasil berupa ketika terjadi peningkatan *displacement punch*, maka gaya tekan juga perlu ditingkatkan. Dalam kata lain terdapat hubungan berbanding lurus antara gaya tekan terhadap *displacement punch*. Pada penelitian ini, komparasi yang dapat dilakukan hanya sebatas komparasi terhadap tren grafik yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan pada penelitian, material yang digunakan adalah tembaga (Cu) dalam kondisi *solid material*, bukan dalam kondisi *loose material*. Sehingga data tersebut tidak bisa dikomparasikan.



**Gambar 4.5** Hubungan tekanan terhadap ketinggian *green compact* (Jerzy R., 2015)

Gambar 4.5 merupakan grafik hubungan antara tekanan terhadap perubahan ketinggian objek penelitian. Penelitian pada 2015 yang dilakukan oleh Jerzy Rojek, dkk dengan judul *Discrete Element Simulation of Powder Compaction in Cold Uniaxial Pressing with Low Pressure*. Penelitian ini melakukan permodelan pada proses kompaksi pada serbuk NiAl menggunakan basis *discrete element method* (DEM). Salah satu hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah hubungan antara tekanan yang diberikan terhadap perubahan ketinggian pada objek penelitian. Dapat terlihat dimana semakin besar tekanan yang diberikan maka semakin besar pula perubahan ketinggian objek dalam notasi negative (karena berupa penurunan ketinggian). Bersamaan dengan grafik tersebut, dapat diambil kesimpulan bahwa terjadi *displacement punch* yang semakin besar seiring peningkatan tekanan yang diberikan. Maka terdapat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan terhadap *displacement punch*. Pada penelitian ini, komparasi yang dapat dilakukan hanya sebatas komparasi terhadap tren grafik yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan

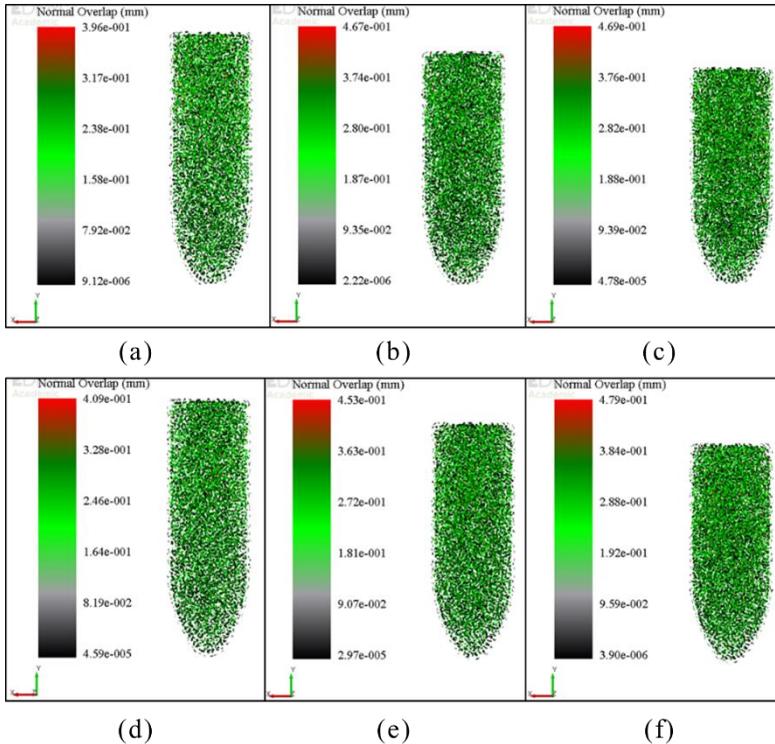
pada penelitian, material yang digunakan adalah serbuk NiAl. Sehingga data tersebut tidak bisa dikomparasikan dengan data yang telah didapat pada subbab 4.2.

Berdasarkan dua penelitian tersebut, maka hasil yang didapatkan pada penelitian ini sudah menunjukkan tren yang sesuai, yaitu terdapat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan yang diberikan terhadap *displacement punch* yang terjadi pada proses kompaksi.

### **4.3 Analisis *Overlap* Partikel**

Dalam metode elemen diskrit, deformasi pada partikel digambarkan dengan terjadinya *overlap* dalam suatu kontak antar partikel, maupun partikel terhadap sebuah geometri.

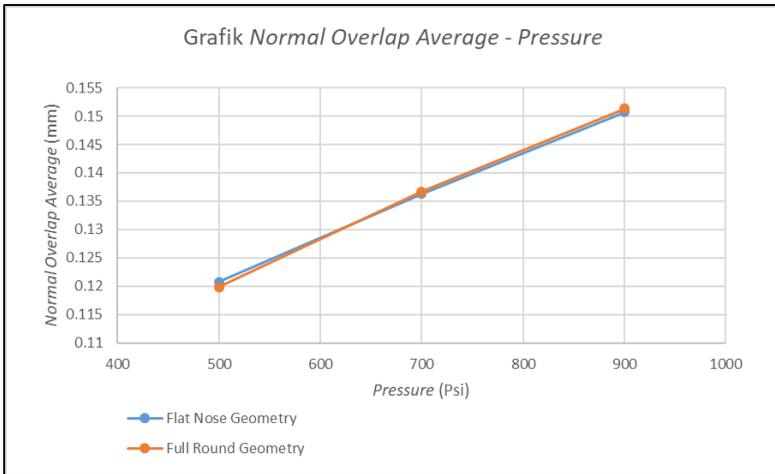
Pada analisis *overlap* akan menggunakan data yang didapat dari software EDEM 2020 berupa peta persebaran *normal overlap* dan juga histogram yang menunjukkan interval *normal overlap* terhadap jumlah partikel. Pada plot persebaran *overlap*, akan dibagi dalam lima tingkatan, warna hitam merepresentasikan *overlap* dengan nilai minimum, abu – abu menggambarkan *overlap* pada satu tingkat diatas, lalu hijau untuk *overlap* dengan tingkat menengah, lalu hijau gelap untuk *overlap* dengan tingkat diatas, lalu merah untuk *overlap* maksimum.



