

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH BEBAN EKSTRUSI DAN
VISKOSITAS TERHADAP DIMENSI PRODUK SERTA
PERILAKU *DIE SWELL* PADA *SHOULDER WEDGE*
MENGUNAKAN *TWO-WAY ANOVA* DAN MODEL REGRESI**



**KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA
BADAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA INDUSTRI
POLITEKNIK ATK YOGYAKARTA**

2025

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH BEBAN EKSTRUSI DAN
VISKOSITAS TERHADAP DIMENSI PRODUK SERTA
PERILAKU *DIE SWELL* PADA *SHOULDER WEDGE*
MENGUNAKAN *TWO-WAY ANOVA* DAN MODEL REGRESI**



**KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA
BADAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA INDUSTRI
POLITEKNIK ATK YOGYAKARTA**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH BEBAN EKSTRUSI DAN
VISKOSITAS TERHADAP DIMENSI PRODUK SERTA
PERILAKU *DIE SWELL* PADA *SHOULDER WEDGE*
MENGUNAKAN *TWO-WAY ANOVA* DAN MODEL REGRESI**

Disusun oleh:
SYAIFA EZA SATRIA
NIM. 2203010
Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik

Pembimbing I,



Dr. Wisnu Pambudi M.Sc
NIP. 19870127 201801 1 001

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir dan dinyatakan memenuhi
salah satu syarat yang diperlukan untuk mendapatkan Derajat Ahli Madya Diploma III
(D3) Politeknik ATK Yogyakarta

Tanggal: 21 Juli 2025

TIM PENGUJI

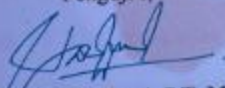
Ketua



Risang Pujiyanto, SH., M.PA.
NIP. 198411302009011009

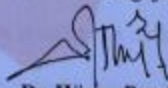
Anggota

Penguji I,



Dr. Muh Wahyu Sya'hani, S.T. M. Eng
NIP. 19820606 200804 1 003

Penguji II,



Dr. Wisnu Pambudi M.Sc
NIP. 19870127 201801 1 001

Yogyakarta, 29 Juli 2025
Direktur Politeknik ATK Yogyakarta



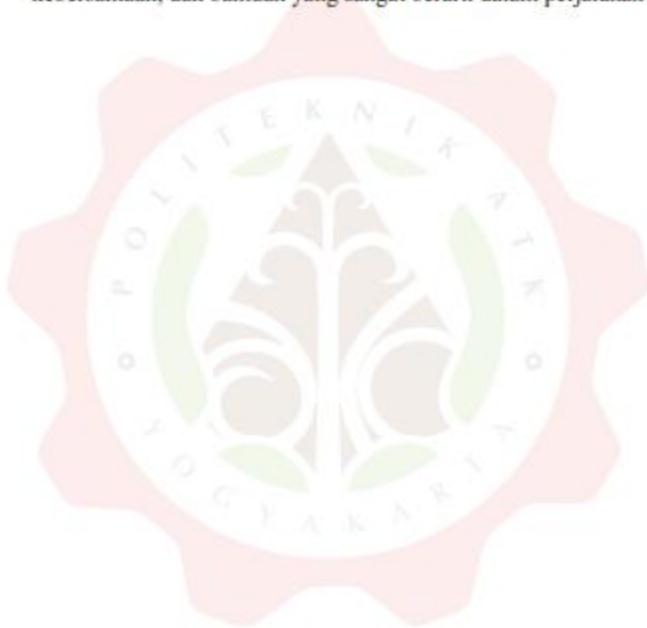
Dr. Sonny Taufan, S.H., M.H.
NIP. 198402262010121002

PERSEMBAHAN

Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, serta memberi banyak kemudahan sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya. Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

1. Diri saya sendiri, Syaifa Eza Satria, yang telah mau berjuang sampai saat ini dan bertahan dalam melalui apapun yang terjadi.
2. Kedua orang tua saya, Bapak Syaiful Anam dan almarhumah Ibu Wiwin Mawarti, yang telah memberikan dukungan, semangat, dan doa yang tidak pernah berhenti untuk kesuksesan anak-anaknya. Terima kasih atas segala pengorbanan dan kesabarannya sampai saat ini. Semoga selalu diberi kesehatan dan kedamaian abadi.
3. Adik saya, Arjuna Riski Satria, serta keluarga besar yang telah memberi dukungan, motivasi, ilmu, dan semangat untuk saya.
4. Dr. Wisnu Pambudi, M.Sc., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah sabar membimbing, memberikan ilmu, serta memberi semangat dan motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Pihak PT YXZ, yang telah memberikan kesempatan dalam melaksanakan kegiatan Dual System dan Praktek Kerja Industri. Terima kasih juga kepada Departemen Quality and Technology yang telah memberikan ilmunya serta membantu saya dalam menyelesaikan Tugas Akhir, terutama pembimbing lapangan Bapak Du Yanping (杜艳平) yang selalu memberikan bimbingan dan arahan selama di lapangan.

6. Teman-teman magang di kontak Bu Haji yang telah menguatkan dan menemani saya sampai saat ini. Terima kasih atas kebersamaan, semangat, dan dukungannya yang sangat berarti.
7. Teman-teman TPKP angkatan 2022 dan teman-teman HIMMAKP, yang telah menemani saya selama masa perkuliahan, memberikan dukungan, kebersamaan, dan bantuan yang sangat berarti dalam perjalanan saya.



KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Beban Ekstrusi Dan Viskositas Terhadap Dimensi Dan Perilaku *Die Swell* Pada Produk *Shoulder Wedge* Menggunakan *Two-Way Anova* Dan Model Regresi”. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan dalam memperoleh gelar Ahli Madya Diploma III (D3) pada program studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik (TPKP) Politeknik ATK Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, saya mengucapkan terima kasih atas segala bantuan dan dukungan dari:

1. Dr. Sonny Taufan, S.H., M.H., selaku Direktur Politeknik ATK Yogyakarta
2. Yuli Suwarno, M.Sc., selaku Pembantu Direktur 1 Politeknik ATK Yogyakarta
3. Dr. Wisnu Pambudi, M.Sc., selaku Ketua Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik sekaligus dosen pembimbing Tugas Akhir.
4. Pimpinan serta staf/karyawan PT YXZ.
5. Pihak-pihak turut membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini Semoga dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan menjadi referensi untuk percobaan atau pengembangan lebih lanjut di masa mendatang.

Kendal, 15 Juli 2025

Syaifa Eza Satria

MOTTO

“Kau harus adil sejak dalam pikiran.”

Pramoedya Ananta Toer

“Jika tidak ada jalan, maka kau ciptakan jalannya sendiri.”

