

Analisis Kestabilan Sistem Pengendalian Level Tangki Minyak pada *Boiler Drum Simulator* Model BDT921 dengan Metode *Pole Analysis* dan *Bode Plot*

Hilma Kurnia Fandana*, Alifia Nur Khabiba Bilhaq

Universitas Brawijaya, Kota Malang

INFORMASI NASKAH

Diterima : 19 Agustus 2025
Direvisi : 10 Maret 2026
Disetujui : 13 Maret 2026
Terbit : 31 Maret 2026

Email korespondensi:
hilmakf@gmail.com

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/sp/2026-1/1374>

ABSTRAK

Boiler Drum Simulator BDT921 merupakan salah satu media pelatihan di PPSDM Migas Cepu yang dirancang untuk mensimulasikan proses kerja sebuah *boiler* tipe *drum* di industri. Salah satu aspek penting dalam sistem ini adalah pengendalian level air dalam *drum* yang digunakan untuk menjaga kinerja dan keselamatan sistem. Penelitian ini membahas analisis kestabilan sistem pengendalian level pada Tangki 11 (T11) dengan menggunakan metode analisis, yaitu *pole analysis* untuk mengetahui letak *pole* sistem, dan *bode plot* untuk memberikan gambaran terhadap *gain margin* dan *phase margin* yang menjadi parameter penting dalam menentukan batas kestabilan sistem terhadap gangguan atau perubahan parameter. Data diperoleh dari respon *process variable* (PV) yang berupa level air terhadap perubahan *manipulated variable* (MV) berupa bukaan katup, kemudian diolah menggunakan *software* MATLAB untuk mendapatkan fungsi transfer orde dua. Hasil identifikasi menunjukkan model dengan pembilang $2.294s + 0.02343$ dan penyebut berpangkat dua pada variabel s . Analisis *pole-zero* menunjukkan dua *pole* real di $s \approx -0.1206$ (*pole* cepat) dan $s \approx -0.0099$ (*pole* lambat), serta satu *zero* di $s \approx -0.0102$ yang mempercepat pencapaian *steady state*. Seluruh *pole* berada di sisi kiri sumbu nyata, menandakan sistem stabil. *Bode Plot* menunjukkan *phase margin* sebesar 93° pada frekuensi 2,29 rad/s, *gain margin* tak hingga, dan karakteristik *low-pass filter* dengan respon halus tanpa osilasi berlebih. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol level T11 memiliki kestabilan yang tinggi, jauh dari batas ketidakstabilan sistem, serta kinerja dinamik yang andal untuk aplikasi pengendalian level cairan pada *boiler drum*.

Kata kunci: *Bode Plot*, *Boiler Drum Simulator*, Kestabilan Sistem, Pengendalian Level, *Pole Analysis*



PENDAHULUAN

Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi (PPSDM Migas) Cepu merupakan salah satu pusat pelatihan di bidang minyak dan gas yang didasarkan pada potensi keilmuan. Selain itu, terdapat fasilitas praktik dan peralatan instrumentasi secara lengkap untuk memenuhi kebutuhan pelatihan serta mendukung pembelajaran sistem kontrol industri secara nyata. *Workshop Instrumentasi* merupakan salah satu fasilitas di PPSDM Migas Cepu yang menyediakan sistem *boiler drum simulator* lengkap dengan peralatan instrumentasi seperti sensor tekanan, suhu, *flow*, level, *control valve*, serta sistem pengendalian otomatis.