**Gambar 4. 6** Perbandingan distribusi *overlap*

Gambar di atas menunjukkan bagaimana persebaran dari *overlap* yang terjadi pada tiap variasi, dimana untuk gambar (a), (b), dan (c) menunjukkan *overlap* pada variasi geometri *flat nose* saat diberi tekanan 500, 700, dan 900 Psi. untuk gambar (d), (e), dan (f) menunjukkan *overlap* yang terjadi pada geometri *full round* saat diberi tekanan 500, 700, dan 900 Psi.

Jika dilihat pada legenda tiap – tiap gambar, terdapat hubungan antara tekanan kompaksi terhadap *overlap* yang terjadi. Dimana semakin besar tekanan yang diberikan maka range *overlap* yang terjadi akan semakin besar pula.



**Gambar 4. 7** Hubungan tekanan terhadap *normal overlap average*

Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan antara tekanan terhadap *normal overlap average*. *Normal overlap average* merupakan rata – rata dari *overlap* yang terjadi pada seluruh partikel. Parameter ini digunakan untuk melihat pengaruh tekanan terhadap *overlap* yang terjadi pada keseluruhan partikel. Terdapat hubungan yang berbanding lurus antara keduanya, dimana nilai *normal overlap average* terkecil terjadi pada geometri *full round* saat diberi tekanan 500 Psi dengan 0,1119 mm, sedangkan *normal overlap average* terbesar terjadi pada geometri *full round* saat diberi tekanan 900 Psi dengan 0,1513 mm.

Hal ini berkaitan dengan pengertian dari *overlap* itu sendiri, yang merupakan deformasi pada partikel saat terjadi kontak antara dua partikel, dan besar *overlap* akan dipengaruhi oleh gaya kontak yang bekerja pada kedua partikel tersebut. Persamaan yang menggambarkan gaya normal yang bekerja pada akhir proses kompaksi adalah  $F_n = [(F_0 + k_1\delta) + (\beta_n + V_n)]$ . Persamaan tersebut digunakan mengacu pada grafik permodelan Edinburg – Elasto Plastic, dimana pada akhir proses kompaksi menggunakan

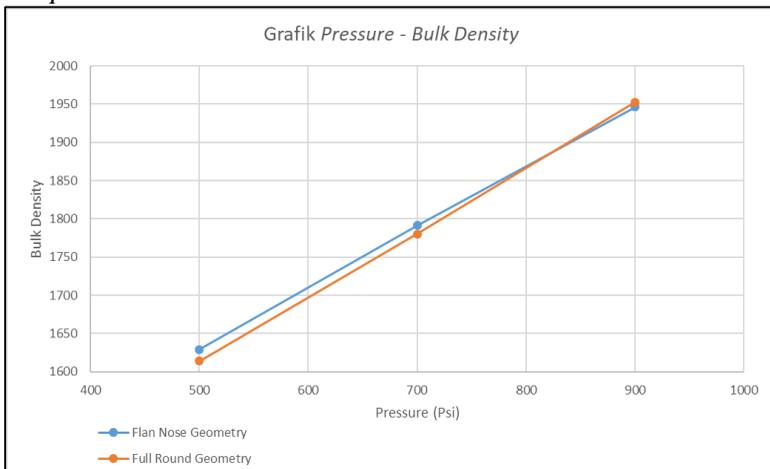
cabang pertama yang menentukan nilai gaya normal yang bekerja pada kontak antar partikel dari hasil kali *stiffness virgin loading parameter* dengan *overlap*. Terlihat dari persamaan tersebut dimana gaya normal yang terjadi berbanding lurus terhadap gaya *spring* dan juga gaya *dashpot*. Untuk kondisi kompaksi yang melibatkan kecepatan kontak normal antar partikel relatif kecil, maka faktor yang lebih dominan adalah faktor gaya *spring* yang melibatkan *stiffness virgin loading parameter* dan *overlap*. Sehingga dari persamaan tersebut, dapat ditarik kesimpulan semakin besar gaya tekan yang diberikan, maka semakin besar pula gaya normal yang akan bekerja dalam suatu kontak antar partikel, yang mengakibatkan *normal overlap* yang terjadi semakin besar.

Jika dilakukan analisis secara kualitatif pada gambar 4.6, maka terlihat area yang dekat dengan sumber tekanan, memiliki kerapatan warna yang lebih baik daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan, hal ini menunjukkan pada daerah tersebut terjadi banyak kontak antar partikel yang mengakibatkan banyak terjadi *overlap*. Maka jika dihubungkan terhadap densitas, pada area yang memiliki jumlah *overlap* tinggi memiliki tingkat densitas yang lebih tinggi pula, karena pada daerah tersebut otomatis memiliki jumlah partikel yang lebih banyak daripada daerah dengan jumlah *overlap* rendah, hal itu dikarenakan hanya terjadi sedikit kontak antar partikel. Pembahasan mengenai distribusi partikel secara kuantitatif akan dibahas pada subbab berikutnya.

#### **4.4 Analisis Bulk Density**

Produk dari proses kompaksi dikenal dengan istilah *green compact*, sama halnya densitas pada produk hasil kompaksi, yang selanjutnya disebut dengan *green density*, dimana *green density* merupakan faktor penting dari serangkaian proses metalurgi serbuk. Hal ini dikarenakan akan terjadi peningkatan densitas yang besar dari densitas serbuk mula-mula (*apparent density*), selain itu dapat diketahui kualitas dari suatu padatan, ada atau tidaknya indikasi retak. Pada penelitian ini akan dihitung *bulk density*. *Bulk density* bukan properti material yang intrinsik, karena nilai *bulk*

*density* bergantung dengan bagaimana proses material tersebut dikerjakan. Properti ini digunakan pada material serbuk, granular, dan lain – lain yang cenderung dikerjakan dalam jumlah besar, nilai *bulk density* didapatkan seperti halnya mencari nilai densitas pada umumnya. Dengan membagi massa total partikel/objek terhadap volume total yang terisi, namun dalam kasus ini volume pori/volume udara yang terjebak diantara partikel (rongga) juga diperhitungkan. Gambar 4.8 menunjukkan bagaimana pengaruh dari tekanan yang diberikan terhadap nilai *bulk density* dari *green compact*.



