

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh Hisham A. H. Al-Khazali dan Mohamad R. Askari (2012) berjudul *Defect Diagnosis in Rotors Systems by Vibrations Data Collectors Using Trending Software* mengungkapkan bahwa pengukuran getaran dapat secara andal mendiagnosis masalah kinerja pada mesin dan produk mekanis terkait. Penggunaan pengumpul data getaran efektif untuk mengukur dan menganalisis konten getaran mesin pada gearbox, mesin, turbin, kipas, kompresor, pompa, dan bearing.

Dalam penelitian oleh Bagus Tris Atmaja, Haris Ihsannur, Suyanto, dan Dhany Arifianto (2022) berjudul *Lab-scale Vibration Analysis Dataset and Baseline Methods for Machinery Fault Diagnosis with Machine Learning*, disajikan dataset sinyal getaran dari mesin skala laboratorium yang mencakup empat kondisi mesin yang berbeda: normal, unbalance, misalignment, dan bearing fault. Tiga metode pembelajaran mesin (SVM, KNN, dan GNB) dievaluasi pada dataset ini, dengan hasil terbaik dicapai oleh SVM dengan akurasi 99,75% pada validasi silang 5-lipat.

Oliver Mey, Willi Neudeck, André Schneider, dan Olaf Enge-Rosenblatt (2020) dalam penelitian berjudul *Machine Learning-Based Unbalance Detection of a Rotating Shaft Using Vibration Data* mengembangkan metode deteksi unbalance pada poros berputar menggunakan data getaran dan pembelajaran mesin. Mereka menggunakan dataset yang direkam dengan tiga sensor pada poros berputar dan menguji beberapa algoritma, termasuk jaringan saraf tiruan dan hutan acak, untuk mendeteksi unbalance.

Luis A. Pinedo-Sanchez, Diego A. Mercado-Ravell, dan Carlos A. Carballo-Monsivais (2020) dalam penelitian berjudul *Vibration Analysis in Bearings for Failure Prevention using CNN* mengusulkan metode berbasis Convolutional Neural Networks (CNN) untuk

memperkirakan tingkat keausan pada bearing. Mereka menggunakan data getaran mentah yang diubah menjadi gambar kecil persegi dan kemudian diklasifikasikan menggunakan model CNN untuk mendiagnosis sistem rotasi.

Dalam artikel oleh Dynamox (2023) berjudul *Vibration analysis in industrial machinery: main gains*, dijelaskan bahwa analisis getaran dalam mesin industri adalah teknik yang digunakan untuk memantau dan mendiagnosis perilaku aset selama operasi dan menilai kondisi operasionalnya. Analisis ini didasarkan pada deteksi dan pengukuran variasi getaran.

Artikel oleh Valmet (2021) berjudul *Vibration analysis - introduction to techniques and equipment* memberikan pengantar yang jelas dan efektif mengenai teknik analisis getaran, termasuk prinsip dasar, peralatan, dan instrumen yang digunakan, serta metode untuk mengidentifikasi masalah komponen tertentu melalui analisis spektral.

Artikel oleh Tractian (2023) berjudul *Vibration Analysis: The Complete Guide* menjelaskan bahwa analisis getaran sering digunakan untuk mengidentifikasi tanda-tanda awal keausan pada peralatan berputar, serta memprediksi kemungkinan kerusakan dan kegagalan. Dengan memantau tingkat getaran dari waktu ke waktu, insinyur dapat melihat apakah mesin mulai menunjukkan tanda-tanda masalah.

Dalam penelitian oleh Eka Taufiq Firmansjah (2017) berjudul *Sistem Pengukuran dan Analisis Getaran Paksa Akibat Eksitasi Massa Tak Balans Pada Alat Uji TQ TM-102 Berbasis LabVIEW*, dikembangkan sistem pengukuran dan analisis getaran paksa akibat eksitasi massa tak balans pada alat uji TQ TM-102 berbasis LabVIEW. Sistem ini dapat digunakan untuk menganalisis getaran pada mesin industri.

Dalam artikel oleh Emerson (2017) berjudul *Vibration Analysis for Machinery Health Diagnosis*, dijelaskan bahwa analisis getaran frekuensi tinggi dapat mendeteksi kekurangan pelumasan. Artikel ini juga membahas karakteristik gelombang getaran yang khas dan bagaimana analisis spektrum dapat digunakan untuk mendiagnosis kondisi mesin.