Boiler Drum Simulator BDT921 merupakan salah satu media pelatihan di PPSDM Migas Cepu yang dirancang untuk mensimulasikan proses kerja sebuah *boiler* tipe *drum* di industri. Salah satu aspek penting dalam sistem ini adalah pengendalian level air dalam *drum* yang digunakan untuk menjaga kinerja dan keselamatan sistem. Level air yang terlalu rendah dapat menyebabkan *overheating* pada pipa-pipa pemanas sehingga berisiko merusak peralatan. Tangki 11 (T11) pada *simulator* merepresentasikan *drum* utama *boiler*, di mana level airnya dikendalikan secara otomatis menggunakan sistem kontrol umpan balik (*feedback control*). Pemahaman terhadap karakteristik kestabilan sistem kontrol pada Tangki 11 (T11) merupakan aspek yang krusial dalam memastikan sistem mampu merespons perubahan beban maupun gangguan secara efektif tanpa mengalami kehilangan kendali. Analisis kestabilan dapat dilakukan melalui pendekatan domain waktu (*time domain*) maupun domain frekuensi (*frequency domain*). Pada penelitian ini digunakan dua metode, yaitu *Pole Analysis* untuk menilai letak akar karakteristik dan *Bode Plot* untuk mengevaluasi margin kestabilan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam terkait performa sistem kontrol level T11 pada *simulator*, serta menjadi referensi bagi optimasi parameter pengendalian pada sistem *boiler drum* di lingkungan industri migas.

Penelitian ini berfokus pada analisis sistem pengendalian level pada Tangki 11 (T11) pada *Boiler Drum Simulator* Model BDT921. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana memperoleh model matematis sistem pengendalian level tersebut berdasarkan data eksperimen yang diperoleh selama proses pengujian. Setelah model matematis diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis kestabilan sistem menggunakan metode *Pole Analysis* dengan mengamati posisi *pole* dan *zero* pada peta *pole-zero*. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji margin kestabilan serta karakteristik respon frekuensi sistem melalui analisis menggunakan metode *Bode Plot*.

Penelitian ini dibatasi pada sistem pengendalian level Tangki 11 (T11) pada *Boiler Drum Simulator* Model BDT921 yang berada di *Workshop Instrumentasi* PPSDM Migas Cepu. Model fungsi transfer yang digunakan dalam analisis dibatasi pada sistem orde dua yang diperoleh melalui proses identifikasi sistem berdasarkan data eksperimen. Selain itu, metode analisis kestabilan yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada dua pendekatan utama, yaitu *Pole Analysis* dan *Bode Plot*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh model matematis sistem pengendalian level Tangki 11 (T11) melalui proses identifikasi sistem berdasarkan data eksperimen yang diperoleh dari pengujian. Model tersebut kemudian digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem dengan mengamati posisi *pole* dan *zero* pada peta *pole-zero* menggunakan metode *Pole Analysis*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi margin kestabilan serta karakteristik respon frekuensi sistem melalui analisis menggunakan *Bode Plot*.

1. *Boiler Drum Simulator* Model BDT921

Boiler Drum Simulator BDT921 merupakan sebuah alat bantu pelatihan (*training kit*) yang dirancang untuk mensimulasikan proses kerja sebuah *boiler* tipe *drum* di industri. Di PPSDM Migas Cepu, alat ini digunakan sebagai media pembelajaran praktik dalam memahami prinsip kerja, pemantauan



parameter proses, serta sistem proteksi dan alarm yang umum digunakan pada *boiler* industri. Operasi Boiler Drum Simulator BDT921 mencakup pengaturan aliran *feedwater* serta kontrol level dan tekanan. Dalam *simulator* ini, tekanan dan level air disimulasikan menggunakan sensor tekanan dan level, yang memberikan sinyal *input* ke sistem kontrol. *Output* dari sistem ini yaitu pengontrolan katup (*valve*), alarm, dan indikator. Pada Tangki 11 (T11) direpresentasikan proses pengendalian level air secara otomatis dengan menyesuaikan *set point* yang diberikan oleh operator melalui *controller* (Mulyana, et al. 2009).

2. Sistem Pengendalian Level Air

Pengendalian sistem level air adalah proses mengatur ketinggian permukaan air dalam suatu wadah, tangki, atau *drum* agar tetap berada pada nilai yang diinginkan (*setpoint*), meskipun terdapat gangguan atau perubahan kondisi operasi. Tujuan utama dari pengendalian level air ini adalah untuk menjaga keseimbangan antara debit masuk (*inflow*) dan debit keluar (*outflow*) sehingga volume air yang tersimpan stabil sesuai kebutuhan proses (Hadi, et al. 2013).