**Gambar 4. 8** Hubungan tekanan terhadap *bulk density*

Pada grafik tersebut terlihat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan terhadap nilai *bulk density*. Geometri *flat nose* memiliki *bulk density* awal 954,561 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada *full round* memiliki *bulk density* awal 954,278 kg/m<sup>3</sup>. Setelah diberi tekanan, maka *bulk density* akan meningkat. Pada tekanan 500 Psi, geometri *flat nose* mengalami peningkatan menjadi 1628,928 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada *full round* *bulk density* menjadi 1614,21 kg/m<sup>3</sup>, pada beban tekanan 700 Psi, geometri *flat nose* memiliki *bulk density* sebesar 1791,398 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada *full round* sebesar 1780,04 kg/m<sup>3</sup>. Pada tekanan 900 Psi, geometri *flat nose*

memiliki *bulk density* senilai 1946,038 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada *full round* sebesar 1952,608 kg/m<sup>3</sup>.

Hubungan yang berbanding lurus antara tekanan dan juga *bulk density* ini berhubungan dengan peningkatan tekanan yang diberikan mempengaruhi peningkatan perpindahan *punch* yang terjadi. Hal ini membuat volume akhir menjadi berkurang, namun tidak diikuti oleh berkurangnya massa produk, sehingga *bulk density* produk akan meningkat karena *bulk density* merupakan hasil bagi antara massa produk terhadap volume total produk.

#### 4.4.1 Analisis Distribusi Bulk Density

Distribusi densitas pada *green compact* sangat penting untuk dipelajari, hal ini bertujuan untuk mengetahui area atau lokal yang merupakan titik lemah dari suatu produk. Area/lokal yang memiliki densitas rendah merupakan titik lemah dari suatu produk. Untuk melakukan analisis distribusi *bulk density*, geometri *frangible bullet* pada akhir proses kompaksi dibagi dalam *grid* 5x5 terhadap sumbu x dan y.

##### a. Metode pembagian *grid*

EDEM dapat menghasilkan data berupa persebaran *compressive force* partikel terhadap posisi dalam sumbu koordinat. Berdasarkan data tersebut, akan dikelompokkan partikel dalam suatu interval sehingga dapat diketahui posisi partikel dalam titik koordinat (x,y).

**Tabel 4. 1** Tabel interval lokasi partikel

| Tabel Lokasi Partikel Tiap Sumbu |      |               |      |
|----------------------------------|------|---------------|------|
| Sumbu X                          |      | Sumbu Y       |      |
| Interval                         | Kode | Interval      | Kode |
| 23.68 - 25.37                    | 1    | -1.40 - 4.000 | 1    |
| 25.37 - 27.06                    | 2    | 4.000 - 9.400 | 2    |
| 27.06 - 28.76                    | 3    | 9.400 - 14.80 | 3    |
| 28.76 - 30.45                    | 4    | 14.80 - 20.20 | 4    |
| 30.45 - 32.15                    | 5    | 20.20 - 25.60 | 5    |

**Tabel 4. 2** Lokasi penempatan partikel

| Tabel Lokasi Partikel |   |              |    |    |    |    |
|-----------------------|---|--------------|----|----|----|----|
|                       |   | Kode Sumbu X |    |    |    |    |
|                       |   | 1            | 2  | 3  | 4  | 5  |
| Kode Sumbu Y          | 1 | 1            | 2  | 3  | 4  | 5  |
|                       | 2 | 6            | 7  | 8  | 9  | 10 |
|                       | 3 | 11           | 12 | 13 | 14 | 15 |
|                       | 4 | 16           | 17 | 18 | 19 | 20 |
|                       | 5 | 21           | 22 | 23 | 24 | 25 |

Dari tabel 4.1, dapat dilihat pembagian interval dalam sumbu x dan sumbu y dalam lima interval. Dimana pada tiap – tiap interval akan memiliki kode untuk lokasi partikel. Sedangkan tabel 4.2 menunjukkan kode lokasi yang menunjukkan penempatan partikel berdasarkan kombinasi dari lokasi partikel pada sumbu x dan y.

**Tabel 4. 3** Tabel data lokasi partikel

| Compr. Force | Lokasi Partikel |            | Kode Sumbu X | Kode Sumbu Y | Lokasi |
|--------------|-----------------|------------|--------------|--------------|--------|
|              | Kordinat X      | Kordinat Y |              |              |        |
| 1.291        | 24.22           | 7.46       | 1            | 2            | 6      |
| 2.187        | 31.86           | 5.48       | 5            | 2            | 10     |
| 2.596        | 27.77           | 0.08       | 3            | 1            | 3      |
| 2.666        | 26.46           | 5.46       | 2            | 2            | 7      |
| 2.775        | 25.16           | 25.37      | 1            | 5            | 21     |
| 2.800        | 27.46           | 22.72      | 3            | 5            | 23     |
| 2.871        | 25.24           | 1.58       | 1            | 1            | 1      |
| 3.204        | 30.66           | 7.76       | 5            | 2            | 10     |
| 3.286        | 24.71           | 2.09       | 1            | 1            | 1      |
| 3.425        | 29.61           | 0.64       | 4            | 1            | 4      |
| 3.454        | 25.76           | 2.32       | 2            | 1            | 2      |

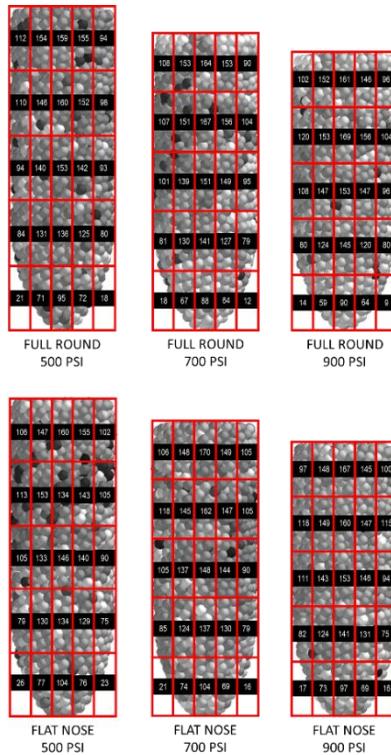
|       |       |       |   |   |    |
|-------|-------|-------|---|---|----|
| 3.613 | 23.89 | 9.23  | 1 | 2 | 6  |
| 3.678 | 31.20 | 14.73 | 5 | 3 | 15 |
| 3.695 | 27.44 | 25.02 | 3 | 5 | 23 |
| 3.706 | 28.45 | 15.41 | 3 | 4 | 18 |

Tabel di atas menunjukkan hasil pengelompokan sebagian partikel yang berada pada geometri *flat nose* saat diberikan tekanan 500 Psi. tabel pengelompokan partikel secara keseluruhan akan diberikan pada *section* lampiran.