Dalam artikel oleh Leapfactor (2023) berjudul *Vibration Monitoring System (VMS)*, dijelaskan bahwa monitor getaran adalah perangkat yang digunakan untuk memantau getaran pada mesin atau peralatan industri. Alat ini membantu mendeteksi perubahan pola getaran yang bisa menjadi tanda kerusakan atau potensi kegagalan mesin, memungkinkan langkah pencegahan diambil sebelum masalah menjadi lebih serius.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Getaran (*Vibration*) Pada Mesin Manufaktur (Produksi)

Getaran (*vibration*) yang berbahaya dalam permesinan umumnya terjadi pada mesin-mesin berkecepatan tinggi yang memiliki bagian poros yang berputar. Walaupun perlengkapan seperti motor *spindle* mesin *milling* dapat saja didisain agar gaya-gaya yang bekerja secara teoretis dapat mengatasi masalah getaran, kondisi yang ideal tidak mungkin dicapai. Dalam beberapa kasus, para disainer harus memastikan amplitudo (*magnitudo*) dari gaya-gaya maupun frekuensinya. Para disainer harus lebih dari sekedar berusaha untuk meyakinkan bahwa komponen (struktur) pendukung tidak akan memiliki frekuensi natural (*natural frequency*) yang mendekati frekuensi operasi mesin tersebut sehingga terjadinya resonansi yang bersifat merusak dapat dihindari. Bilamana frekuensi impuls sangat besar (diatas 1000 rpm), struktur pendukung mungkin memiliki sebuah frekuensi natural yang lebih kecil dari konstruksinya, dimana keduanya tidak akan bergetar secara harmonik yaitu dalam resonansi. Kemungkinan zona yang berbahaya berkisar antara 200 s.d. 500 rpm. Namun demikian, walaupun frekuensi mesin dapat ditetapkan oleh pabrik pembuatnya, mungkin saja sangat sulit untuk membuat sebuah estimasi yang akurat tentang frekuensi natural dari vibrasi fondasi maupun struktur pendukungnya.

Hal ini diusahakan agar tidak melebihi 30 — 50% dari frekuensi terendah mesin atau berkisar diatas 200 — 300% diatas frekuensi mesin yang bekerja. Tentunya, bilamana motor berputar pada saat *starting* untuk menaikkan kecepatannya dari kondisi diam,

akan terjadi saat-saat dimana frekuensi impuls akan sama dengan frekuensi struktur pendukung, tetapi kemungkinan ini tidak akan berlangsung *secara* permanen, dimana efeknya dapat diabaikan. Namun demikian, perubahan kecepatan motor yang bekerja cukup lambat dapat menyebabkan masalah vibrasi. Oleh karena itu, fondasinya harus di desain untuk kondisi yang benar-benar sesuai. (Dunham, Clarence W.1962)

2.2.2 Getaran Axial

Getaran axial adalah getaran yang terjadi sepanjang sumbu poros atau arah panjang utama komponen mesin. Pergerakan benda yang bergetar sejajar dengan arah poros, sehingga bergerak maju-mundur mengikuti garis poros. Contohnya adalah getaran pada poros pengaduk mesin permen yang bergerak ke depan dan ke belakang akibat ketidakseimbangan massa rotor atau gaya dorong dari bearing. Secara teoritis, getaran axial muncul karena adanya gaya internal yang bekerja sepanjang sumbu mesin, seperti eksitasi dari unbalance atau tekanan pada bearing. Analisis getaran axial penting sebagai indikator kesehatan poros dan bearing, karena getaran berlebih dapat mengindikasikan adanya keausan atau ketidakselarasan yang dapat mempengaruhi kinerja mesin dan umur pakai komponen.

2.2.3 Getaran Horizontal

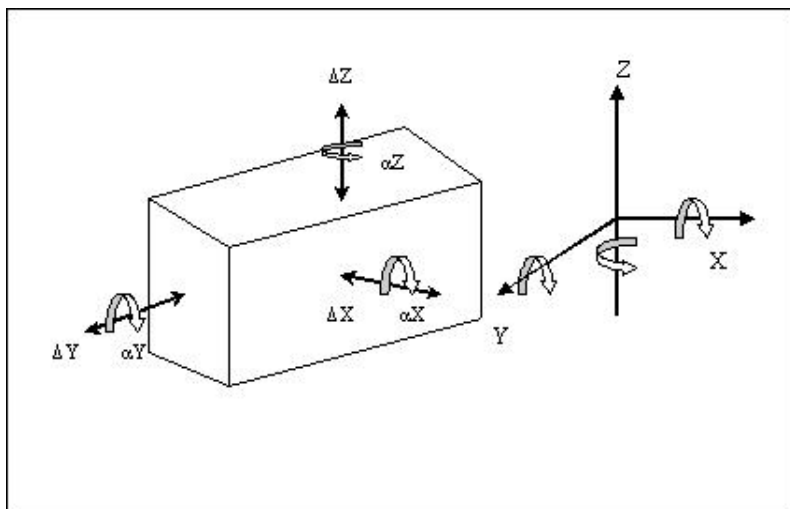
Getaran horizontal terjadi tegak lurus terhadap sumbu poros dan sejajar dengan permukaan lantai atau bidang horizontal mesin. Arah pergerakan komponen mesin mengikuti sumbu horizontal, bergerak ke kiri dan ke kanan. Contoh getaran horizontal terlihat padaudukan motor atau rangka mesin permen ketika pengaduk beroperasi dengan beban adonan 1 kg. Dalam landasan teori, getaran horizontal biasanya disebabkan oleh ketidakseimbangan massa rotor, misalignment, atau beban lateral yang bekerja pada mesin. Pengukuran dan analisis getaran horizontal membantu menentukan titik kritis pada mesin yang menerima beban lateral, sehingga perancangan dudukan, motor, dan rangka dapat lebih stabil dan aman.

