

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Hot Press

Mesin *hot press* merupakan alat kempa yang digunakan untuk pengempaan panas pada industri pencetakan *plywood*, plastik, kayu dll. Mesin *hot press* terbagi menjadi beberapa jenis, antara lain adalah sebagai berikut.

2.1.1 Mesin Hot Press Hydraulic

Mesin ini merupakan mesin *hot press* yang proses penekanannya menggunakan sistem hidrolis yang dipompa menggunakan pompa hidrolis.. Mesin *hot press* jenis ini memiliki dua komponen utama yaitu komponen pemanas dan komponen penekan (Junaidi, Bukhari, & Nofriadi, 2011). Komponen penekan biasanya terdiri dari dongkrak hidrolis, sedangkan komponen pemanasnya berupa elemen kelistrikan yang diletakkan didalam plat penekan bagian atas dan bagian bawah. Adapun bentuk dari mesin *hot press* jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2. 1 Mesin *hot press* hidrolis

Prinsip kerja dasar dari mesin *hot press* hidrolis adalah melakukan pengepresan atau penekanan dengan memanaskan plat tekan pada bagian atas dan bawah, kemudian pompa hidrolis akan memompa dan menggerakkan plat tekan atas ke arah plat tekan bawah.

2.1.2 Mesin Hot Press Pneumatic

Mesin *hot press pneumatic* merupakan mesin kempa panas yang menggunakan desain *pneumatic* untuk menggerakkan silinder *pneumatic* pada waktu proses pengepresan (Saputro & Sakti, 2013). Mesin *hot press* jenis ini memiliki tiga variabel yang menentukan kualitas hasil cetak. Ketiga hal tersebut antara lain adalah tekanan, temperatur, dan waktu pengepresan. Penentuan tekanan yang tepat bertujuan untuk mengatur arah katup fluida yang mendorong silinder *pneumatic* untuk melakukan proses penekanan sedangkan penentuan temperatur bertujuan untuk memberikan kalor pada *bed* atau matras sesuai dengan material cetak yang digunakan. Penentuan waktu bertujuan untuk mengatur proses pengepresan pada benda kerja yang dipres.

2.1.3 Mesin Hot Press Manual

Mesin *hot press* manual merupakan mesin kempa panas dimana sistem penggerak penekan menggunakan sistem manual. Mesin *hot press* jenis ini merupakan mesin yang paling ergonomis dibanding dengan jenis-jenis lainnya. Mesin jenis ini bukan tanpa kekurangan, dikarenakan sistem penggerak yang masih manual, daya tekan yang dihasilkan kurang baik dibandingkan dengan mesin *hot press* jenis lainnya. Adapun bentuk mesin *hot press* jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2. 2 Mesin *hot press* manual

Sumber: (Faradis , Maksum, Maulana, Ratnasari, & Daulay, n.d.)

2.2 Medium Penghantar Panas (*Heat Transfer Medium*)

Medium penghantar panas merupakan medium yang digunakan untuk menghantarkan panas dari temperatur tinggi (sumber kalor) menuju temperatur rendah atau temperatur yang diinginkan

(Heat transfer medium , 2020). Secara ideal, medium penghantar panas memiliki beberapa kriteria antara lain (Wang, 2019):

- Memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi atau *specific enthalpy* yang besar
- Memiliki koefisien *heat transfer* yang tinggi.
- *Thermal conductivity* yang baik
- Memiliki titik beku yang sangat rendah
- Memiliki titik didih yang tinggi
- Memiliki viskositas yang rendah
- Memiliki densitas yang tinggi terutama pada aplikasi yang membutuhkan temperatur yang tinggi
- Tidak mudah terbakar atau *explosive*
- Tidak beracun

Adapun beberapa medium yang umum digunakan antara lain air, *steam* (uap), *Heat transfer oil*, *Molten-salt*, *liquid metal*, dan lain-lain (Wang, 2019).

2.2.1 Air

Air memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi sekitar 4.2 kJ/kg.K, entalpi penguapan spesifiknya tinggi sekitar 2000 kJ/kg dan entalpi lelehnya sebesar 333 kJ/kg, Air merupakan penghantar panas dan dingin yang sangat baik. Penggunaan air sebagai medium penghantar panas sangat efektif dan mudah untuk dikontrol. Namun demikian, penggunaan air hanya dibatasi hingga suhu 100°C saja dikarenakan ketika air mulai mendidih ia akan berubah fasa menjadi uap

2.2.2 Steam (Uap)

Penggunaan uap sebagai medium penghantar panas memiliki banyak keuntungan diantaranya adalah dapat dipindahkan melalui pipa dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur yang sangat tinggi dengan *energy losses* yang relatif rendah. Uap bertekanan dan bertemperatur tinggi tersebut akan diubah menjadi uap jenuh (*saturated steam*) dimana uap jenuh tersebut sangat efektif dalam mengeluarkan panas melalui proses kondensasi di *heat exchanger*.