“Perjalanan seribu mil, dimulai dari satu langkah.”

“Sejatine urip iki mung mampir magang.”



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERSEMBAHAN	iii
KATA PENGANTAR	v
MOTTO	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
INTISARI	xii
ABSTRACT	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Tugas Akhir	5
D. Batasan Tugas Akhir	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Ban	7
B. <i>Shoulder Wedge</i>	8
C. Ekstrusi	9
D. Viskositas	10
E. Beban Ekstrusi	11
F. <i>Die Swell</i>	11
G. <i>Two-Way ANOVA</i>	12

H. Model Regresi.....	13
BAB III. METODE DAN MATERI TUGAS AKHIR	14
A. Lokasi dan Waktu Pengambilan Data.....	14
B. Materi Tugas Akhir	14
C. Metode Pengumpulan Data	14
1. Bahan.....	15
2. Peralatan	16
D. Diagram Alir Proses Produksi.....	16
E. Metode Penyelesaian Tugas Akhir	19
1. Metode pengumpulan data.....	20
2. Metode Pengolahan Data.....	23
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
A. Hasil	30
B. Pembahasan	32
1. Pengaruh Beban Ekstrusi dan Viskositas terhadap Dimensi Produk <i>Shoulder Wedge</i>	32
2. Perilaku <i>Die Swell</i> terhadap Variasi Proses dan Dimensi Produk	38
3. Model Regresi untuk Prediksi Dimensi dan Penentuan Parameter Optimal.....	41
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	44
A. Kesimpulan	44
B. Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	46
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Bahan Kompon.....	15
Tabel 2. Hasil Percobaan.....	30
Tabel 3. Hasil <i>Two-Way ANOVA</i>	33
Tabel 4. Hasil Regresi	38



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Strukur Ban Radial dan Bias	7
Gambar 2. Komponen Ban Radial	8
Gambar 3. <i>Die</i> pada mesin ekstrusi.....	10
Gambar 4. Alir Proses Ekstrusi Produk <i>shoulder wedge</i>	17
Gambar 5. Alur Penyelesaian Tugas Akhir	19
Gambar 6. Grafik Normal Probability Plot dan Versus Fits pada lebar dan ketebalan	36
Gambar 7. Grafik scatterplot Lebar dan Ketebalan terhadap <i>Die Swell Ratio</i>	40
Gambar 8. Grafik Rata-Rata Lebar dan Ketebalan terhadap Beban Ekstrusi pada tiga level viskositas	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Form Penilaian Magang.....	48
Lampiran 2. Lembar Kerja Harian Prekerin	49
Lampiran 3. Dokumentasi Proses Percobaan.....	61



INTISARI

Shoulder wedge merupakan salah satu komponen penting pada struktur ban radial yang diproduksi melalui proses ekstrusi. Salah satu tantangan dalam proses ini adalah terjadinya fenomena *die swell*, yaitu pembesaran dimensi produk setelah keluar dari *die* akibat pelepasan energi elastik. Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh beban ekstrusi dan viskositas terhadap dimensi produk *shoulder wedge* dan perilaku *die swell*, serta membangun model regresi untuk memprediksi dimensi berdasarkan parameter proses. Metode yang digunakan adalah percobaan faktorial penuh dengan dua faktor utama (beban ekstrusi dan viskositas) dan pendekatan statistik *Two-Way ANOVA* serta regresi linier. Hasil analisis menunjukkan bahwa beban ekstrusi dan viskositas secara signifikan memengaruhi lebar dan ketebalan produk, viskositas menjadi faktor yang paling dominan, serta tidak ditemukan interaksi antara beban ekstrusi dan viskositas karena bekerja secara independen dalam mempengaruhi dimensi produk berdasarkan perhitungan *p-value* tidak ditemukan interaksi antara beban ekstrusi dan viskositas. Model regresi menunjukkan hubungan linier yang kuat antara rasio *die swell* dengan dimensi produk, dengan nilai koefisien determinasi sebesar 92,77% untuk lebar dan 97,51% untuk ketebalan. Berdasarkan hasil simulasi dan spesifikasi produk, kombinasi parameter optimal yang direkomendasikan adalah beban ekstrusi 1,22–1,28 kg/m dan viskositas 55 *Mooney Unit*. Hasil tulisan ini diharapkan dapat membantu industri dalam pengendalian dimensi dan optimasi proses ekstrusi *shoulder wedge*.

Kata kunci: *die swell*, *shoulder wedge*, ekstrusi karet, viskositas, beban ekstrusi, regresi

ABSTRACT

The shoulder wedge is one of the crucial components in the structure of a radial tire, produced through the extrusion process. One of the main challenges in this process is the phenomenon of die swell, which refers to the dimensional enlargement of the product after exiting the die due to the release of elastic energy. This Final Project aims to investigate the effects of extrusion load and viscosity on the dimensions of the shoulder wedge and the behavior of die swell, as well as to develop a regression model to predict dimensions based on process parameters. The method used is a full factorial experiment with two main factors (extrusion load and viscosity) and a statistical approach involving Two-Way ANOVA and linear regression. The analysis results indicate that both extrusion load and viscosity significantly affect the width and thickness of the product, with viscosity being the most dominant factor. No interaction effect was found between extrusion load and viscosity, indicating that they influence product dimensions independently, as shown by the p-value calculation. The regression model reveals a strong linear relationship between die swell ratio and product dimensions, with the coefficient of determination reaching 92.77% for width and 97.51% for thickness. Based on the simulation results and product specifications, the recommended optimal parameter combination is an extrusion load of 1.22–1.28 kg/m and a viscosity of 55 Mooney Units. This study is expected to assist the industry in dimension control and optimization of the shoulder wedge extrusion process.

Keywords: *die swell, shoulder wedge, rubber extrusion, viscosity, extrusion load, regression*

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri ban di Indonesia memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi nasional, terutama dalam sektor transportasi dan ekspor. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS), produksi karet alam Indonesia pada tahun 2023 mencapai 2,24 juta ton, dengan volume ekspor karet dan produk berbahan dasar karet yang tinggi, termasuk ban kendaraan (BPS, 2024). Sejalan dengan itu, jumlah kendaraan bermotor di Indonesia juga mengalami peningkatan signifikan, di mana sepeda motor mencapai 125,3 juta unit dan mobil penumpang sebanyak 16,9 juta unit pada tahun yang sama (BPS, 2023b). Kondisi ini menandakan bahwa permintaan terhadap produk ban, baik untuk kebutuhan domestik maupun ekspor, semakin tinggi.