2.2.4 Getaran Vertikal

Getaran vertikal terjadi tegak lurus terhadap permukaan horizontal, yaitu arah atas-bawah. Getaran ini menunjukkan pergerakan komponen mesin ke atas dan ke bawah, seperti yang terjadi pada bearing atau rangka mesin saat pengaduk bekerja. Secara teori, getaran vertikal muncul akibat gaya gravitasi, ketidakseimbangan rotor, atau eksitasi dari beban vertikal yang diterapkan pada mesin. Analisis getaran vertikal menjadi penting dalam landasan teori karena dapat menunjukkan potensi kerusakan pada bearing atau rangka mesin, dan memberikan informasi mengenai kestabilan operasional mesin, serta bagaimana distribusi beban adonan 1 kg mempengaruhi getaran secara keseluruhan.

2.3 Vibrasi Pada Saat Mesin Berputar

Jika diberikan tiga buah gaya dalam arah x , y , dan z seperti diilustrasikan pada gambar 1, balok tersebut akan cenderung berputar translasi terhadap tiga buah sumbu, yaitu balok yang memiliki enam derajat kebebasan. Sistem itu bisa saja berupa gerak tertentu yang terkekang, dalam hal ini terdapat paling tidak enam derajat kebebasan. Sebagai contoh, bila balok dapat berpindah hanya *secara* vertikal, terdapat satu derajat kebebasan. Balok persegi dalam gambar 1 dipilih agar lebih menarik. Pada kenyataannya, bentuknya bisa terdapat dalam berbagai bentuk, tetapi bentuk persegi akan menjadikan formula model matematikanya menjadi lebih mudah dibandingkan bentuk yang lain.



Gambar 2. 1 Balok Fondasi Persegi dengan Suatu Harga Maksimum dari Enam

Derajat Kebebasan (*three displacement and three rotations*)

Perhatikan gerak dari sebuah elemen yang ditempatkan pada sebuah pegas seperti diilustrasikan dalam gambar 2.1. yang menunjukkan sebuah jarak kecil x dari posisi kesetimbangannya. Persamaan diferensial menjabarkan perpindahan elemen setelah dilepaskan yang diperoleh dengan penjumlahan gaya dalam arah vertikal (Andrew Dimarogonas, 1996).

2.4 Gerak Harmonik

Gerak osilasi dapat berulang *secara teratur*. Jika gerak itu berulang dalam selang waktu yang sama, maka geraknya disebut gerak periodik. Waktu pengulangan τ disebut dengan periode osilasi dan kebalikannya, $f = 1/\tau$ disebut frekuensi. Jika gerak dinyatakan dalam fungsi waktu $x(t)$, maka setiap gerak periodik harus memenuhi hubungan $(t) = x(1 + \tau)$. Secara umum, gerak harmonik dinyatakan dengan persamaan:

$$x = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana A adalah amplitudo osilasi yang diukur dari posisi setimbang massa, dan τ adalah periode dimana gerak diulang pada $t = \tau$.

Gerak harmonik sering dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak melingkar dengan kecepatan tetap pada suatu garis lurus, seperti terlihat pada gambar 2.11. Dengan kecepatan sudut garis OP sebesar ω , perpindahan simpangan x dapat dituliskan sebagai:

$$x = A \sin \omega t \dots\dots\dots (2.2)$$

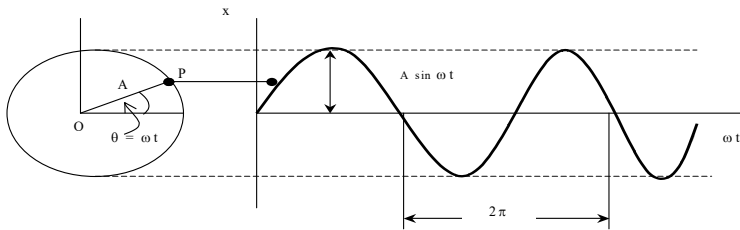
Besaran ω biasanya diukur dalam radian per detik dan disebut frekuensi lingkaran. Oleh karena gerak berulang dalam 2π radian, maka didapat hubungan:

$$\omega = \frac{2\pi}{t} = 2\pi f \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan τ dan f adalah periode dan frekuensi gerak harmonik berturut-turut dan biasanya diukur dalam detik dan siklus per detik.

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh secara mudah dengan diferensiasi simpangan gerak harmonik. Dengan menggunakan notasi titik untuk turunannya, maka didapat:

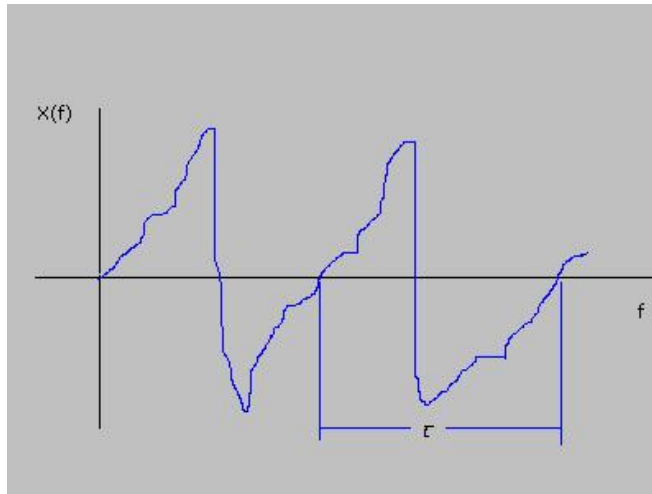
$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega A \cos \omega t = \omega A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots \\ \ddot{x} &= -\omega^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin (\omega t + \pi) \end{aligned} \dots\dots\dots ..(2.4)$$