**Tabel 4. 4** Hasil pengelompokan jumlah partikel

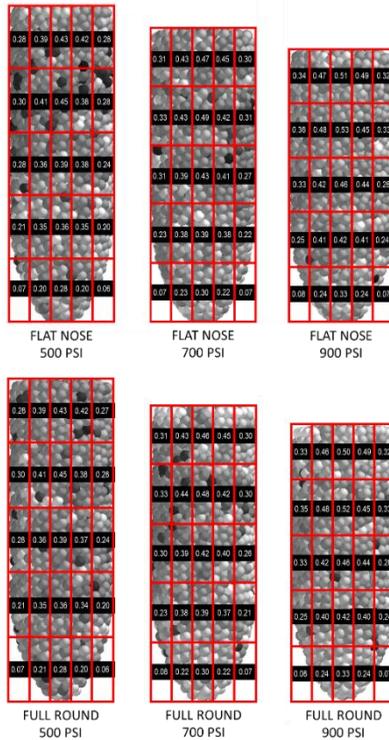
| Jumlah Partikel berdasarkan Lokasi |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 26                                 | 77  | 104 | 76  | 23  |
| 79                                 | 130 | 134 | 129 | 75  |
| 105                                | 133 | 146 | 140 | 90  |
| 113                                | 153 | 167 | 143 | 105 |
| 106                                | 147 | 160 | 155 | 102 |

Tabel di atas menunjukkan hasil pengelompokan partikel. *Row* paling atas merupakan pengelompokan partikel pada ujung peluru (daerah yang jauh dari sumber tekanan), sedangkan *row* paling bawah merupakan pengelompokan partikel pada pangkal peluru yang merupakan daerah paling dekat dengan sumber tekanan. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa daerah yang dekat dengan sumber tekanan memiliki penumpukan partikel yang lebih tinggi daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan, dan juga terlihat grid yang berada pada pusat geometri memiliki jumlah partikel lebih banyak daripada area/lokal yang berada pada permukaan geometri. Penggambaran pengelompokan partikel pada seluruh variasi akan digambarkan oleh gambar 4.9.



**Gambar 4. 9** Distribusi partikel

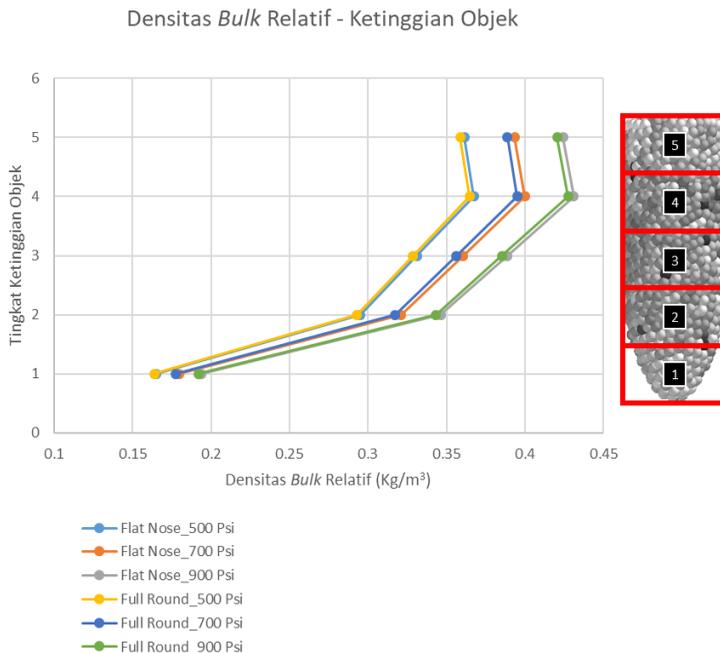
Dari gambar tersebut, terlihat bahwa jumlah partikel yang berada dekat dengan sumber tekanan lebih tinggi daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan. Hal ini terjadi berkaitan dengan analisis terkait *overlap* yang terjadi pada partikel. Berdasarkan analisis secara kualitatif mengenai distribusi *overlap*, terjadi penumpukan pada daerah dekat dengan sumber tekanan yang menandakan terjadinya banyak kontak antar partikel dalam area tersebut. Gambar di atas mendukung analisis tersebut, karena terlihat tren bahwa pada area yang dekat dengan sumber tekanan memiliki jumlah partikel yang lebih banyak jika dibandingkan dengan daerah yang jauh dari sumber tekanan.



**Gambar 4. 10** Distribusi *bulk density relative*

Gambar di atas menunjukkan distribusi densitas *bulk* relatif pada tiap – tiap variasi setelah melalui proses kompaksi. Densitas *bulk* relatif merupakan rasio antara densitas *bulk* terhadap densitas material dalam *solid state*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa area yang dekat dengan sumber tekanan memiliki nilai densitas relatif yang lebih baik daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan. Juga terdapat tren dimana area yang berada pada pusat geometri memiliki densitas relatif yang lebih besar daripada daerah permukaan luar geometri, kedua hal ini ditunjang oleh pembahasan sebelumnya mengenai distribusi partikel berdasarkan posisinya.

Gambar 4.11 menunjukkan hubungan antara ketinggian objek terhadap densitas bulk relatif.



**Gambar 4. 11** Hubungan densitas *bulk* relatif terhadap ketinggian

Berdasarkan pada grafik tersebut, tingkat ketinggian dibagi menjadi 5 bagian, dimana bagian dengan nomor 5 adalah daerah yang paling dekat dengan sumber tekanan, sedangkan nomor 1 sebaliknya. dapat terlihat hubungan yang berbanding lurus antara keduanya, namun puncak densitas terjadi pada tingkat 4, lalu terjadi penurunan pada tingkat 5.

Hal ini dapat terjadi karena partikel akan mentransmisikan dan menyerap gaya tekan yang diterima. Partikel yang dekat dengan sumber tekanan akan mentransmisikan serta menyerap gaya tekan yang lebih besar daripada partikel yang berada jauh dari sumber tekanan. Sehingga *overlap*/deformasi yang terjadi pada

partikel yang dekat dengan sumber tekanan akan lebih besar, sehingga ruang yang memungkinkan untuk diisi oleh partikel lain akan lebih besar, hal tersebutlah yang menyebabkan pada area tersebut terjadi penumpukan partikel.