Salah satu jenis ban yang paling banyak digunakan dalam kendaraan modern adalah ban radial. Ban radial memiliki beberapa keunggulan dibandingkan ban bias, antara lain ketahanan terhadap deformasi, efisiensi bahan bakar, serta kenyamanan dalam berkendara karena strukturnya yang dirancang dengan serat baja atau nilon yang tegak lurus terhadap arah gerak (Magna Tyres, 2023). Ban radial dikenal memiliki daya cengkraman yang lebih baik, kestabilan tinggi saat menikung, dan hambatan gulir yang lebih rendah sehingga mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar. Sebaliknya, ban bias memiliki konstruksi dengan pola serat diagonal yang menyilang satu sama

lain, menjadikannya lebih tangguh terhadap beban berat dan cocok digunakan di medan berat atau aplikasi tugas berat lainnya.

Terdapat penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan ban radial dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 8% dibandingkan dengan ban bias terutama karena *rolling resistance* yang lebih rendah pada ban radial (Knight, 1979). Ban radial juga memiliki struktur internal yang kompleks yang terdiri dari berbagai komponen penting seperti *tread*, *belt*, *carcass ply*, *sidewall*, *bead*, dan *liner*, yang semuanya memiliki fungsi spesifik dalam menjaga performa dan daya tahan ban (Swieczko-Zurek et al., 2017).

Salah satu komponen penting dalam struktur ban radial adalah *shoulder wedge*, yaitu lapisan berbentuk segitiga yang terletak di antara area *shoulder* dan *sidewall* ban. Komponen ini memiliki fungsi vital dalam memperkuat sambungan antar lapisan material, meredam tegangan akibat pembebanan selama kendaraan bergerak, serta menjaga kestabilan bentuk dan dimensi ban saat mengalami deformasi dinamis (Rodgers & Waddell, 2013). *Shoulder wedge* membantu mendistribusikan tegangan secara merata di sekitar area transisi antara *tread* dan *sidewall*, sehingga mengurangi risiko konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan kegagalan material secara prematur.

Menurut Hankook Tire (2023), area *shoulder* ban terdiri dari struktur karet yang lebih tebal yang berperan penting dalam disipasi panas, memperkuat stabilitas saat menikung, serta membantu menjaga kekakuan struktural ban secara keseluruhan. Desain *shoulder wedge* yang baik, termasuk penempatan dan bentuk *shoulder wedge*, berkontribusi terhadap kestabilan arah, ketahanan

terhadap keausan tidak merata, dan peningkatan umur pakai ban, terutama pada kondisi beban tinggi dan kecepatan menengah hingga tinggi. Selain itu, *shoulder wedge* juga memiliki peran dalam proses vulkanisasi, karena bentuk geometrisnya yang simetris dapat membantu menjaga kestabilan dimensi saat terjadi ekspansi termal selama proses curing ban.

Proses pembuatan *shoulder wedge* dilakukan melalui metode ekstrusi, yaitu teknik pembentukan di mana material karet dilewatkan melalui sebuah cetakan (*die*) untuk menghasilkan bentuk profil yang diinginkan. Salah satu tantangan utama dalam proses ini adalah terjadinya fenomena *die swell* atau pembengkakan ekstrudat, yaitu kondisi di mana material mengalami ekspansi dimensi setelah keluar dari *die* akibat relaksasi tegangan internal pada molekul polimer yang sebelumnya terorientasi di dalam saluran *die*. Hal ini terjadi karena molekul polimer cenderung kembali ke keadaan aslinya setelah melewati pembatas mekanis *die*, yang menyebabkan dimensi produk menjadi lebih besar dari ukuran cetakan awal (Brydson *et al.*, 2006).

Die swell dipengaruhi oleh beberapa faktor penting seperti suhu leleh, laju geser (*shear rate*), panjang zona *land die*, serta viskositas dan elastisitas material. Peningkatan viskositas material dan tekanan ekstrusi biasanya menyebabkan pembengkakan yang lebih besar, karena tingginya gaya elastis yang tersimpan dalam struktur molekul selama proses aliran di dalam *die*. Oleh karena itu, pengendalian parameter proses seperti temperatur, rasio kecepatan antara ekstruder dan *puller*, serta desain geometri *die* menjadi kunci dalam

menghasilkan profil *shoulder wedge* dengan dimensi yang presisi dan stabil (Brydson *et al.*, 2006).

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Watpathomsub dan Nathaphan (2023) mengkaji secara eksperimental fenomena pembengkakan ekstrudat (*die swell*) pada proses ekstrusi kompon karet menggunakan cetakan tread *die*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban ekstrusi berkontribusi signifikan terhadap peningkatan rasio *die swell*, yang berimplikasi langsung terhadap perubahan dimensi lebar dan ketebalan produk ekstrusi. Studi tersebut menekankan pentingnya pengendalian parameter proses untuk menjaga stabilitas dimensi produk tanpa perlu melakukan modifikasi peralatan.

Sebagai pengembangan dari penelitian tersebut, studi ini berjudul "**Analisis Pengaruh Beban Ekstrusi Dan Viskositas Terhadap Dimensi Produk Serta Perilaku *Die Swell* Pada *Shoulder Wedge* Menggunakan *Two-Way Anova* Dan Model Regresi**". Percobaan ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh simultan dan interaktif antara beban ekstrusi dan viskositas terhadap dimensi hasil ekstrusi *shoulder wedge*. Dengan menggunakan metode faktorial penuh dan pendekatan statistik seperti *Two-Way ANOVA* serta model regresi, diharapkan hasil percobaan ini dapat memberikan kontribusi dalam perbaikan proses produksi, pengendalian kualitas dimensi produk, serta efisiensi dalam penggunaan material karet di industri ban.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan diatas, maka rumusan masalah yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini yaitu.

1. Bagaimana pengaruh beban ekstrusi dan viskositas serta interaksi kedua faktor terhadap dimensi lebar dan tebal produk *shoulder wedge* ?
2. Bagaimana perilaku *die swell* muncul sebagai respons terhadap variasi beban ekstrusi dan viskositas, serta bagaimana pengaruh *die swell* terhadap dimensi akhir produk?
3. Dapatkah dibangun model regresi yang mampu memprediksi *die swell* dan dimensi produk berdasarkan parameter proses, guna menentukan kombinasi yang optimal dan konsisten?

C. Tujuan Tugas Akhir

Berdasarkan permasalahan diatas, tujuan penulisan tugas akhir ini yaitu sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh beban ekstrusi dan viskositas, serta interaksi keduanya terhadap dimensi lebar dan tebal produk *shoulder wedge*.
2. Mengetahui perilaku *die swell* sebagai respons terhadap variasi beban ekstrusi dan viskositas, serta pengaruhnya terhadap dimensi akhir produk.
3. Mendapatkan model regresi untuk memprediksi *die swell* dan dimensi produk berdasarkan parameter proses, guna menentukan kombinasi parameter yang optimal dan konsisten.