Gambar 2. 2 Gerak Harmonik sebagai Proyeksi Suatu Titik yang Bergerak Pada Lingkaran

2.5 Gerak Periodik

Pada getaran biasanya beberapa frekuensi yang berbeda ada *secara* bersama-sama. Sebagai contoh, getaran dawai biola terdiri dari frekuensi dasar f dan semua harmoniknya $2f$, $3f$, dan seterusnya. Contoh lain adalah getaran bebas sistem dengan banyak derajat kebebasan, dimana getaran pada tiap frekuensi natural memberi sumbangannya. Getaran semacam ini menghasilkan bentuk gelombang kompleks yang diulang *secara* periodik seperti gambar berikut (William T. Thomson, Lea Prasetya, 1995).



Gambar 2. 3 Gerak Periodik dengan Periode

2.6 Getaran Bebas (*Free Vibration*)

Getaran bebas adalah getaran yang terjadi ketika suatu sistem mekanis berosilasi akibat adanya energi awal yang tersimpan dalam sistem, tanpa adanya gaya luar yang terus-menerus bekerja. Energi awal ini biasanya berasal dari perpindahan awal, tumbukan, atau pelepasan gaya tertentu yang diberikan pada sistem. Menurut William T. Thomson (1995), getaran bebas merupakan respon alami suatu sistem terhadap energi awal yang diberikan, dan osilasinya berlangsung pada frekuensi alami (*natural frequency*) sistem tersebut.

Dalam konteks mesin pembuat permen sari nanas dengan beban adonan 1 kg, getaran bebas dapat terjadi pada komponen-komponen mesin seperti poros pengaduk, dudukan motor, maupun rangka mesin. Misalnya, jika mesin dimatikan tiba-tiba setelah proses pengadukan berlangsung, sisa energi kinetik pada poros atau bearing akan menyebabkan osilasi kecil yang berlangsung sesaat. Frekuensi alami

dari komponen mesin ini dipengaruhi oleh massa adonan, kekakuan poros, serta sifat material rangka mesin.

Analisis terhadap getaran bebas pada mesin pembuat permen sangat penting, karena:

1. Identifikasi frekuensi natural – untuk mengetahui pada frekuensi berapa mesin cenderung bergetar sendiri.
2. Mencegah resonansi – jika frekuensi natural komponen mesin berdekatan dengan frekuensi kerja motor atau getaran paksa akibat putaran pengaduk, maka resonansi dapat terjadi dan menimbulkan kerusakan.
3. Stabilitas operasi – pemahaman karakteristik getaran bebas membantu dalam perancangan rangka mesin agar lebih kokoh, serta mengurangi risiko retak las atau keausan komponen akibat getaran berulang.

2.7 Getaran Paksa (*Forced Vibration*)

Berbeda dengan getaran bebas, getaran paksa terjadi ketika suatu sistem bergetar karena adanya gaya luar yang bekerja secara terus-menerus. Gaya luar ini dapat berupa gaya periodik, gaya acak, atau gaya impulsif. Apabila gaya luar tersebut beresilasi pada frekuensi tertentu, maka sistem akan dipaksa bergetar pada frekuensi rangsangan (*forcing frequency*). Jika frekuensi rangsangan ini mendekati atau sama dengan frekuensi natural sistem, maka akan timbul fenomena resonansi yang dapat memperbesar amplitudo getaran secara drastis.

Dalam mesin pembuat permen sari nanas, getaran paksa utamanya bersumber dari:

1. Motor penggerak – putaran motor listrik menghasilkan gaya dinamis periodik yang ditransmisikan ke poros dan rangka mesin.
2. Putaran pengaduk – adanya ketidakseimbangan massa pada pengaduk atau ketidakhomogenan beban adonan (1 kg) menimbulkan gaya sentrifugal yang berubah-ubah, sehingga menghasilkan getaran paksa.
3. Kontak adonan dengan dinding wadah – interaksi mekanis antara pengaduk, adonan, dan dinding wadah juga menjadi sumber getaran acak selama proses berlangsung.

Getaran paksa sangat relevan dengan penelitian ini, karena mesin pembuat permen selalu beroperasi dengan adanya gaya luar yang berulang, yaitu dari motor dan beban adonan. Dengan melakukan pengukuran getaran pada titik kritis sepertiudukan motor, housing bearing, poros pengaduk, dan rangka mesin, dapat diketahui:

1. Seberapa besar amplitudo getaran akibat beban adonan 1 kg.
2. Apakah terdapat kecenderungan mendekati resonansi pada kecepatan operasi tertentu.
3. Dampaknya terhadap kualitas hasil adonan, misalnya jika getaran terlalu tinggi bisa menyebabkan ketidakseragaman tekstur permen.