3. Kestabilan Sistem Kontrol

Menurut Trigka & Dritisas (2022), Sistem kontrol merupakan bidang rekayasa yang mempelajari bagaimana suatu sistem dinamis dapat dikendalikan dan menghasilkan keluaran sesuai nilai yang diinginkan. Salah satunya, melalui mekanisme umpan balik untuk menghadapi gangguan dan perubahan parameter. Teori kontrol modern banyak diterapkan pada sistem industri seperti *boiler*, robotika, dan proses manufaktur karena mampu memberikan analisis kestabilan dan performa sistem secara matematis dalam domain waktu maupun frekuensi (Pedersen & Morales, 2020).

4. Transfer Function

Menurut Astrom & Murray (2021), *transfer function* atau fungsi alih merupakan salah satu konsep paling fundamental dalam analisis sistem kontrol linier waktu-invarian (LTI). Sistem disebut *time-invariant* apabila karakteristik atau parameter dinamisnya dianggap tetap terhadap waktu, sehingga respon sistem terhadap masukan yang sama tidak berubah meskipun diberikan pada waktu yang berbeda. *Transfer function* digunakan untuk merepresentasikan hubungan matematis antara sinyal masukan dan keluaran suatu sistem dalam domain *Laplace*, dengan asumsi kondisi awal bernilai nol.

Dalam sistem kontrol, fungsi alih dinyatakan sebagai $G(s) = Y(s) / U(s)$, di mana $G(s)$ merupakan *transfer function* yang menggambarkan hubungan dinamis antara masukan dan keluaran sistem. $U(s)$ adalah transformasi *Laplace* dari sinyal masukan $u(t)$, seperti sinyal kontrol atau perubahan beban, sedangkan $Y(s)$ adalah transformasi *Laplace* dari sinyal keluaran $y(t)$, seperti level atau tekanan yang dikendalikan. Variabel s merupakan parameter kompleks dalam transformasi *Laplace* yang digunakan untuk menganalisis karakteristik respon dan kestabilan sistem dalam domain frekuensi maupun waktu (Astrom & Murray, 2021). Representasi ini sangat penting karena memungkinkan persamaan diferensial orde tinggi yang menggambarkan dinamika sistem diubah menjadi bentuk aljabar rasional yang lebih sederhana, sehingga mempermudah analisis respon sistem baik pada domain waktu maupun frekuensi (Mao et al., 2023).

5. Poles & Zero

Menurut Devarapalli & Kumar (2021), *poles* dan *zeros* merupakan parameter utama dalam *transfer function* yang menggambarkan karakteristik dinamis suatu sistem kontrol. *Pole* adalah nilai sss yang menyebabkan penyebut fungsi alih bernilai nol sehingga respon sistem menjadi sangat besar atau tak terhingga, sedangkan *zero* adalah nilai sss yang menyebabkan pembilang fungsi alih bernilai nol sehingga keluaran sistem menjadi nol pada kondisi tertentu. Lokasi *pole* pada bidang kompleks *s-plane* memiliki pengaruh paling besar terhadap kestabilan dan bentuk respon sistem, di mana sistem kontinu

dikatakan stabil apabila seluruh *pole* berada di sebelah kiri sumbu imajiner. *Pole* juga menentukan kecepatan respon, waktu tunak, serta kemungkinan munculnya osilasi. Sementara itu, *zeros* berperan dalam membentuk respon transien dan respon frekuensi, serta dapat memperkuat atau memperlemah pengaruh *pole* tertentu, terutama pada sistem *non-minimum phase*. Oleh karena itu, analisis *pole-zero* sangat penting dalam desain pengendali karena memberikan informasi langsung mengenai kestabilan, performa, dan karakteristik dinamis sistem industri seperti pengendalian level dan tekanan pada *boiler drum* (Ou et al., 2025).