D. Batasan Tugas Akhir

Untuk menjaga fokus analisis dan keakuratan hasil, tugas akhir ini memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

1. Objek Percobaan Terbatas pada Produk *Shoulder Wedge*. Percobaan ini hanya difokuskan pada salah satu komponen ban, yaitu *shoulder wedge*, yang diproses melalui ekstrusi. Hasil percobaan tidak secara langsung berlaku untuk komponen ban lainnya seperti *tread*, *sidewall*, atau *inner liner*.
2. Variabel proses yang diamati dibatasi pada, beban ekstrusi dengan 5 level (1.10, 1.16, 1.22, 1.28, dan 1.34 kg/m). serta viskositas kompon karet dengan 3 level (50, 55, dan 60 *Mooney Units*).
3. Variabel respon yang dianalisis hanya mencakup lebar dan tebal produk *shoulder wedge*, serta rasio *die swell* sebagai variabel antara. Aspek lain seperti, homogenitas material, atau kekuatan mekanis tidak dianalisis.
4. Percobaan dilakukan dengan asumsi bahwa parameter mesin ekstruder (diameter screw, L/D ratio, dan kecepatan putar *screw*, kecepatan tarik, bentuk *dies*) serta kondisi lingkungan (suhu ruangan dan kelembapan) dijaga tetap selama percobaan.
5. Analisis data dilakukan menggunakan metode *Two-Way ANOVA* untuk menguji pengaruh dan interaksi antar variabel bebas terhadap variabel respon, serta model regresi (linier dan nonlinier) untuk hubungan antara variabel-variabel terpilih.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Ban

Ban merupakan salah satu komponen terpenting dalam kendaraan karena menjadi satu-satunya bagian yang bersentuhan langsung dengan permukaan jalan. Ban berfungsi untuk menopang beban kendaraan, meredam getaran, menyalurkan gaya pengereman, serta menjaga kestabilan arah kendaraan (Rodgers & Waddell, 2013). Peran vital ini menjadikan pengembangan desain, struktur, dan material ban sebagai fokus utama dalam industri otomotif.



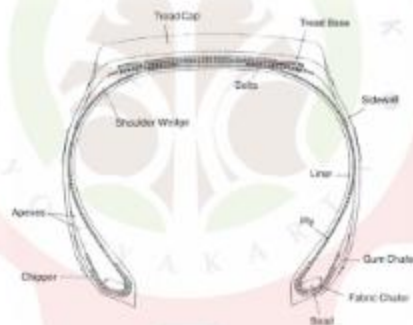
Gambar 1. Strukur Ban Radial dan Bias

Berdasarkan konstruksi internalnya, ban dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu ban radial dan ban bias. Ban radial memiliki lapisan serat (*ply*) yang disusun tegak lurus terhadap arah keliling ban, biasanya diperkuat dengan sabuk baja atau tekstil, sehingga memungkinkan distribusi tekanan yang lebih merata serta mengurangi gaya hambat gulir (*rolling resistance*) (Magna Tyres, 2023). Sementara itu, ban bias memiliki *ply* yang disusun menyilang, membentuk pola bersilangan, yang menghasilkan struktur samping

yang lebih kaku, namun cenderung menghasilkan panas berlebih dan tingkat *rolling resistance* yang lebih tinggi.

Rolling resistance adalah gaya hambat akibat deformasi elastis ban saat bergulir di permukaan jalan. Berdasarkan penelitian Knight (1979), penggunaan ban radial dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan berat sebesar 4 hingga 9 persen dibandingkan ban bias. Hal ini menjadikan ban radial lebih disukai dalam aplikasi kendaraan modern yang menuntut efisiensi dan kenyamanan berkendara.

B. *Shoulder Wedge*



Gambar 2.2 Komponen Ban Radial

Dalam struktur ban, *shoulder wedge* merupakan elemen penting yang terletak di antara tapak (*tread*) dan dinding samping (*sidewall*). Komponen ini berperan dalam memperkuat area bahu ban dan mengarahkan distribusi tegangan dari bagian luar ban menuju karkas dan sabuk dalam. Hal ini menjadikan *shoulder wedge* sebagai bagian yang sangat krusial dalam menahan beban lateral dan vertikal yang besar, terutama saat kendaraan

bermanuver atau membawa beban berat (Rodgers & Waddell, 2013). Secara teknis, *shoulder wedge* memiliki bentuk segitiga asimetris dengan dimensi nominal berupa lebar 100 mm dengan toleransi ± 3 mm, serta ketebalan 10 mm dengan toleransi $\pm 0,3$ mm. Geometri ini dirancang untuk menyeimbangkan kekakuan struktural dan fleksibilitas deformasi, sehingga mampu mempertahankan bentuk dan stabilitas ban dalam kondisi beban dinamis.

Selain fungsi struktural, *shoulder wedge* juga memainkan peran dalam pengelolaan termal ban. Berdasarkan analisis simulasi oleh Yin *et al.* (2006), suhu tertinggi selama pengujian dinamis ban cenderung terakumulasi di area bahu. *Shoulder wedge* bertindak sebagai jalur disipasi panas pasif, membantu mengalirkan panas dari area bahu ke luar struktur ban dan mengurangi risiko *over-heating*. Oleh karena itu, desain geometri *shoulder wedge* yang presisi penting untuk mencegah keausan dini akibat konsentrasi panas dan tegangan.

Bentuk segitiga atau runcing pada *shoulder wedge* memungkinkan kombinasi antara kekakuan struktural dan fleksibilitas. Untuk mencapai dimensi yang akurat dan konsisten, komponen ini umumnya dibentuk melalui proses ekstrusi (Wang, 2010).

C. Ekstrusi

Proses ekstrusi merupakan metode manufaktur utama dalam industri karet, di mana kompon karet dipanaskan hingga mencapai kondisi plastis dan kemudian didorong melalui cetakan (*die*) untuk membentuk profil penampang tertentu. Proses ini memungkinkan produksi produk karet secara kontinu dan

efisien, termasuk pembentukan komponen ban seperti *shoulder wedge* (Peltola, 2013).



Dalam konteks pembentukan *shoulder wedge*, proses ekstrusi memungkinkan kendali presisi terhadap bentuk dan dimensi hasil produk. Stabilitas aliran material menjadi sangat penting karena ketidakstabilan dapat menyebabkan cacat bentuk, seperti ketebalan yang tidak merata atau perubahan geometri. Salah satu tantangan yang umum terjadi adalah fenomena *die swell*, yaitu pembesaran dimensi produk setelah keluar dari *die* akibat pemulihan energi elastik dari bahan viskoelastik (He *et al.*, 2022).