2.8 Resonansi

Resonansi adalah kondisi ketika frekuensi gaya luar yang bekerja pada sistem sama atau sangat mendekati frekuensi alami sistem tersebut. Pada kondisi ini, amplitudo getaran meningkat signifikan karena energi dari gaya luar terakumulasi secara berulang pada sistem. Resonansi yang tidak terkendali dapat mengakibatkan kerusakan komponen mekanis, mempercepat keausan, hingga menurunkan umur pakai mesin. Pada mesin pembuat permen sari nanas beban 1 kg, resonansi dapat muncul apabila kecepatan putaran motor atau pengaduk menghasilkan frekuensi getaran yang berimpit dengan frekuensi alami rangka atau poros pengaduk. Misalnya, saat motor bekerja pada putaran tertentu, rangka mesin dapat mengalami getaran yang berlebihan akibat resonansi, sehingga baut longgar, las retak, atau bahkan menurunkan kualitas adonan karena ketidakstabilan selama proses pencampuran.

Oleh karena itu, identifikasi potensi resonansi melalui analisa getaran sangat penting dalam penelitian ini. Dengan mengetahui rentang kecepatan putar yang aman, mesin dapat dioperasikan pada kondisi stabil, menghasilkan adonan yang homogen, serta memperpanjang usia pakai komponen mesin.

2.9 Alat Ukur Pengujian

2.9.1 Vibration Meter

Vibration meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur getaran pada mesin, baik dalam arah axial, horizontal, maupun vertikal, dengan satuan percepatan (m/s^2), kecepatan (mm/s), atau perpindahan (mm). Alat ini bekerja dengan sensor yang ditempelkan pada titik pengukuran mesin untuk mendeteksi gerakan getaran, lalu mengubahnya menjadi sinyal listrik yang diproses dan ditampilkan dalam bentuk angka. Pada penelitian mesin pembuat permen sari nanas dengan beban adonan 1 kg, vibration meter digunakan untuk mengetahui amplitudo getaran pada motor, poros pengaduk, dan rangka mesin, sehingga kondisi operasional dan stabilitas mesin dapat dianalisis serta potensi masalah mekanis dapat dideteksi lebih awal.



Gambar 2. 4 Vibration Meter

(Sumber : <https://wonderfulengineering.com>)

2.9.2 Tachometer

Tachometer adalah alat untuk mengukur kecepatan putar (RPM) dari poros motor atau pengaduk mesin, baik secara kontak langsung maupun non-kontak menggunakan sensor optik atau laser. Alat ini menampilkan hasil pengukuran dalam angka RPM, yang berguna untuk memastikan mesin beroperasi sesuai spesifikasi dan menghindari over-speed yang dapat menimbulkan getaran berlebih. Dalam penelitian mesin pembuat permen sari nanas, tachometer digunakan untuk memantau kecepatan pengadukan adonan 1 kg, sehingga data RPM dapat dikorelasikan dengan amplitudo getaran yang diukur oleh vibration meter untuk analisis performa mesin.



Gambar 2. 5 Tachometer

(Sumber : <https://gainexpress-dealer.com>)

2.9.3 Stopwatch

Stopwatch berfungsi untuk mencatat waktu yang diperlukan selama proses produksi, mulai dari pemanasan adonan hingga terbentuknya karamel. Cara Penggunaan: Tombol “Start” ditekan saat proses dimulai, dan tombol “Stop” ditekan ketika proses selesai. Waktu yang telah berlalu akan ditampilkan dalam satuan detik atau menit. Kelebihan: Praktis, sederhana, dan memberikan pengukuran waktu yang akurat.



Gambar 2. 6 Stopwatch

(Sumber : <https://elektronikindo.com>)

2.9.4 Tang Amper

Tang amper adalah alat ukur listrik yang digunakan untuk mengetahui besarnya arus pada suatu penghantar tanpa harus memotong atau mengupas kabel. Cara kerjanya didasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus listrik yang mengalir pada konduktor akan menimbulkan medan magnet di sekitarnya. Medan magnet ini kemudian ditangkap oleh rahang penjepit pada tang amper dan diubah menjadi sinyal listrik, yang selanjutnya diproses oleh rangkaian elektronik di dalam alat hingga hasilnya ditampilkan pada layar. Pada perkembangannya, tang amper tidak hanya berfungsi

untuk mengukur arus, tetapi juga dilengkapi dengan fitur tambahan seperti pengukuran tegangan, hambatan, kontinuitas, hingga frekuensi. Keunggulan utama tang amper adalah penggunaannya yang cepat, praktis, dan aman karena tidak perlu memutus aliran listrik, meskipun akurasinya cenderung lebih rendah dibandingkan multimeter biasa, terutama saat digunakan untuk mengukur arus yang sangat kecil.