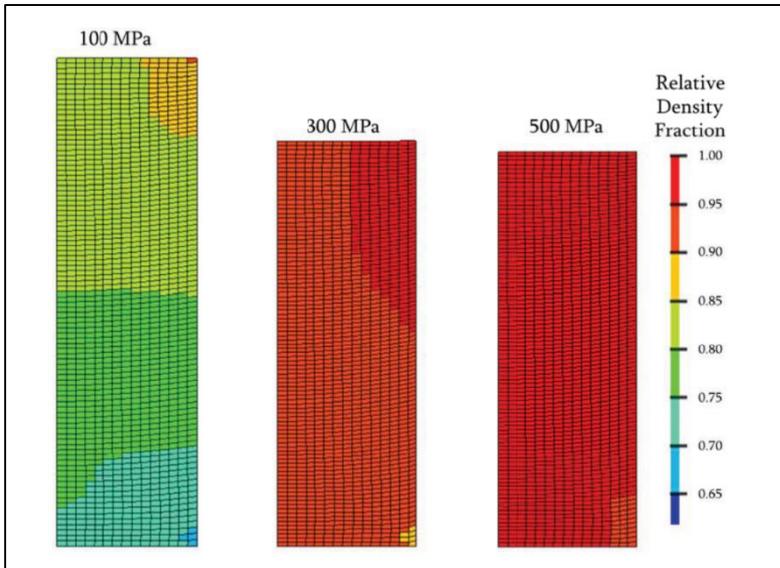
Menurut data tersebut, bagian pangkal peluru (bagian paling dekat dengan sumber tekanan) merupakan bagian yang paling tangguh/titik terkuat dari geometri peluru. Hal ini berkaitan dengan kekuatan adhesif dan kohesif saat terjadi kontak antar partikel. Yaitu kekuatan lekat yang terjadi baik sesama partikel ataupun antar partikel. Sedangkan pada kondisi realita, bagian tersebut mengalami deformasi/hancur saat akan dipasang pada selongsong peluru. Maka dari itu jika dihubungkan dengan distribusi densitas, maka kondisi tersebut tidak diakibatkan oleh distribusi densitas yang tidak merata. Karena pada bagian tersebut merupakan bagian paling tangguh daripada bagian lain. Pembahasan terkait kondisi ini akan dibahas pada subbab berikutnya yang akan membahas mengenai standar *frangible bullet*.

#### **4.4.2 Komparasi Bulk Density**

Dalam upaya membuktikan kesesuaian permodelan dan hasil simulasi proses kompaksi terhadap kondisi sebenarnya atau teori, maka perlu dilakukan uji validasi. Dalam hal ini, dilakukan uji validasi berupa komparasi terhadap penelitian terdahulu yang menghasilkan data berkaitan dengan distribusi densitas.

##### **a. Komparasi Distribusi Densitas Relatif**

Hasil yang didapat pada analisis distribusi densitas relatif akan dikomparasikan dengan penelitian oleh Stanley G. Selig pada 2012 yang menghasilkan data serupa .



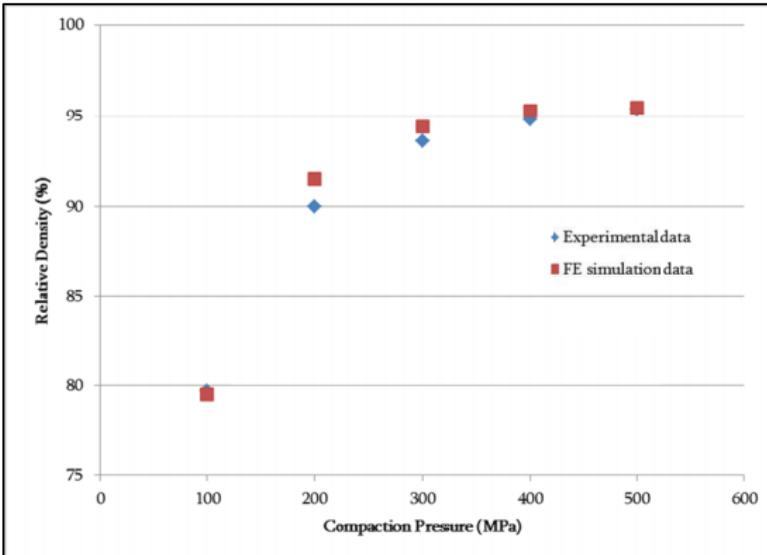
**Gambar 4. 12** Pola distribusi densitas relatif pada produk hasil proses kompaksi

Penelitian yang dilakukan oleh Selig dengan Judul *Finite Element Simulation of the Compaction and Springback of an Aluminum Powder Metallurgy Alloy* mengamati bagaimana hasil dari proses kompaksi pada serbuk Alumix 321 dari segi persebaran densitas relatif dan juga perilaku *springback* yang dialami objek kerja pada proses kompaksi ketika tekanan kompaksi dihilangkan menggunakan *finite element method*. Gambar 4.12 menunjukkan kontur persebaran densitas relatif yang terjadi pada benda kerja. Berdasarkan plot tersebut, maka daerah yang paling dekat dengan sumber tekanan memiliki densitas relatif yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang jauh dari sumber tekanan. Selain itu terlihat pada plot dimana daerah yang berada pada sisi permukaan luar geometri memiliki densitas relatif yang lebih tinggi disbanding dengan daerah yang berada pada pusat geometri. Berdasarkan komparasi menggunakan penelitian oleh Selig, maka analisis hasil pada penelitian ini yang berkaitan dengan distribusi

*overlap* yang berhubungan dengan kerapatan partikel telah sesuai dengan teori yang telah dikemukakan sebelumnya.

**b. Komparasi Bulk Relative Density**

Dalam hal ini, dilakukan uji validasi berupa komparasi terhadap penelitian serupa yang menghasilkan data berupa hubungan antara tekanan terhadap densitas relatif setelah melalui proses kompaksi. Hasil tersebut akan dikomparasikan dengan penelitian oleh Stanley G. Selig pada 2012.