6. Orde Sistem

Orde sistem menunjukkan tingkat kompleksitas dinamika suatu sistem, yang ditentukan oleh jumlah *pole* atau derajat tertinggi penyebut *transfer function* (Wang & Li, 2022). Sistem orde satu memiliki respon paling sederhana, biasanya berbentuk eksponensial naik atau turun tanpa osilasi, sehingga sering digunakan untuk model proses seperti tangki air sederhana. Sistem orde dua memiliki dinamika lebih kompleks karena dapat menghasilkan *overshoot* dan osilasi tergantung pada nilai rasio redaman, sehingga banyak dijumpai pada sistem mekanik atau tekanan. Sistem orde tiga atau lebih tinggi memiliki lebih banyak mode dinamis sehingga responnya semakin rumit, dapat melibatkan kombinasi beberapa konstanta waktu dan osilasi, serta lebih sulit dianalisis dan dikendalikan secara langsung. Oleh karena itu, semakin tinggi orde sistem, semakin besar kebutuhan metode kontrol lanjutan atau penyederhanaan model agar perancangan pengendali tetap efektif (Mohamed & Kumar, 2019).

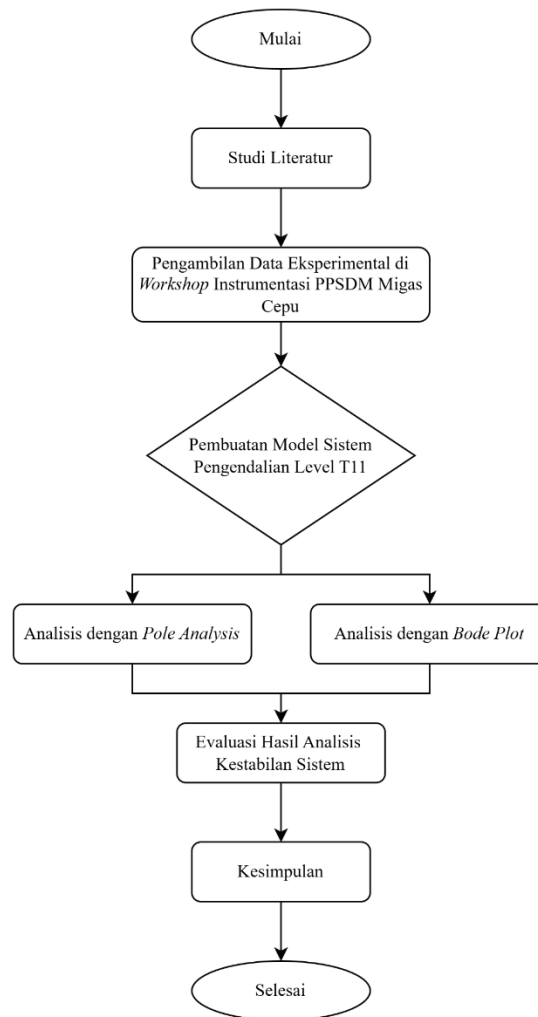
7. Kriteria Kestabilan Sistem

Menurut Smith & Chen (2018), kriteria kestabilan merupakan metode analisis yang digunakan untuk menentukan apakah suatu sistem kontrol akan tetap berada dalam kondisi terkendali ketika mengalami gangguan atau perubahan masukan. Secara umum, sistem dikatakan stabil apabila seluruh *pole* dari fungsi alih *loop* tertutup berada pada bagian kiri bidang kompleks sss (*real part negative*), sehingga respon sistem akan mereda seiring waktu dan tidak divergen. Untuk mengevaluasi kestabilan, terdapat beberapa kriteria klasik yang banyak digunakan dalam teori kontrol.

Kriteria *Routh-Hurwitz* merupakan metode aljabar yang memeriksa kestabilan berdasarkan tanda koefisien polinom karakteristik tanpa harus menghitung akar secara langsung, sehingga masih banyak digunakan dalam analisis sistem linier orde tinggi. Selain itu, kriteria *Nyquist* menggunakan pendekatan domain frekuensi dengan memanfaatkan plot *Nyquist* dari fungsi alih *loop* terbuka untuk menentukan kestabilan *loop* tertutup melalui konsep *encirclement* terhadap titik $-1-1-1$. Metode lain seperti *root locus* juga digunakan untuk menggambarkan pergeseran lokasi *pole* tertutup ketika nilai gain berubah, sehingga membantu dalam desain pengendali yang memenuhi kestabilan dan performa yang diinginkan. Dengan adanya kriteria-kriteria tersebut, kestabilan sistem dapat dianalisis secara sistematis baik dalam domain waktu maupun frekuensi, sehingga menjadi aspek fundamental dalam perancangan sistem kontrol industri seperti pengendalian level dan tekanan pada *boiler drum* (Liu et al., 2023).



METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan metode eksperimental melalui pendekatan kuantitatif pada sistem pengendalian level air Tangki 11 *Boiler Drum Simulator* BDT921 di PPSDM Migas Cepu. Data diperoleh melalui pengujian *step input* pada *manipulated variable* (MV), Pengujian diawali dengan menyiapkan sistem pada kondisi operasi awal yang stabil (*steady-state*), di mana level air tangki berada pada nilai konstan dengan *process variable* (PV) awal sekitar 398 berdasarkan pembacaan sensor. Selama eksperimen, *valve outlet* dipertahankan pada bukaan tetap untuk menjaga debit keluaran konstan, sehingga perubahan level yang terjadi hanya dipengaruhi oleh *manipulated variable* (MV). MV berupa sinyal kontrol bukaan *valve inlet* diatur pada kondisi awal sekitar 24–25%, kemudian diberikan *step input* melalui perubahan bukaan *valve inlet* untuk menghasilkan respon dinamis pada level air. Respon sistem direkam terhadap waktu melalui panel instrumentasi *simulator* dalam bentuk data MV dan PV, selanjutnya diolah untuk memperoleh fungsi transfer sebagai model sistem. Analisis karakteristik dinamis dan kestabilan dilakukan menggunakan MATLAB melalui pendekatan *pole-zero* serta *bode plot*.

Analisis kestabilan sistem dilakukan dengan pendekatan *pole-zero* melalui hasil identifikasi respon sistem. Posisi *pole* dan *zero* pada bidang kompleks diamati untuk menilai kecenderungan sistem terhadap kestabilan. Suatu sistem dinyatakan stabil apabila seluruh *pole* berada pada sisi kiri sumbu imajiner, karena kondisi tersebut menunjukkan bahwa respon transien akan distabilkan seiring berjalannya waktu hingga mencapai *steady state*. Selain itu, jarak *pole* dari sumbu imajiner digunakan untuk menilai

kecepatan respon, sedangkan keberadaan *zero* dipertimbangkan dalam pengaruhnya terhadap bentuk dan kehalusan transisi respon sistem (Ogata, 2010).

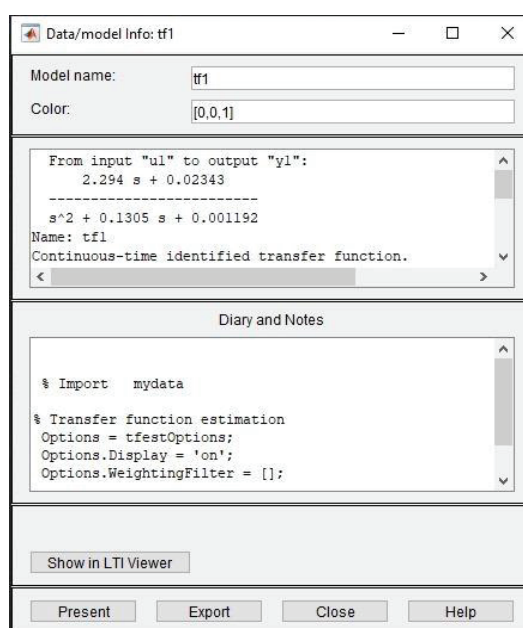
Selanjutnya dilakukan analisis dengan pendekatan *bode plot* juga digunakan untuk mengevaluasi kestabilan pada domain frekuensi. Nilai *phase margin* (PM) dan *gain margin* (GM) diamati untuk menilai jarak kestabilan sistem. PM merepresentasikan jarak pergeseran fase yang masih dapat ditoleransi sebelum sistem mencapai kondisi kritis pada -180° , sedangkan GM merepresentasikan jarak penguatan yang masih dapat diterima sebelum sistem kehilangan kestabilan. Secara umum, sistem dinyatakan stabil apabila PM bernilai positif, dengan nilai di atas 30° biasanya dianggap cukup aman, dan GM lebih besar dari 0 dB. Semakin besar nilai PM dan GM, semakin jauh jarak kestabilan sistem dari batas ketidakstabilan, sehingga sistem lebih mampu bertahan terhadap variasi parameter maupun gangguan eksternal. Selain itu, karakteristik *magnitude plot* digunakan untuk mengidentifikasi sifat sistem terhadap sinyal berfrekuensi rendah dan tinggi, sedangkan *phase plot* dimanfaatkan untuk menggambarkan orde dinamik yang mendominasi sistem (Nise, 2011).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan proses identifikasi sistem menghasilkan data eksperimen yang selanjutnya diolah untuk memperoleh fungsi transfer serta karakteristik respon waktu sistem yang akan digunakan untuk melakukan analisa kestabilan sistem.