Gambar 2. 7 Tang Amper

(Sumber :<https://www.teknikotomotif.my.id/>)

2.9.5 Multimeter

Multimeter merupakan alat ukur listrik yang bersifat multifungsi karena dapat digunakan untuk mengukur berbagai besaran listrik, antara lain tegangan (volt), arus (ampere), dan hambatan (ohm). Seiring perkembangan teknologi, banyak multimeter modern yang juga dilengkapi kemampuan tambahan seperti mengukur kontinuitas, kapasitansi, frekuensi, hingga suhu, tergantung jenis dan fiturnya. Cara

kerja multimeter yaitu dengan mengubah besaran listrik yang diukur menjadi sinyal yang kemudian ditampilkan dalam bentuk angka pada layar digital atau jarum penunjuk pada versi analog. Terdapat dua jenis utama multimeter, yaitu analog dengan skala jarum dan digital dengan tampilan angka pada layar LCD. Alat ini sangat bermanfaat bagi teknisi listrik maupun elektronika karena praktis digunakan, mudah dibawa, serta mampu memberikan informasi penting dalam pemeriksaan maupun perbaikan rangkaian listrik.



Gambar 2. 8 Multimeter

(Sumber :<https://ntinow.edu/>)

2.10 Massa Jenis

Massa jenis merupakan salah satu sifat fisik dasar yang menunjukkan hubungan antara massa suatu zat dengan volume yang ditempatinya. Secara umum, massa jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara massa (m) dan volume (V) suatu benda, dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

dengan keterangan:

ρ = massa jenis (kg/m³ atau g/ml)

m = massa zat (kg atau g)

V = volume zat (m³ atau ml)

Dalam sistem internasional (SI), satuan massa jenis adalah kilogram per meter kubik (kg/m³). Namun, dalam bidang pangan dan laboratorium, massa jenis sering dinyatakan dalam gram per mililiter (g/ml) atau gram per sentimeter kubik (g/cm³). Konversi antar satuan tersebut adalah:

$$1 \text{ g/ml} = 1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

2.10.1 Faktor yang Mempengaruhi Massa Jenis

Nilai massa jenis dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- Suhu: Pada umumnya, kenaikan suhu akan menurunkan massa jenis karena volume zat cenderung memuai sementara massanya tetap.
- Tekanan: Peningkatan tekanan dapat meningkatkan massa jenis, terutama pada zat gas
- Komposisi dan kadar air: Pada bahan pangan, kandungan zat terlarut seperti gula, protein, dan mineral sangat mempengaruhi massa jenis. Semakin tinggi kadar padatan terlarut, massa jenis semakin besar.
- Proses pengolahan: Pemanasan, pengadukan, dan penguapan air selama proses pengolahan dapat mengubah massa jenis bahan.

2.10.2 Massa Jenis pada Bahan Pangan

Dalam bidang teknologi pangan, massa jenis sering digunakan untuk mengukur konsentrasi zat terlarut, tingkat kekentalan, serta perubahan sifat fisik selama proses pengolahan (Winarno, 2002). Misalnya, pada pembuatan permen, pemanasan menyebabkan air dalam adonan menguap sehingga konsentrasi gula meningkat. Hal ini menyebabkan massa jenis adonan naik seiring waktu.

Menurut Fellows (2000), massa jenis dapat digunakan sebagai indikator kualitas produk cair dan semi padat. Pada sari buah, pengukuran massa jenis membantu menentukan tingkat kematangan buah dan konsentrasi gula. Pada adonan permen, massa jenis berhubungan langsung dengan tekstur, rasa manis, dan kestabilan produk akhir.

2.10.3 Pengukuran Massa Jenis

Massa jenis dapat diukur secara langsung maupun tidak langsung:

- a. Metode langsung: menggunakan piknometer, hidrometer, atau alat ukur digital khusus.
- b. Metode tidak langsung: dengan mengukur massa dan volume sampel, kemudian dihitung menggunakan rumus $\rho = m/V$

Dalam penelitian ini, massa jenis adonan dihitung dengan cara mengambil sampel adonan dalam volume tertentu (misalnya 100 ml), lalu menimbang massanya. Nilai massa per 100 ml kemudian digunakan untuk menentukan massa jenis adonan:

$$\rho = \frac{\text{massa adonan (g)}}{100 \text{ ml}}$$

Jika diperlukan, nilai ini dapat dikonversi ke satuan SI (kg/m^3) dengan mengalikan faktor 1000.

2.10.4 Hubungan Massa Jenis dengan Proses Pembuatan Permen

Dalam proses pembuatan permen sari nanas, massa jenis menjadi salah satu petunjuk penting perubahan fisik adonan. Saat pemanasan berlangsung, air yang terkandung di dalam adonan perlahan berkurang melalui penguapan. Bersamaan dengan itu, kadar gula dan padatan terlarut meningkat, sehingga massa jenis adonan bertambah. Perubahan ini menunjukkan tingkat kekentalan sekaligus menandakan sejauh mana adonan mendekati kondisi yang sesuai untuk dibentuk menjadi permen. Oleh sebab itu, pengamatan terhadap massa jenis tidak hanya bermanfaat untuk menjaga mutu produk, tetapi juga membantu memastikan konsistensi hasil akhir.