**Gambar 4.13** Grafik hubungan tekanan terhadap densitas relatif

Penelitian yang dilakukan oleh Selig dengan Judul *Finite Element Simulation of the Compaction and Springback of an Aluminum Powder Metallurgy Alloy* mengamati bagaimana hasil dari proses kompaksi pada serbuk Alumix 321 dari segi persebaran densitas relatif dan juga perilaku *springback* yang dialami objek kerja pada proses kompaksi ketika tekanan kompaksi dihilangkan menggunakan *finite element method*. Salah satu hasil yang didapat pada penelitian ini adalah hubungan antara tekanan kompaksi terhadap densitas relatif. Gambar 4.54 menunjukkan bagaimana

hubungan antara keduanya, dimana terlihat hubungan yang berbanding lurus antara tekanan kompaksi terhadap densitas relatif.

Berdasarkan komparasi dengan penelitian oleh Selig, maka analisis hasil pada penelitian ini yang berkaitan dengan hubungan antara tekanan kompaksi terhadap *bulk density* telah sesuai dengan teori yang telah dikemukakan sebelumnya.

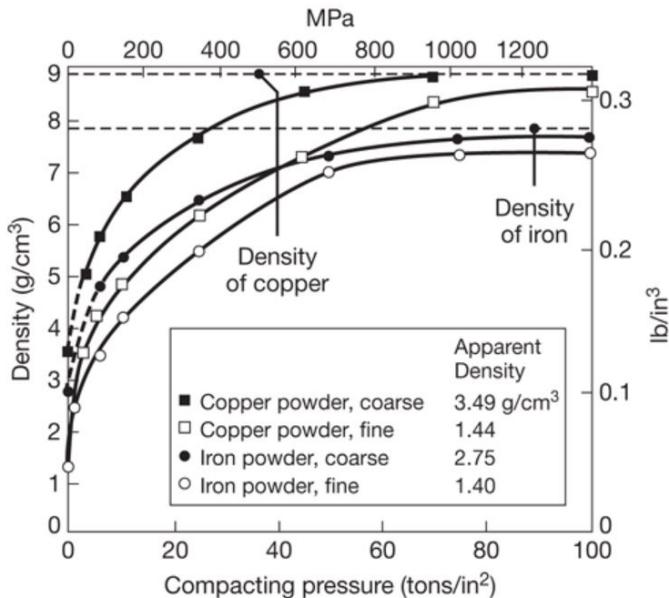
#### **4.5 Validasi Produk *Frangible bullet***

Untuk memastikan produk *frangible bullet* telah memenuhi standar produk, maka dilakukan komparasi terhadap spesifikasi produk *frangible bullet* yang telah dipatenkan. Paten dengan nomor US 8,365,672 B2 memiliki judul *Frangible bullet and its Manufacturing Method*, Penelitian ini melakukan proses kompaksi pada komposit serbuk dengan komposisi 84% Cu, 6% Zn, 9% Sn, dan 1% pengotor, dan tambahan 0,6% *high density polyethylene* sebagai pelumas. Pada proses tersebut dihasilkan produk *frangible bullet* dengan densitas yang memenuhi syarat uji tembak berada pada rentang  $7,2 \text{ g/cm}^3 - 7,5 \text{ g/cm}^3$ . Menurut paten, rentang densitas tersebut memiliki ketangguhan yang cukup untuk dipasang pada selongsong peluru dan menerima ledakan dari mesiu ketika ditembakkan, juga pada tingkat densitas tersebut memiliki *embrittlement* yang memadai sehingga energi yang diserap peluru ketika menumbuk objek tembak keras dapat mengakibatkan peluru hancur.

Jika ditinjau dari segi densitas, produk hasil permodelan ini masih tidak memenuhi standar untuk bisa tangguh ketika dipasang pada selongsong peluru. Beberapa hal menjadi alasan dari hasil permodelan ini masih jauh dari yang diharapkan, yang pertama diakibatkan oleh ukuran partikel yang digunakan. Pada prosesnya, serbuk tembaga dan serbuk timah yang digunakan pada *fine quality* (diameter dibawah 100 mikrometer) dan memiliki geometri *flake* (pipih). Dikarenakan keterbatasan spesifikasi perangkat untuk melakukan permodelan dan simulasi pada partikel dengan ukuran

dan geometri tersebut, digunakan partikel dengan jari – jari sebesar 500 mikrometer dengan geometri sphere, hal ini mengakibatkan volume pada cetakan menyisakan ruang kosong yang cukup besar yang diakibatkan oleh tumpukan partikel dengan geometri *sphere*. Partikel dengan geometri pipih (*flake*) memungkinkan tumpukan partikel yang lebih rapat tanpa menyisakan ruang kosong yang besar. Sehingga hal ini dapat meningkatkan *bulk density*, baik sebelum maupun sesudah proses kompaksi.

Faktor kedua, ditinjau dari dari tekanan kompaksi yang diberikan. Berdasarkan buku *Powder Metallurgy : Principles and Applications*, yang ditulis oleh Lenel, Fritz V., pada 1907, menunjukkan hubungan antara densitas *green compact* serbuk metal terhadap tekanan kompaksi yang diberikan.



**Gambar 4. 14** Grafik hubungan tekanan kompaksi terhadap densitas serbuk metal

Berdasarkan buku tersebut, tekanan kompaksi yang harus diberikan pada serbuk tembaga dengan kualitas kasar (*coarse*)