2.2.3 Heat Transfer Oil (HTO)

Heat transfer oil atau dengan nama lain minyak penghantar panas merupakan minyak parafin yang sangat stabil dan telah dimurnikan yang dirancang untuk digunakan sebagai media perpindahan kalor atau panas. Minyak penghantar panas sudah sangat umum ditemui di lingkup industri yang membutuhkan sumber panas sebagai proses produksi utamanya. Dalam

aplikasinya, pemanasan dapat terjadi secara tidak langsung dengan mengalirkan minyak penghantar panas melalui panel pemanas. Adapun kriteria yang perlu diperhatikan dalam pemilihan minyak penghantar panas adalah sebagai berikut.

- Minyak harus memiliki titik nyala atau *flash point* yang tinggi sehingga tidak mudah terbakar dan menguap.
- Tidak mudah terjadi kerusakan pada ikatan kimianya atau rantai karbonnya. Kerusakan pada rantai karbon dapat diketahui dari perubahan warna yang terjadi pada minyak penghantar panas. Hal tersebut menandakan terjadinya oksidasi pada HTO.
- Tidak bersifat korosif yang dapat membawa kotoran yang ada didalam sistem pemanas.
- Mudah memberikan dan menyerap kalor serta mempunyai stabilitas *thermal* yang baik. Hal ini sangat penting dikarenakan pemanasan akan lebih cepat merata sehingga resiko terjadinya kebakaran dapat dikurangi.
- HTO mudah untuk dipindahkan atau digerakkan. Pertimbangan ini bertujuan untuk mengetahui apakah pelumas atau minyak dapat menghantarkan kalor dari sumber kalor ke media yang lain.

Adapun keuntungan dari penggunaan HTO sebagai medium penghantar panas dibandingkan medium lainnya antara lain (Kiswanto, 2019):

- Memiliki efisiensi termal sebesar 5% hingga 8% lebih baik dibandingkan penggunaan uap. Hal ini dikarenakan pada sistem uap konvensional, banyak terjadi *heat loss*.
- Medium HTO mampu dioperasikan pada tekanan atmosfer sehingga lebih menghemat biaya pengeluaran karena tidak perlu mengeluarkan biaya untuk meningkatkan tekanan.
- HTO tidak bersifat korosif sehingga tidak menyebabkan abrasi pada logam.
- Pengontrolan suhu pada sistem pemanas pelumas langsung dilakukan pada temperatur pelumasnya, sehingga lebih akurat dibandingkan dengan *steam boiler* yang diatur dengan cara mengatur tekanan kerja dari sistem pemanas.

2.2.4 Molten Salt (Garam Cair)

Medium garam cair merupakan garam yang berbentuk padat ketika suhu dan tekanan standar tetapi ketika terjadi kenaikan temperatur dan tekanan yang tinggi, garam tersebut akan berubah fasa menjadi cair. *Molten salt* terdiri dari campuran eutektik dari sodium nitrat dan potasium nitrat. Keuntungan dari garam cair adalah suhu operasi yang sangat tinggi (1000°F / 538°C atau lebih tinggi) dibandingkan dengan air atau oli. Garam cair dapat menggantikan minyak organik atau sintetis dalam aplikasi perpindahan panas. Meskipun garam cair

menawarkan manfaat besar karena suhu operasinya yang tinggi, garam cair juga dapat memiliki sifat yang tidak diinginkan dengan titik beku yang sangat tinggi (120 °C hingga 220 °C). Adapun bentuk dari garam cair dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 3 Molten salt

2.2.5 Liquid Metal

Liquid metal atau logam cair merupakan medium *coolant* dengan kelas yang spesifik. Keuntungan dari penggunaan medium jenis ini ialah konduktivitas termal yang tinggi pada aliran yang identik, sehingga meningkatkan koefisien *heat transfer* (Zeigarnik & Albertovic, 2011). Fitur pembeda lainnya pada *liquid metal* adalah uap yang dihasilkan bertekanan rendah sehingga memungkinkan dilakukannya pengerjaan pada temperatur tinggi bertekanan rendah. Konduktivitas termal yang tinggi dan bilangan Prandtl yang rendah dari logam cair menyiratkan bahwa perpindahan panas oleh molekular konduktivitas termal signifikan tidak hanya terjadi di lapisan dinding dekat, tetapi juga terjadi di inti aliran bahkan dalam aliran turbulen yang berkembang penuh. Ketebalan lapisan batas termal terbukti jauh lebih besar daripada ketebalan lapisan batas hidrodinamik. Adapun bentuk dari logam cair dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 4 *Liquid metal*