Di sisi lain, perubahan massa jenis juga membawa dampak pada performa mesin pembuat permen. Adonan yang semakin kental membutuhkan tenaga pengadukan yang lebih besar, sehingga menambah beban kerja motor dan sistem mekanis mesin. Akibatnya, getaran mesin dapat meningkat dan menimbulkan tekanan tambahan pada komponen. Hal ini memperlihatkan bahwa pemantauan massa jenis tidak hanya relevan dalam menjaga kualitas pangan, tetapi juga berperan dalam memahami kondisi kerja mesin agar dapat dilakukan penyesuaian atau perawatan yang tepat.

2.11 Perhitungan Mekanik

Perhitungan mekanik mesin pembuat permen adalah proses untuk menghitung dan menganalisis berbagai elemen teknis dalam mesin pembuat permen, guna memastikan mesin beroperasi dengan efisien, aman, dan sesuai dengan kapasitas yang diinginkan. Perhitungan ini mencakup berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja mesin, seperti kalor pemanas pada adonan, kecepatan putaran, beban pada komponen mesin, dan daya yang diperlukan.

2.11.1 Perhitungan Kalor Adonan Permen

Proses pembuatan permen melibatkan pemanasan adonan, yang berpengaruh pada perubahan suhu dan kondisi fisik bahan-bahan utama dalam adonan, seperti air dan gula. Untuk menghitung jumlah kalor yang dibutuhkan, kita harus memahami bagaimana kalor bekerja pada masing-masing bahan ini.

A. Kalor pada Air

Air dalam adonan permen memiliki peran utama dalam proses pemanasan, termasuk penguapan. Kalor yang diperlukan untuk memanaskan air dapat dihitung dengan rumus:

$$Q_{\text{air}} = M_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times \Delta T$$

Q_{air} = Kalor yang diserap atau dilepaskan oleh air (dalam Joule)

M_{air} = Massa air (dalam kg)

$C_p \text{ air}$ = Kapasitas kalor spesifik air (sekitar 4186 J/kg°C)
 ΔT = Perubahan suhu air (dalam °C)

Kalor ini digunakan untuk memanaskan air dari suhu awal hingga suhu yang diinginkan dalam pembuatan permen.

B. Kalor pada Gula

Gula dalam adonan permen juga memerlukan kalor untuk meningkatkan suhunya. Proses pemanasan gula dalam adonan mengikuti rumus yang mirip dengan rumus untuk air:

$$Q_{\text{gula}} = M_{\text{gula}} \times c_{p\text{gula}} \times \Delta T$$

Q_{gula} = Kalor yang diserap atau dilepaskan oleh gula (dalam Joule)
 M_{gula} = Massa gula (dalam kg)
 $C_p \text{ gula}$ = Kapasitas kalor spesifik gula (sekitar 1600 J/kg°C)
 ΔT = Perubahan suhu gula (dalam °C)

Namun, gula juga bisa mengalami perubahan fase, seperti pencairan atau pengkristalan, yang memerlukan perhitungan tambahan untuk kalor laten, meskipun dalam pembuatan permen, fokus utamanya adalah pada pemanasan gula.

C. Menghitung Kalor Total pada Adonan Permen

Setelah menghitung kalor untuk air dan gula, total kalor yang dibutuhkan untuk pembuatan adonan permen adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk memanaskan kedua bahan tersebut:

$$Q_{\text{adonan}} = Q_{\text{air}} + Q_{\text{gula}}$$

2.11.2 Perhitungan Kalor Wajan

Perhitungan kalor pada wajan sangat penting dalam proses memasak, termasuk pembuatan permen, karena wajan menyerap dan mengalirkan kalor ke bahan yang dipanaskan. Kalor yang diserap oleh wajan mempengaruhi suhu bahan yang dimasak, yang pada gilirannya akan mempengaruhi hasil akhir dari pembuatan permen.

Saat wajan dipanaskan, ia menyerap kalor yang menyebabkan peningkatan suhu. Kalor yang diserap oleh wajan dapat dihitung dengan rumus:

$$Q_{\text{wajan}} = M_{\text{wajan}} \times c_{p_{\text{wajan}}} \times \Delta T$$

Q_{wajan} = Kalor yang diserap atau dilepaskan oleh wajan (dalam Joule)

M_{wajan} = Massa wajan (dalam kg)

$c_{p_{\text{wajan}}}$ = Kapasitas kalor spesifik stainless steel (sekitar 500 J/kg°C)

ΔT = Perubahan suhu wajan (dalam °C)

Jenis bahan wajan mempengaruhi kapasitas kalor spesifiknya, yang berarti bahwa wajan dengan bahan yang berbeda (seperti aluminium, *stainless steel*) akan menyerap kalor dengan laju yang berbeda pula.