untuk mencapai densitas relatif mendekati 1 adalah mendekati 1000 MPa, sedangkan pada serbuk tembaga dengan kualitas baik (*fine*) dibutuhkan tekanan kompaksi lebih dari 1200 MPa. Maka dengan tujuan densitas *green compact* sebesar  $7,2 \text{ g/cm}^3 - 7,5 \text{ g/cm}^3$  pada proses kompaksi serbuk tembaga dengan kualitas *fine*, dibutuhkan setidaknya tekanan kompaksi pada range 600 – 800 MPa. Sedangkan jika dibandingkan dengan tekanan yang diberikan pada proses realitanya yaitu sebesar 700 Psi, angka ini masih terbilang jauh dari standar yang ditunjukkan grafik tersebut.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Daerah yang dekat dengan sumber tekanan memiliki tingkat kerapatan yang lebih baik daripada daerah yang jauh dari sumber tekanan, hal ini terlihat dari jumlah jumlah partikel yang mengisi lokal tersebut.
2. Terdapat hubungan berbanding lurus antara tekanan terhadap *bulk density*, dimana nilai *bulk density* terendah terjadi pada tekanan 500 Psi pada geometri *full round*, yaitu senilai 1614,21 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan nilai *bulk density* tertinggi terjadi pada tekanan 900 Psi pada geometri *full round* dengan nilai 1952,608 kg/m<sup>3</sup>.
3. Kecacatan yang terjadi pada produk *frangible bullet* tidak disebabkan oleh distribusi densitas yang tidak homogen, namun diakibatkan oleh densitas produk yang tidak memenuhi spesifikasi standar *frangible bullet* yang sesuai uji tembak.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran dari penelitian ini yang dapat dilakukan untuk menyempurnakan penelitian selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan validasi pada pemilihan ukuran partikel
2. Perlu dilakukan permodelan menggunakan perangkat komputer dengan spesifikasi yang lebih baik, sehingga ukuran partikel dapat dibuat lebih kecil sehingga lebih mendekati kondisi proses produksi pada kenyataannya
3. Perlu dilakukan simulasi pada proses *mixing* dan juga *sintering*, sehingga dapat ditemukan akar masalah secara menyeluruh dari produk *frangible bullet*

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Banovic, S.W. 2006. "Microstrucural Characterization and Mechanical Behavior of Cu-Sn *Frangible bullets*". **Material Science and Engineering**. USA: Gaithersburg.
- Bal'shin, M. Yu. 1938. **Powder Metallurgy (Metallokeramika)**. Russia
- Benini, Joseph C. 2001. **Frangible Metal Bullets, Ammunition, and Method of Making Such Articles**. Amerika Serikat. Nomer Paten: US 6,263,798 B1.
- P. A. Cundall, O. D. L. Strack. 1979. **Géotechnique "A discrete numerical model for granular assemblies"**. USA: University of Minnesota
- E. Paul, Degarmo. 1988. **Materials and processes in manufacturing**. USA
- Fritz V. Lenel. 1980. **Powder Metallurgy: Principles and Applications**. Germany: Munich
- German, Randall M. 1984. **Powder Metallurgy Science**. USA: Metal Powder Industries Federation.
- German, Randall M. 2005. **Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing**. Princetown, NJ: Metal Powder Industries Federation.
- Harthong B, J.-F. Jerier, P. Doremus. 2009. **Modeling of high-density compaction of granular materials by the Discrete Element Method**. France
- Hwan Cung, Suk., Kwon, Y. S., Jin Park, Seon., German, Randall M. 2010. **Modeling and Simulation of Press and Sinter Powder Metallurgy**. ASM International
- R. W. Heckel. 1961. **Density-Pressure Relationship in Powder Compaction**. Wilmington
- Ikasari D. 2017. **Simulasi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan terhadap Distribusi Green Density pada Kompaksi Serbuk Cu-10%wtSn dengan Metode Elemen Hingga**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Jhony, P. 2014. **Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Sintering terhadap Ikatan Logam Antar Muka pada Komposit Matrik Logam Cu-10%wtSn dengan Metode Metalurgi Serbuk**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Kelly. 2013. **Solid Mechanics Part I**. New Zealand: University of Auckland.
- Khalil. 2012. **Advanced Sintering of Nano-Ceramic Materials**. Sharjah: UEA
- Kruachaturrat, S dkk. 2009. "Sintering Cu-Sn Materials for *Frangible bullet*". **The 3<sup>rd</sup> Thailand Metallurgy Conference (TMETC 3): Metallurgical Research for Thailand Development**. Bangkok.
- Krok, Alexander., C.-Y. Wu. 2017. **Finite Element Modeling of Powder Compaction**. United Kingdom: University of Surrey.
- Larsson M., Molinari A., Amirabollahian S. 2013. **Effect of geometry and process variables on the anisotropy parameter K**. In: **Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials**. Princeton: New Jersey
- Mikko, Don., Michael K., J. Miller. 2008. **Frangible bullet, Dynamic Research Technologies. AFTE Journal Volume 40**.
- Mullins, J. F. 2001. **Frangible Ammunition: the New Face in Firearms Ammunition**. Boulder: Paladin Press. ISBN 1 – 58160 – 267 – 7.
- Peniel, A.Y.S. 2017. **Analisis Balistik Impak Peluru Frangible dengan Metode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rojek, Jerzy., Nosewicz, Szymon., Jurczak, Kamilia. 2015. **Discrete Element Simulation of Powder Compaction in Cold Uniaxial Pressing with Low Pressure**. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research of Polish Academy of Science

- Rydlo, M. 2010. **Ballistic Characteristics of Frangible Firearms Ammunition**. Brno: University of Defence.
- Rydlo, M. 2010. "Theoretical Criterion for Evaluation of the Frangibility Factor". **Advances in Military Technology**. Brno. Vol. 5 No. 2 57 – 67 ISSN 1802 – 2308.
- Selig, Stanley. 2012. **Finite Element Simulation of the Compaction and Springback of an Aluminium Powder Metallurgy Alloy**. Canada: Dalhousie University.
- Subhash C. Thakur, John P. Morrissey. 2014. **Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model**. UK: Edinburg University
- M. Dixit, R. K. Srivastava . 2018. **Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route**. Allahabad: India
- Thummler, F., Oberacker, R. 1993. **Introduction to Powder Metallurgy**. Leeds.
- Upadhyaya. G. S. 2002. **Powder Metallurgy Technology**. England: Cambridge International Science Publishing.
- P. Van Der Wel. 1999. **Powder handling and processing Vol.11 No.1**. Netherland  
American Elements. **Tin Powder**.  
<URL:<https://www.americanelements.com/tin-powder-7440-31-5>>.
- Copper Development Association Inc. **Characteristics and Properties of Copper and Copper Alloy P/M Materials**.  
<URL:[https://www.copper.org/resources/properties/129\\_6/characteristics\\_properties.html](https://www.copper.org/resources/properties/129_6/characteristics_properties.html)>.
- The Engineering Toolbox. **Poisson Ratio**.  
<URL:[https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d\\_1224.html](https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html)>.
- 80 Pometon Powder. **Tin Powder**.  
URL:<https://www.pometon.com/en/products/non-ferrous-powders/tin-powder/>>.
- EDEM®. EDEM manual: Theoretical background