2.3 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Perpindahan panas atau kalor (*heat transfer*) adalah ilmu untuk memprediksi perpindahan energi yang terjadi akibat dari perbedaan temperatur antar benda atau material. Perpindahan kalor tidak hanya sekedar memprediksi dan menjelaskan bagaimana energi kalor dipindahkan, tetapi juga untuk memprediksi seberapa besar laju perubahan kalor pada kondisi tertentu. Hal inilah yang membedakan antara ilmu perpindahan kalor dengan termodinamika. Panas atau kalor merupakan suatu bentuk energi yang berpindah karena adanya perbedaan temperatur antara kedua benda atau material (Holman, 1997). Menurut Cengel, panas atau kalor tersebut akan bergerak temperatur yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Ketika panas atau kalor bergerak maka terjadi perpindahan panas dan akan berhenti ketika kedua tempat / benda telah memiliki temperatur yang sama. (Cengel, Heat Transfer, 2003).

Perpindahan panas terjadi melalui tiga cara yaitu konduksi; konveksi; dan radiasi. Berikut merupakan pengertian dan penjelasan mengenai ketiga cara perpindahan panas tersebut.

2.3.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi atau hantaran merupakan kondisi aliran kalor dimana kalor akan berpindah tanpa disertai oleh gerakan zat menuju benda atau material yang memiliki perbedaan temperatur. Konduksi termal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat. Konduksi termal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Persamaan yang digunakan pada perpindahan panas konduksi disebut dengan Hukum Fourier, sehingga:

$$q_{konduksi} = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

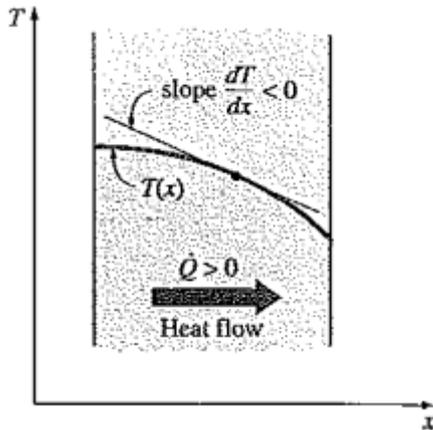
Dimana :

q = Laju perpindahan panas (W)

A = Luas Penampang (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ = Perubahan temperatur sepanjang sumbu x

k = konduktivitas thermal benda atau material (W/m.°C)



Gambar 2. 5 Gradien penurunan temperatur dT/dX

Sumber : (Cengel, Heat and Mass Transfer : A Practical Approach Third Edition, 2006)

Dari gambar 2.6, dapat dilihat bahwa gradien suhu dt/dX merupakan kemiringan (*slope*) dari kurva temperature pada diagram T-x diatas. Berdasarkan hal tersebut, gradien suhu akan menjadi negatif apabila kalor dialirkan kearah sumbu x positif.

2.3.2 Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi merupakan salah satu cara perpindahan kalor dimana kalor berpindah akibat gerakan zat-zat yang dipanaskan. Proses perpindahan kalor secara aliran/konveksi merupakan satu fenomena permukaan. Proses konveksi hanya terjadi di permukaan benda. Keadaan permukaan dan keadaan sekelilingnya serta kedudukan permukaan itu adalah yang utama. Lazimnya, keadaan keseimbangan termodinamik di dalam bahan akibat proses konveksi, suhu permukaan bahan akan berbeda dari suhu sekelilingnya (Kern, 1950).

Apabila suatu benda dapat berhubungan (kontak) dengan fluida yang berbeda suhunya, akan terjadi perpindahan panas (energi) secara konveksi, dari benda bersuhu tinggi ke fluida bersuhu rendah (atau sebaliknya jika suhu fluida lebih tinggi). Dengan mensubstitusikan koefisien perpindahan panas konveksi h (W/m.°C). Maka menghitung laju perpindahan panas konveksi dapat dilakukan menggunakan rumus:

$$q_{konveksi} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Dimana :

- q = Laju perpindahan panas (W)
- h = Koefisien Konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- A = Luas Penampang (m^2)
- T_s = Temperatur benda ($^\circ C$)
- T_∞ = Temperatur Lingkungan ($^\circ C$)

Koefisien perpindahan panas konveksi h bergantung pada beberapa variable seperti jenis konveksi yang terjadi dan properti udara sehingga sulit untuk menentukannya. Jika satu fluida dipaksa mengalir diatas permukaan benda padat, maka lapisan fluida dengan permukaan lengket pada permukaan itu. Artinya sangat tipis dari fluida dianggap memiliki kecepatan nol pada permukaan padat. Fenomena ini disebut sebagai kondisi tanpa slip.