Tabel 1. Tabel Parameter Sistem

PARAMETER	NILAI	SATUAN
Rise Time	20.67	s
Settling Time	60.78	s
Peak Value	19.63	(unit)
Peak Time	316.51	s
Overshoot	0	%



Gambar 2. Hasil Fungsi Transfer Menggunakan MATLAB.

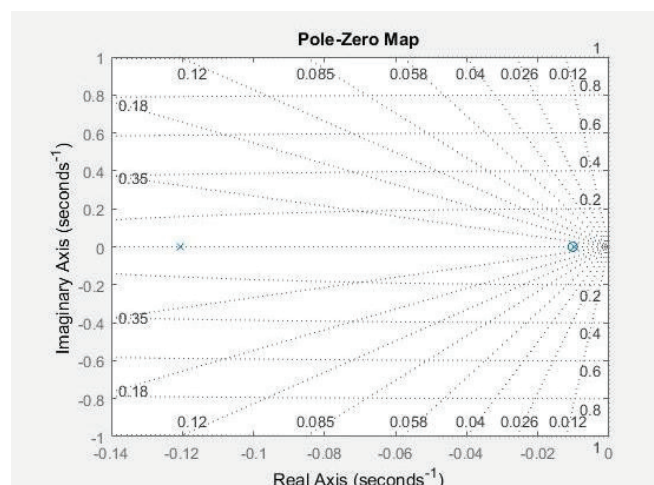


Dari proses pengambilan data diperoleh respon *process variable* (PV) berupa level air pada tangki 11 terhadap gangguan atau perubahan lonjakan nilai *manipulated variable* (MV) yang berupa bukaan *valve*. Data tersebut kemudian diolah melalui MATLAB sehingga fungsi transfer dapat ditemukan. Selanjutnya, dari fungsi transfer tersebut dilakukan analisis kestabilan sistem dengan menggunakan *pole* dan *bode plot* sistem.

Pada MATLAB nilai *manipulated variabel* (MV) diatur sebagai nilai *u1 (input)* dan nilai *process variabel* (PV) diatur sebagai nilai *u2 (output)*. Fungsi transfer ini dibuat dengan diaturnya sistem menjadi orde 2 melalui MATLAB dan orde juga dapat ditunjukkan oleh pangkat tertinggi *s* pada penyebut yaitu pangkat 2. Kemudian koefisien pada pembilang, yaitu $2.294s + 0.02343$ menunjukkan pengaruh laju perubahan *input*. Model ini dihasilkan melalui metode identifikasi data eksperimen dan dapat digunakan sebagai representasi matematis agar karakteristik sistem dapat dianalisis sebagai strategi pengendalian yang sesuai.

A. Pole

Analisis *pole* merupakan salah satu langkah fundamental dalam kajian kestabilan sistem kontrol karena letak *pole* pada bidang kompleks secara langsung menentukan karakteristik respon dinamis suatu sistem. *Pole* menggambarkan akar-akar dari penyebut fungsi transfer yang mempengaruhi kecepatan respon, kecenderungan osilasi, serta kestabilan sistem secara keseluruhan. Suatu sistem dikatakan stabil apabila seluruh *pole* berada pada sisi kiri bidang kompleks (memiliki bagian *real* negatif), sehingga respon sistem akan mereda seiring waktu. Analisis *pole* dilakukan melalui pemetaan *Pole-Zero Map* menggunakan MATLAB untuk mengevaluasi kestabilan sistem pengendalian level Tangki 11 (T11) pada *Boiler Drum Simulator Model BDT921*.