2.11.3 Perhitungan Kalor Pengaduk

Kalor yang diterima oleh pengaduk akan menyebabkan peningkatan suhu pengaduk. Peningkatan suhu ini dapat dihitung menggunakan rumus yang mengaitkan jumlah kalor, massa pengaduk, kapasitas kalor spesifik material pengaduk, dan perubahan suhu yang terjadi:

$$Q_{\text{pengaduk}} = M_{\text{pengaduk}} \times c_{p_{\text{pengaduk}}} \times \Delta T$$

Q_{pengaduk} = Kalor yang diserap atau dilepaskan oleh pengaduk (dalam Joule)

M_{pengaduk} = Massa pengaduk (dalam kg)

C_p pengaduk = Kapasitas kalor spesifik stainless steel (sekitar 500 J/kg°C)
 ΔT = Perubahan suhu wajan (dalam °C)

Dengan menggunakan informasi tersebut, kita dapat menghitung seberapa besar perubahan suhu pengaduk setelah menerima kalor dari adonan.

2.11.4. Perhitungan massa LPG yang digunakan

Proses pemanasan menggunakan LPG. Dimana Lower Heating Value (LHV) atau nilai kalor bawah dari LPG adalah jumlah energi yang dilepaskan selama pembakaran bahan bakar tanpa mempertimbangkan energi yang terkandung dalam uap air hasil pembakaran. Untuk LPG, LHV berkisar sekitar $46 \frac{MJ}{Kg}$. atau sama dengan $46,000 \frac{KJ}{Kg}$

untuk mencari massa LPG yang terpakai atau digunakan dapat menggunakan rumus:

$$Q_{\text{adonan}} + Q_{\text{wajan}} + Q_{\text{pengaduk}} = Q_{\text{LPG}}$$

2.11.5 Kecepatan Pengadukan dan Pengaruh terhadap Kualitas Permen

Kecepatan pengadukan juga memegang peranan penting dalam menentukan kualitas permen yang dihasilkan. Kecepatan pengadukan yang tepat akan memastikan bahwa bahan-bahan permen tercampur dengan merata, menghasilkan tekstur yang baik dan kualitas yang konsisten. Rachmawati & Saputra (2020) menyatakan bahwa kecepatan pengadukan mempengaruhi kecepatan reaksi dalam proses pembuatan permen. Kecepatan pengadukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$N = \frac{60 \times V}{\pi \times D}$$

88

Keterangan:

N = Kecepatan putaran pengaduk (rpm)

V = Kecepatan linear pengaduk (m/s)

D = Diameter pengaduk (m)

2.11.6 Perhitungan Laju Aliran Panas pada Material Penghantar Panas

Material penghantar panas yang digunakan dalam mesin pembuatan permen harus memiliki konduktivitas termal yang baik untuk memastikan distribusi panas yang merata pada seluruh bahan permen. Hidayat & Ardianto (2022) menyebutkan bahwa pemilihan material yang tepat dapat mempengaruhi waktu pemanasan dan kualitas permen yang dihasilkan. Laju aliran panas pada material penghantar panas dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = \frac{k \times A \times \Delta T}{d}$$

Dimana:

Q = Laju aliran panas (W)

k = Konduktivitas termal material (W/m·K)

A = Luas penampang penghantar panas (m²)

ΔT = Perubahan suhu (K)

d = Ketebalan material penghantar panas (m)

2.11.7 Perhitungan Kapasitas Produksi Mesin Pembuatan Permen

Kapasitas mesin pembuatan permen merujuk pada jumlah produk permen yang dapat diproduksi dalam satuan waktu tertentu, dan ini sangat bergantung pada ukuran serta desain mesin itu sendiri. Mesin yang dirancang dengan efisiensi tinggi dapat mempengaruhi produktivitas dalam hal jumlah permen yang diproduksi, serta mengurangi waktu dan biaya produksi. Setiawan & Wibowo (2021) menunjukkan bahwa kapasitas mesin sangat dipengaruhi oleh faktor-

faktor seperti daya motor yang digunakan dan efisiensi dalam pengolahan bahan.

$$Q = \frac{W \times t}{\eta}$$

Keterangan:

Q = Kapasitas produksi (kg/jam)

W = Berat bahan yang diproses per siklus (kg)

t = Waktu proses per siklus (jam)

η = Efisiensi mesin (%)

2.11.8 Efisiensi Energi Mesin Pembuatan Permen

Efisiensi energi adalah faktor penting lainnya yang mempengaruhi biaya operasional mesin pembuatan permen. Mesin yang lebih efisien dapat mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan keuntungan jangka panjang. Kurniawan & Santoso (2021) menekankan pentingnya penghitungan efisiensi energi untuk memastikan mesin dapat beroperasi dengan konsumsi energi yang minimal. Efisiensi energi dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\eta_{\text{energi}} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100\%$$

Keterangan:

P_output = Daya output yang digunakan untuk pekerjaan (kW)

P_input = Daya input yang dibutuhkan untuk operasional mesin (kW)

Efisiensi energi yang tinggi sangat penting dalam menjaga keberlanjutan produksi dan mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang.

Landasan teori dalam analisa mesin pembuatan permen meliputi aspek-aspek teknis seperti kapasitas mesin, daya motor, kecepatan pengadukan, material penghantar panas, dan efisiensi energi.

Dengan menggunakan rumus-rumus yang tepat, seperti perhitungan daya motor, kecepatan pengadukan, dan laju aliran panas, kita dapat merancang dan mengoperasikan mesin pembuatan permen yang lebih efisien dan menghasilkan produk berkualitas tinggi.