Rumus bilangan Prandtl :

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (2.3)$$

Dimana :

- v = Viskositas Kinematik ($\frac{m^2}{s}$)
- α = Penyerapan panas ($\frac{m^2}{s}$)
- μ = Viskositas dinamis (Kg/m.s)
- Cp = Panas Spesifik (J/Kg.k)
- k = konduktivitas thermal benda atau material (W/m. $^\circ k$)

Apabila diketahui viskositas kinematik, maka untuk mencari bilangan Reynolds yang digunakan untuk mencari nilai koefisien kalor (h) adalah

$$Re = \frac{V_\infty \cdot D}{v} \quad (2.4)$$

Dimana :

- Re = Bilangan Reynolds
- V_∞ = Kecepatan udara (m/s)
- D = Diameter benda (m)
- v = Viskositas kinematik ($\frac{m^2}{s}$)

Sedangkan apabila yang diketahui adalah viskositas dinamik maka bilangan p adalah sebagai berikut

$$Re = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot D}{\mu} \quad (2.5)$$

- ρ = Massa Jenis (Kg/ m^3)

V_{∞} = Kecepatan udara (m/s)

D = Diameter benda (m)

μ = Viskositas dinamik ($\frac{Kg}{m.s}$)

Untuk mencari nilai koefisien konveksi pada konveksi alami, yang harus dilakukan mula-mula adalah menentukan bilangan Rayleigh dimana bilangan Rayleigh dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (2.6)$$

Keterangan :

g = percepatan gravitasi (m^2/s)

β = koefisien ekspansi termal ($\frac{1}{^{\circ}C}$)

T_s = Temperatur permukaan ($^{\circ}C$)

T_{∞} = Temperatur lingkungan ($^{\circ}C$)

L_c = Panjang kritis (m)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

Pr = Bilangan Prandtl

Setelah memperoleh bilangan Rayleigh, bilangan tersebut digunakan untuk mencari angka *Nusselt* dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (2.7)$$

Dimana :

Nu = Angka Nusselt

pr = Angka Prandtl

Koefisien konveksi (h) dapat dicari menggunakan

$$h = \frac{k}{L_c} Nu \quad (2.8)$$

Dimana :

h = Koefisien konveksi ($\frac{W}{m^2} \cdot C$)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

L_c = Panjang kritis (m)

Nu = Angka Nusselt

2.3.3 Perpindahan Panas Radiasi

Pada proses radiasi, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan) dan absorpsi (diserap) dan menjadi kalor (Holman, 1997).

2.4 Keseimbangan Energi (*Energy Balance*)

Energy balance merupakan Total perubahan energi yang terjadi pada sistem ketika terjadi suatu proses adalah sama dengan total perbedaan energi yang masuk dan keluar sistem ketika proses tersebut terjadi (Cengel & Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach* 8th edition, 2015). Berdasarkan hal tersebut, *energy balance* dapat diekspresikan menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta E_{System} = E_{in} - E_{out} \quad (2.9)$$

Pada sebuah *boundary*, volume yang keluar masuk kedalam *control volume* dalam bentuk energi dan materi. Terdapat dua bentuk Energi yang mempengaruhi *boundary* yaitu energi panas (kalor) dan kerja yang dilakukan pada *control volume* tersebut (Cengel & Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach* 8th edition, 2015). Oleh karena itu hukum termodinamika pertama dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$\Delta E_{System} = Q - W \quad (2.10)$$

Keterangan :

ΔE_{System} = Perubahan total energi pada suatu sistem

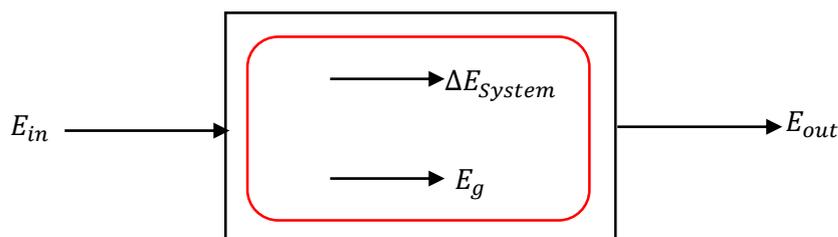
Q = Kalor yang masuk atau keluar sistem

W = Kerja yang diberikan kedalam sistem

Apabila persamaan tersebut diekspresikan per satuan waktu, maka persamaannya akan menjadi :

$$\frac{dE_{system}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.11)$$

Penjumlahan energi termal dan energi mekanis akan membentuk energi lain yang disebut *energy generated* seperti pada gambar skema 2.7. Oleh karena itu persamaan *energy balance* akan berubah bentuk menjadi sebagai berikut