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **Lampiran 1**

Pengelompokan lokasi partikel

*Softfile excel* pengelompokan lokasi partikel dapat diakses pada *link* berikut:

<https://intip.in/DataExcelFrangibleBullet>

## Lampiran 2

Pertimbangan pemilihan ukuran partikel

| ALT      | Ukuran Partikel |          |                 | Flat   |         | Hollow |         | Durasi Simulasi<br>(Generating Particle) |
|----------|-----------------|----------|-----------------|--------|---------|--------|---------|--|
|          |                 |          |                 | Jumlah |         | Jumlah |         |  |
| ALT<br>1 | r               | 0.1      | mm              | Cu     | 564.741 | Cu     | 564.737 | 128 JAM                                  |
|          | Vol.            | 0.00419  | mm <sup>3</sup> | Sn     | 62.749  | Sn     | 62.749  |  |
| ALT<br>2 | r               | 0.25     | mm              | Cu     | 36.144  | Cu     | 36.144  | 119 JAM                                  |
|          | Vol.            | 0.065476 | mm <sup>3</sup> | Sn     | 4.016   | Sn     | 4.016   |  |
| ALT<br>3 | r               | 0.5      | mm              | Cu     | 4.518   | Cu     | 4.518   | 31 JAM                                   |
|          | Vol.            | 0.52381  | mm <sup>3</sup> | Sn     | 502     | Sn     | 502     |  |

### Simulation ALT 1

status: processing  
 current time: 0.0072581 s  
 timestep: 1.4656e-08 s  
 estimated total computation time: 128.75 hours

### Simulation ALT 2

status: processing  
 current time: 0.0048315 s  
 timestep: 1.4656e-08 s  
 estimated total computation time: 119.34 hours

### Simulation ALT 3

status: processing  
 current time: 0.0087071 s  
 timestep: 7.3282e-08 s  
 estimated total computation time: 31.636 hours

### Lampiran 3

Properti material serbuk

| Properti        | Material              |                      | Satuan            |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
|                 | Tembaga               | Timah                |                   |
| Poisson's Ratio | 0.36                  | 0.36                 | -                 |
| Density         | 1500                  | 3500                 | Kg/m <sup>3</sup> |
| Young's Modulus | 117x10 <sup>6</sup>   | 50x10 <sup>9</sup>   | Pa                |
| Shear Modulus   | 4.3x10 <sup>7</sup>   | 1.8x10 <sup>10</sup> | Pa                |
| Mass            | 7.8x10 <sup>-7</sup>  | 1.8x10 <sup>-6</sup> | Kg                |
| Volume          | 5.2x10 <sup>-10</sup> | 5.2x10 <sup>10</sup> | m <sup>3</sup>    |

### Lampiran 4

Perhitungan gaya tekan

1. Geometri *Flat nose* pada tekanan 500 Psi

Diketahui :

Tekanan = 500 Psi

Luas area tekan = 0,00007314 m<sup>2</sup>

Dicari :

Gaya Tekan = ...?

Solusi :

Konversi satuan tekanan

500 Psi = 3.432.048 Pa

Menghitung Gaya Tekan

*Gaya Tekan (F) = Tekanan (P) × Luas Area Tekan (A)*

F = 3.432.048 x 0,00007314

F = 251,02 N

| Konversi |               | Luas Permukaan                        | Gaya yang dibutuhkan |
|----------|---------------|---------------------------------------|----------------------|
| Tekanan  | Tekanan       |                                       |                      |
| 500 Psi  | 3432048.13 Pa | 7,314x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> | 251.02 N             |
| 700 Psi  | 4804894.72 Pa | 7,314x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> | 351.43 N             |
| 900 Psi  | 6177741.32 Pa | 7,314x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> | 451.84 N             |

## Lampiran 5

Perhitungan *Bulk Density*

1. Geometri *Flat nose* pada Tekanan 500 Psi

Diketahui :

Volume akhir = 1540,89 mm<sup>3</sup>

Total massa = 0,00251 kg

Dicari :

Bulk Density = ...?

Solusi :

$$\text{Bulk Density} = \frac{m_s + m_l}{V_s + V_l + V_g}$$

$$\text{Bulk Density} = \frac{0,000251}{1540,89 \times 10^{-9}}$$

$$\text{Bulk Density} = 1628,928 \text{ kg/m}^3$$

| Geometri          | Tekanan (Psi) | Massa (kg) | Volume akhir (mm <sup>3</sup> ) | Bulk density (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|---------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| <i>flat nose</i>  | 500           | 0.00251    | 1540.89                         | 1628.92                           |
|                   | 700           | 0.00251    | 1401.14                         | 1791.39                           |
|                   | 900           | 0.00251    | 1289.80                         | 1946.03                           |
| <i>full round</i> | 500           | 0.00249    | 1554.94                         | 1614.21                           |
|                   | 700           | 0.00249    | 1410.08                         | 1780.04                           |
|                   | 900           | 0.00249    | 1285.46                         | 1952.60                           |

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Muhammad Burhanuddin merupakan anak ketiga dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Moh. Jamiluddin dan Ibu Kodriyah. Lahir pada 05 Juli 1998 di Bandar Seri Begawan, namun menjalani pendidikan di Indonesia. Menempuh pendidikan dari SDN Rejoagung II, SMPN I Ngoro, SMAN 3 Jombang, dan pendidikan Sarjana di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama masa perkuliahan di ITS, penulis aktif di beberapa kegiatan maupun organisasi. Pada tahun kedua, penulis menjadi staf Departemen Kewirausahaan HMM 2017/2018. Pada tahun ketiga menjadi pemandu pada kegiatan GERIGI ITS 2018 dan menjadi Sekretaris Umum HMM 2018/2019. Pada tahun keempat penulis menjadi anggota ITS Team Sapuangan 2019/2020 pada divisi *Administration and Finance*. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di CV. Karya Hidup Sentosa (KHS) atau yang lebih dikenal dengan produsen traktor Quick pada 2019, dimana penulis ditempatkan pada divisi Desain.

Mengenai saran dan kritik terkait tugas akhir, dapat menghubungi penulis melalui:

Email : [burhanm548@gmail.com](mailto:burhanm548@gmail.com)

No. Telp : 083857514458