D. Viskositas

Viskositas merupakan ukuran resistansi suatu material terhadap aliran dan menjadi salah satu parameter reologi utama dalam proses ekstrusi. Viskositas menentukan kemudahan material mengalir melalui *die* serta memengaruhi tekanan dan stabilitas aliran selama proses pembentukan (Ngai *et al.*, 2013).

Viskositas material karet sangat dipengaruhi oleh suhu, kecepatan geser, dan struktur molekul kompon. Ketika viskositas terlalu tinggi, tekanan ekstrusi

akan meningkat dan aliran material menjadi tidak stabil. Sebaliknya, viskositas yang terlalu rendah akan menghasilkan aliran yang terlalu cepat dan berisiko menyebabkan *die swell* berlebih, yang dapat memengaruhi akurasi dimensi akhir shoulder wedge (Liang, 2004). Oleh karena itu, pengaturan viskositas dalam proses ekstrusi sangat penting untuk menjamin kualitas hasil produksi.

E. Beban Ekstrusi

Beban ekstrusi merujuk pada jumlah material yang didorong keluar dari *die* per satuan waktu. Beban ini berkaitan erat dengan tekanan internal, kecepatan aliran material, dan kapasitas deformasi yang dialami material saat melewati *die*. Beban ekstrusi yang terlalu tinggi dapat memicu peningkatan tekanan dan memperbesar efek *die swell*, sedangkan beban yang terlalu rendah dapat menyebabkan hasil ekstrusi tidak padat dan bentuk produk tidak terbentuk sempurna (Watpathomsub & Nathaphan, 2020).

Dalam produksi *shoulder wedge*, pengendalian beban ekstrusi menjadi aspek krusial untuk mempertahankan konsistensi geometri dan kualitas produk. Beban ekstrusi harus diatur secara sinergis dengan viskositas agar aliran material tetap stabil dan hasil akhirnya sesuai dengan spesifikasi desain (Peltola, 2013).

F. Die Swell

Die swell merupakan fenomena pembesaran dimensi produk setelah keluar dari cetakan akibat pelepasan energi elastik yang tersimpan selama

aliran material di dalam *die*. Fenomena ini umum terjadi pada material viskoelastik seperti kompon karet, dan dapat menyebabkan perubahan dimensi yang signifikan pada produk akhir (Wang & Li, 2020).

Besarnya *die swell* dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, seperti viskositas material, suhu pemrosesan, elastisitas kompon, tekanan di dalam die, dan beban ekstrusi. Karena *shoulder wedge* menuntut bentuk presisi, kontrol terhadap *die swell* menjadi penting agar dimensi tetap sesuai standar desain. Pengelolaan fenomena *die swell* merupakan bagian integral dari optimasi proses ekstrusi karet (Watpathomsub & Nathaphan, 2020).

G. Two-Way ANOVA

Two-Way ANOVA adalah metode statistik yang digunakan untuk menguji pengaruh dua faktor bebas terhadap satu variabel dependen secara bersamaan, serta menguji adanya interaksi di antara kedua faktor tersebut. Metode ini memungkinkan analisis terhadap lebih dari satu perlakuan dalam satu waktu, dengan syarat data berdistribusi normal dan varians antar kelompok homogen (Firmansyah *et al.*, 2020)

Dalam analisis hasil pengujian disajikan dalam bentuk nilai F dan *p-value*. Nilai F digunakan untuk mengukur rasio antara variabilitas antar kelompok terhadap variabilitas dalam kelompok. Semakin besar nilai F, semakin besar kemungkinan bahwa perbedaan yang diamati bukan disebabkan oleh variasi acak. Sementara itu, *p-value* menunjukkan signifikansi statistik dari hasil tersebut. Jika $p\text{-value} < 0,05$ maka dapat disimpulkan bahwa

perbedaan yang terjadi signifikan secara statistik. *Two-Way ANOVA* banyak digunakan dalam eksperimen teknik dan industri untuk menentukan pengaruh kombinasi faktor proses terhadap hasil produk.

H. Model Regresi

Regresi linear adalah metode statistik yang digunakan untuk melihat hubungan dan pengaruh antara satu atau lebih variabel bebas (independen) terhadap satu variabel terikat (dependen). Regresi digunakan untuk memprediksi nilai variabel dependen dan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari masing-masing variabel bebas secara individual maupun bersama-sama terhadap respon. Jika hanya terdapat satu variabel bebas, disebut regresi linear sederhana, sedangkan jika lebih dari satu, disebut regresi linear berganda (Puspa et al., 2024)

Tujuan utama dari regresi adalah untuk meramalkan atau memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen, serta mengetahui besarnya pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat. Model regresi dinyatakan dalam bentuk persamaan garis lurus, di mana koefisien regresi menunjukkan arah dan kekuatan pengaruh masing-masing variabel bebas (Firmansyah et al., 2020).

BAB III

METODE DAN MATERI TUGAS AKHIR

A. Lokasi dan Waktu Pengambilan Data

Pengambilan data untuk tugas akhir ini dilaksanakan di PT. YXZ yang berlokasi di Jawa Tengah. Pengambilan data berlangsung dari tanggal 11 November 2024 sampai dengan 11 Mei 2025.

B. Materi Tugas Akhir

Materi dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode rancangan faktorial penuh. Rancangan faktorial penuh (*full factorial design*) merupakan metode eksperimen yang menguji seluruh kombinasi kemungkinan dari tingkat-tingkat setiap faktor yang diteliti. Dalam percobaan ini, dua faktor utama yang diuji adalah beban ekstrusi dan viskositas, masing-masing pada beberapa tingkat tertentu. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui pengaruh dua faktor utama, yaitu beban ekstrusi dan viskositas, terhadap dimensi produk dan perilaku *die swell* yang terjadi pada produk *shoulder wedge*. Sehingga mendapat pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara variabel perlakuan dan hasil yang diamati.

C. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam percobaan ini dilakukan melalui percobaan langsung menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental.

Desain percobaan disusun dalam bentuk kombinasi perlakuan dengan variasi lima level beban ekstrusi dan tiga level viskositas. Setiap kombinasi perlakuan direplikasi sebanyak lima kali guna memperoleh hasil yang akurat dan representatif.

1. Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam percobaan ini adalah komponen *sholder wedge* dengan tiga variasi viskositas, yaitu 50, 55, 60 Mooney Unit (MU). Yang diperoleh dari bagian manufaktur 1 *mixing*, dengan formulasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Bahan Kompon

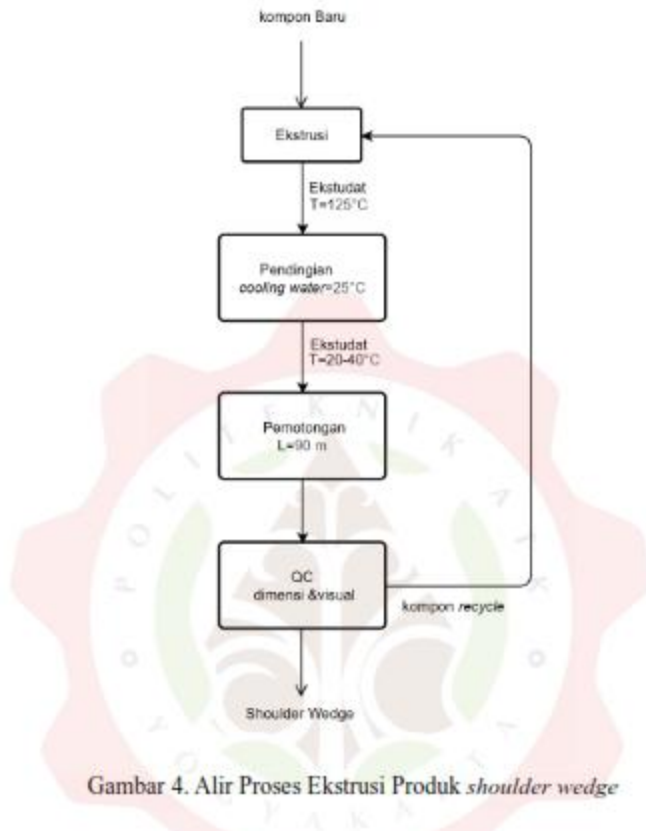
No	Bahan
1	Karet Alam
2	<i>Antioxidant</i>
3	<i>Carbon Black</i>
4	Silika
5	<i>Reinforcing Agent</i>
6	<i>High Aromatic Oil</i>
7	<i>Antiscorching Agent</i>
8	<i>Zinc Oxide</i>
9	<i>Accelerator</i>
10	<i>Stearic Acid</i>
11	<i>Insoluble Sulfur</i>
12	<i>Tackifying Resin</i>
13	Sulfur
14	<i>Accelerator (Vulcanizing Agent)</i>

2. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam percobaan diantaranya adalah timbangan digital, jangka sorong, meteran, *software* Minitab 22, mesin ekstruder dengan diameter *screw* 200 mm, rasio L/D 16, dan cetakan (*Dies*) *Sholder wedge* dengan luas penampang 697,06 mm².

D. Diagram Alir Proses Produksi

Proses pembuatan produk *shoulder wedge* terdiri dari beberapa tahapan utama yang dilakukan secara sistematis di PT YXZ. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk menghasilkan produk *shoulder wedge* yang sesuai dengan spesifikasi dimensi, kualitas permukaan, dan konsistensi bentuk, sehingga mampu memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan perusahaan. Setiap tahapan dalam proses ini dirancang agar saling mendukung satu sama lain, dengan penerapan prinsip ketelitian, efisiensi waktu, serta pengendalian mutu yang ketat pada setiap titik kontrolnya. Keberhasilan dalam proses ini sangat bergantung pada koordinasi yang baik antara sumber daya manusia, kesiapan peralatan produksi, serta kestabilan parameter proses. Proses dimulai dari pengecekan dan persiapan bahan, mesin, serta peralatan (*tools*), hingga tahap akhir berupa penyimpanan produk dan distribusi ke tahap selanjutnya dalam proses pembuatan ban. Alur proses secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Alir Proses Ekstrusi Produk *shoulder wedge*

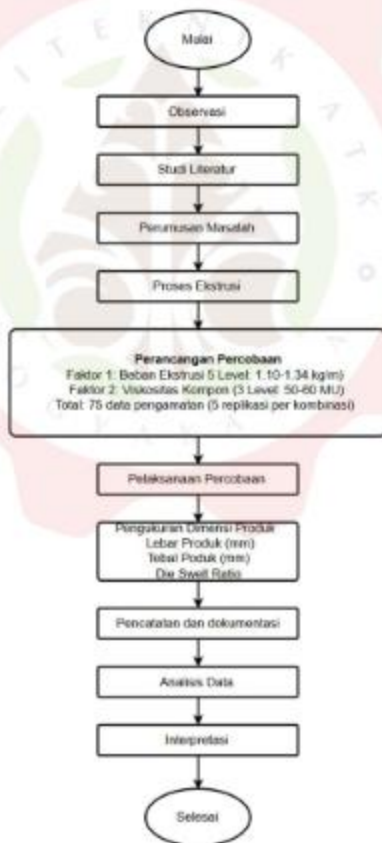
1. Persiapan bahan baku kompon *shoulder wedge* yang akan digunakan dalam proses ekstrusi. Bahan baku disiapkan dalam jumlah dan jenis yang sesuai dengan kebutuhan.
2. Sebelum memulai proses ekstrusi, dilakukan pemeriksaan menyeluruh terhadap kondisi mesin ekstruder dan *dies*. Pemeriksaan ini mencakup pengecekan kebersihan, kelengkapan komponen, serta kelayakan operasional peralatan.

3. Pengaturan parameter dasar proses ekstrusi sebelum produksi dimulai. Pengaturan ini meliputi penyesuaian tekanan, suhu, dan kecepatan ekstrusi agar sesuai dengan karakteristik bahan dan bentuk produk yang diinginkan.
4. Setelah parameter diatur, material kompon dimasukkan ke dalam mesin ekstruder dan didorong melalui *die* khusus untuk membentuk produk *shoulder wedge*.
5. Produk hasil ekstrusi kemudian melewati tahapan pendinginan, yang bertujuan untuk menstabilkan bentuk dan dimensi material setelah keluar dari *die*. Setelah suhu produk turun dan bentuk mengeras, dilakukan proses pemotongan sesuai panjang standar untuk pengukuran dan penyimpanan.
6. Setelah produk dipotong, dilakukan pengukuran terhadap dimensi utama, yaitu lebar, tebal, dan Panjang.
7. Jika hasil pengukuran menunjukkan bahwa dimensi produk sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, produk akan diberikan label identifikasi dan disimpan di rak penyimpanan.
8. Jika produk tidak sesuai spesifikasi, maka akan dipisahkan dari *batch* utama dan disimpan di tempat tersendiri. Produk yang tidak layak akan digunakan kembali dalam bentuk pencampuran dengan material baru (*rework*), selama produk tidak terdapat kontaminasi, atau

ketidakteraturan permukaan, maka produk tersebut dinyatakan memenuhi standar mutu dan dapat digunakan kembali.