Gambar 2. 6 Skema *energy balance*

$$\Delta E_{System} = E_{in} - E_{out} + E_g \quad (2.12)$$

Hukum pertama termodinamika merupakan energi total yang terdiri dari energi kinetik, energi potensial, dan energi dalam. Pada perpindahan panas, energi dalam dapat dibagi menjadi energi termal (panas) dan mekanis. Kerja yang terjadi pada suatu *control volume* dapat dipisahkan menjadi dua yaitu kerja yang dihasilkan oleh control volume itu sendiri \dot{W}_{cv} dan kerja yang berhubungan dengan tekanan fluida. Kerja yang berhubungan dengan tekanan fluida dapat dicari dengan mengalikan gaya normal dengan kecepatan di mana gaya normal akibat tekanan tersebut merupakan perkalian antara tekanan dan luas penampang. Berdasarkan hal tersebut, maka persamaannya menjadi sebagai berikut.

$$\dot{W} = \dot{W}_{cv} + p \times A \times V \quad (2.13)$$

Dengan $A \times V = m \dot{\times} v$ maka persamaan *energy balance* dapat ditulis

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{out} \quad (2.14)$$

Dimana :

\dot{Q} = Kalor yang dipindahkan per satuan waktu (Watt)

\dot{W} = Kerja yang dihasilkan per satuan waktu (Watt)

\dot{m} = Massa per satuan waktu (kg/s)

h = Enthalpy (KJ/Kg)

V = Kecepatan (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.5 Thermal Insulation

Thermal insulation atau isolasi termal adalah material yang digunakan untuk mengurangi laju perpindahan panas dari sumber panas ke lingkungan (Wiwin, 2009). Perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur dari temperatur tinggi menuju ke temperatur yang rendah. Isolasi biasanya digunakan pada sistem perpipaan yang mengalirkan fluida panas. Selain pada sistem perpipaan, isolasi termal juga bisa digunakan pada peralatan mekanik seperti *valve*, *flange*, dan benda lain yang membutuhkan pengurangan *heat loss*.

Material yang digunakan sebagai isolasi termal ialah material yang memiliki konduktivitas termal rendah. Contoh material isolasi adalah *rockwool*, *ceramic*, *asbestos*, *calcium silicate*, *mineral wool*, *corkboard*, *wood* dan lainnya. Konduktivitas termal pada material juga sangat bergantung pada beberapa variabel seperti temperatur kerja, densitas, jenis, dan juga kuantitas material.

2.6 Standar Deviasi

Variabilitas data juga dikenal sebagai penyebaran atau dispersi, mengacu pada seberapa tersebar nya sekumpulan data. Cara yang paling umum untuk mengetahui variability suatu data yaitu dengan menggunakan *variance* dan standard deviasi (Aczel & Sounderpandian, 2008). jika nilai *variance* rendah maka diartikan bahwa data menyebar di sekitar rata-rata. Apabila nilainya tinggi maka sebaliknya. karena unit dari *variance* adalah kuadrat maka agar benar-benar bermanfaat maka dicari standard deviasi. rumus standar deviasi sendiri adalah hanya melakukan akar pada nilai *variance*, sehingga memiliki skala yang sama dengan dataset. pada umumnya rumus *variance* dan standar deviasi dibagi menjadi sampel dan populasi. Adapun rumus *variance* untuk data sampel adalah sebagai berikut.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \quad (2.15)$$

Berdasarkan rumus *variance* diatas, maka rumus standar deviasi untuk sampel adalah sebagai berikut

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2.16)$$

Dimana :

$$s^2 = \text{Variance}$$

s = standar deviasi

x_i = data ke-i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

\bar{x} = rata-rata sampel

n = Jumlah data

Sedangkan untuk populasi rumus *variance* yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \mu)^2}{N} \quad (2.17)$$

Berdasarkan rumus *variance* diatas, maka rumus standar deviasi untuk populasi adalah sebagai berikut

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (2.18)$$

Dimana :

$$\sigma^2 = \text{Variance}$$

σ = standar deviasi

x_i = data ke-i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

μ = rata-rata sampel

N = Jumlah data