E. Metode Penyelesaian Tugas Akhir

Metode yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini meliputi observasi langsung, studi literatur, dokumentasi lapangan, dan percobaan terencana. Diagram penyelesaian tugas akhir Metode yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada gambar 5.



1. Metode pengumpulan data

Pengumpulan data dalam percobaan ini dilakukan secara langsung pada objek percobaan, yaitu proses ekstrusi *shoulder wedge* di lini produksi. Data yang diperoleh merupakan data primer yang dikumpulkan melalui observasi lapangan, pelaksanaan percobaan, serta pengukuran langsung hasil percobaan. Metode ini dipilih untuk memperoleh data yang aktual, objektif, dan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan

a. Observasi

Observasi dilakukan secara langsung di area produksi untuk memahami kondisi nyata proses ekstrusi *shoulder wedge*. Tujuan dari observasi ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor teknis dan non-teknis yang dapat mempengaruhi kualitas produk, termasuk dimensi lebar, tebal, serta fenomena *die swell*. Melalui observasi, penulis juga dapat mencatat variasi proses yang terjadi, alur kerja, serta kondisi mesin dan bahan baku yang digunakan. Hasil observasi ini menjadi dasar dalam merancang percobaan yang sesuai dengan situasi di lapangan.

b. Metode Percobaan

Percobaan dirancang menggunakan metode faktorial penuh dengan dua faktor utama: beban ekstrusi (5 level: 1, 10–1,34 kg/m) dan viskositas kompon (3 level: 50–60 MU), masing-masing dengan 5 kali replikasi, menghasilkan 75 data pengamatan. Proses ekstrusi dilakukan menggunakan mesin dan *die* standar, kemudian dimensi

lebar, tebal, dan nilai *die swell* produk diukur secara sistematis, yang terdiri dari :

1) Persiapan Bahan dan Mesin

Pada tahap awal, bahan baku berupa kompon karet dengan tiga tingkat viskositas—50, 55, dan 60 *Mooney Units* (MU)—disiapkan untuk digunakan dalam variasi beban ekstrusi yang telah ditentukan. Kompon ini telah diuji viskositasnya sebelumnya agar sesuai dengan spesifikasi pengujian. Selanjutnya, mesin ekstruder disiapkan dan dipanaskan hingga mencapai suhu operasi yang sesuai dengan standar proses ekstrusi karet. Pengaturan suhu dilakukan pada seluruh zona pemanas ekstruder mulai dari *feeding barrel*, *screw*, plastisisasi, hingga kepala cetakan. Toleransi suhu dijaga dalam rentang $\pm 3^{\circ}\text{C}$ dari nilai standar untuk menjamin kestabilan pemrosesan termal selama ekstrusi berlangsung.

2) Pengaturan Parameter Proses

Setelah suhu mesin stabil, operator melakukan pengaturan parameter proses untuk menghasilkan lima tingkat beban ekstrusi yang ditargetkan, yaitu 1,10, 1,16, 1,22, 1,28, dan 1,34 kg/m. Penyesuaian dilakukan melalui pengaturan terhadap tiga variabel utama, yaitu:

- a) Kecepatan putaran screw (*screw speed*),
- b) Tekanan ekstrusi,
- c) Kecepatan penarikan produk (*haul-off speed*).

Penyesuaian ketiga parameter ini dilakukan secara bertahap dan hati-hati sampai berat per meter produk mendekati target. Stabilitas nilai beban ekstrusi diawasi sebelum pengambilan data dilakukan.

3) Proses Ekstrusi dan Penimbangan Awal

Setelah parameter disesuaikan, proses ekstrusi dijalankan. Produk *shoulder wedge* mulai keluar dari cetakan (*die*) dalam kondisi leleh dengan suhu sekitar 80°C. Produk yang keluar langsung melewati sistem timbangan otomatis (*online weighing system*) untuk memantau berat per meter (kg/m) secara real-time. Pengukuran ini berfungsi sebagai kontrol awal terhadap kestabilan proses dan kesesuaian terhadap target beban ekstrusi yang ditetapkan.

4) Verifikasi Berat per Meter

Meskipun sistem timbangan otomatis memberikan data berat per meter secara langsung, dilakukan pula verifikasi manual untuk memastikan ketepatan data. Produk yang telah melewati proses pendinginan hingga mencapai suhu mendekati suhu ruang (sekitar 35°C) diambil sebagai sampel. Setiap sampel dipotong sepanjang 1000 mm dan ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian tinggi. Berat aktual dari potongan inilah yang digunakan sebagai acuan akhir dalam menentukan kesesuaian terhadap beban ekstrusi pada tiap perlakuan.

2. Metode Pengolahan Data

Metode pengolahan data pada percobaan ini menggunakan perhitungan *Die Swell*. Berikut adalah penjelasannya:

a. Perhitungan *Die Swell*

Dalam Percobaan ini, nilai rasio *die swell* dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Die Swell Ratio} = \frac{A}{A'} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

A = Luas penampang produk setelah keluar dari die (mm²)

A' = Luas penampang pada die (mm²)

Die swell ratio bersifat tak berdimensi (*unitless*) dan menunjukkan seberapa besar produk mengalami pengembangan relatif terhadap *die*.

Karena bentuk penampang produk *shoulder wedge* relatif tetap dan menyerupai persegi panjang, maka A dapat dihitung dari hasil pengukuran lebar dan tebal produk dengan pendekatan:

$$A = \text{lebar (mm)} \times \text{tebal (mm)} \dots\dots\dots (2)$$

Nilai A' dalam percobaan ini adalah 697,06 mm², yang merupakan luas penampang pada *die*. Nilai ini diperoleh berdasarkan data teknis dari perusahaan, yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan rasio *die swell*.

Contoh Perhitungan:

Misalkan data pengamatan menunjukkan hasil sebagai berikut:

Lebar produk: 100 mm

Tebal produk: 10,2 mm

Maka:

$$A = 100 \times 10,2 = 1020 \text{ mm}^2$$

Dengan:

$$A' = 697,06 \text{ mm}^2$$

Sehingga:

$$\text{Die Swell Ratio} = \frac{1020}{697,06} \approx 1,463$$

Nilai ini menunjukkan bahwa produk *shoulder wedge* mengalami pengembangan sebesar 1.463 kali dari ukuran *die* aslinya.

b. Analisis *Two-Way ANOVA* dan Hipotesis

Two-Way ANOVA (Analisis Variansi Dua Arah) digunakan untuk menguji pengaruh dua faktor bebas terhadap satu variabel respon, serta melihat adanya interaksi antara kedua faktor tersebut. Metode ini sesuai untuk rancangan faktorial, di mana masing-masing kombinasi level faktor diuji pengaruhnya secara simultan. Dalam pengolahan data ini, *Two-Way ANOVA* diterapkan untuk mengetahui pengaruh faktor beban ekstrusi dan viskositas terhadap dimensi produk, yaitu lebar dan ketebalan *shoulder wedge*, serta interaksinya.

Perhitungan *F-value* dilakukan untuk mengukur seberapa besar pengaruh suatu faktor atau interaksi antar faktor terhadap variabel

respon dibandingkan dengan variabilitas acak atau galat (*error*). Nilai F dihitung dengan membandingkan Mean Square perlakuan terhadap Mean Square galat. Secara matematis, *F-value* dirumuskan sebagai berikut :

$$F = \frac{MS \text{ perlakuan}}{MS \text{ galat}} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan

$$MS_{\text{perlakuan}} = \frac{SS_{\text{perlakuan}}}{DF_{\text{perlakuan}}}$$

$$MS_{\text{galat}} = \frac{SS_{\text{galat}}}{DF_{\text{galat}}}$$

Keterangan:

SS = *Sum of Squares*, jumlah kuadrat deviasi terhadap rata-rata

DF = *Degrees of Freedom*, derajat kebebasan

MS = *Mean Square*, nilai rata-rata kuadrat

Setiap faktor (misalnya beban ekstrusi dan viskositas) maupun interaksinya akan memiliki nilai SS dan DF sendiri. Setelah diperoleh nilai Mean Square masing-masing, nilai F dihitung untuk setiap faktor dan interaksi.

p-value merupakan probabilitas untuk memperoleh nilai F yang sama ekstrem atau lebih ekstrem dibandingkan dengan nilai F hasil

perhitungan, dengan asumsi bahwa hipotesis nol (H_0) benar. *p-value* dihitung menggunakan distribusi F kumulatif, yaitu:

$$p\text{-value} = P(F_{hitung} \geq F_{kritis}) \dots\dots\dots (4)$$

Dalam praktiknya, nilai *p* diperoleh dengan mencari luas area di bawah kurva distribusi F dimulai dari nilai F yang dihitung ke arah kanan (*right-tail probability*). Perhitungan ini melibatkan integral dari fungsi distribusi F, yang secara manual cukup kompleks, sehingga pada umumnya digunakan perangkat lunak statistik seperti Minitab, SPSS, atau Excel untuk memperoleh nilai *p* secara akurat.

Distribusi F dipengaruhi oleh dua parameter, yaitu:

1. Derajat bebas pembilang (DF_1): berasal dari faktor atau interaksi
2. Derajat bebas penyebut (DF_2): berasal dari galat (error)

p-value kemudian dibandingkan dengan taraf signifikansi (α),

Dalam percobaan ini, taraf signifikansi yang digunakan adalah sebesar 0,05 atau 5%, yang merupakan nilai konvensional dan umum dipakai dalam analisis statistik. Pemilihan taraf signifikansi ini didasarkan pada pertimbangan keseimbangan antara ketelitian analisis dan kemampuan untuk mendeteksi adanya pengaruh yang signifikan dari faktor yang diuji. Jika:

1. $p\text{-value} < \alpha$: maka H_0 ditolak $\rightarrow$ terdapat pengaruh yang signifikan

2. $p\text{-value} \geq \alpha$: maka H_0 tidak ditolak $\rightarrow$ tidak terdapat pengaruh signifikan

Dengan demikian, $F\text{-value}$ dan $p\text{-value}$ bekerja secara bersamaan dalam Two-Way ANOVA untuk menguji validitas statistik dari pengaruh masing-masing faktor terhadap variabel respon yang diamati.

Untuk analisis ini, dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

1. Hipotesis nol (H_0): Tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari beban ekstrusi, viskositas, maupun interaksinya terhadap lebar dan ketebalan produk *shoulder wedge*.
2. Hipotesis alternatif (H_1): Terdapat pengaruh yang signifikan dari beban ekstrusi, viskositas, maupun interaksinya terhadap lebar dan ketebalan produk *shoulder wedge*.

Jika nilai $p\text{-value} < 0,05$, maka H_0 ditolak, yang berarti bahwa faktor tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati.

c. Analisis Regresi Linear

Metode regresi linear berganda untuk membentuk model matematis yang menjelaskan hubungan antara variabel bebas (beban ekstrusi dan viskositas) terhadap variabel terikat (lebar dan ketebalan produk). Model regresi berganda digunakan untuk keperluan prediksi

serta untuk mengetahui besar kontribusi masing-masing faktor terhadap respon.

Secara umum, model regresi linear dituliskan sebagai berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \dots \dots \dots (5)$$

dengan keterangan:

1. Y = variabel respon
2. X = variabel independen
3. β_0 = intercept
4. β_1 = koefisien regresi masing-masing variabel bebas
5. ε = error

Pada hasil regresi terdapat Koefisien determinasi, yang dilambangkan dengan R^2 , adalah ukuran statistik yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar proporsi variasi dari variabel respon (dependen) yang dapat dijelaskan oleh variabel bebas (independen) dalam model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, atau dalam bentuk persentase antara 0% hingga 100%.

$$R^2 = \frac{SS \text{ regresi}}{SS \text{ total}} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

SS regresi = jumlah kuadrat regresi (variabilitas yang dijelaskan oleh model)

SS total = jumlah kuadrat total (keseluruhan variabilitas data terhadap rata-rata)

P-value juga digunakan untuk menguji signifikansi keseluruhan model regresi melalui uji F, dengan rumus:

$$F = \frac{MS \text{ regresi}}{MS \text{ residual}} \dots\dots\dots (7)$$

Dan :

$$p\text{-value} = P(F_{\text{hitung}} \geq F_{\text{kritik}}) \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

SS = *Sum of Squares*, jumlah kuadrat deviasi terhadap rata-rata

DF = *Degrees of Freedom*, derajat kebebasan

MS regresi = *Mean Square*, nilai rata-rata kuadrat regresi

MS residual = *Mean Square*, nilai rata-rata kuadrat residual

Artinya, nilai *p-value* merepresentasikan luas area di bawah kurva distribusi F yang terletak di sebelah kanan nilai F hitung. Semakin kecil nilai *p-value*, maka semakin kuat bukti untuk menolak hipotesis nol dan menyimpulkan bahwa model regresi yang diuji memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik. Dengan kata lain, *p-value* yang rendah menunjukkan bahwa variabel-variabel independen dalam model secara bersama-sama memberikan kontribusi yang signifikan terhadap variasi variabel dependen yang diamati.