Gambar 3. Hasil Plot Pole-Zero Menggunakan MATLAB.

```
Command Window

Nilai Zero:
    -0.0102

Nilai Pole:
    -0.1206
    -0.0099

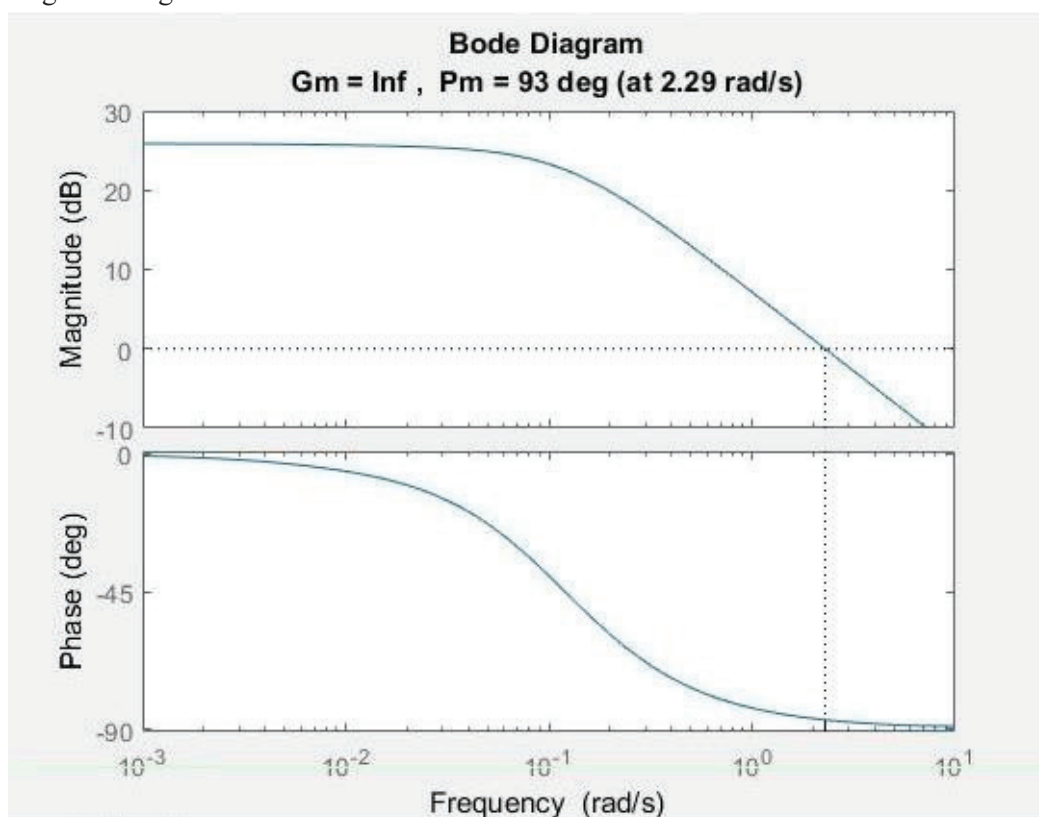
fx >> |
```

Gambar 4. Output Nilai Pole-Zero

Dari gambar 2 dan 3 dapat dilakukan analisa kestabilan sistem berdasarkan peta *pole-zero*, sistem memiliki dua *pole real* di $s \approx -0.1206$ dan $s \approx -0.0099$, serta satu *zero* di $s \approx -0.0102$. Seluruh *pole* berada di sisi kiri dari titik 0 sumbu nyata (*real axis*), sehingga sistem berada dalam kondisi stabil. Letak *pole* terhadap sumbu imajiner mempengaruhi kecepatan respon sistem pada domain waktu. *Pole* yang posisinya lebih jauh dari sumbu imajiner (-0.1206) disebut *pole* cepat karena respon yang dihasilkan menuju nilai yang diinginkan dalam waktu relatif singkat (sekitar 8 detik), sedangkan *pole* yang posisinya lebih dekat dengan sumbu imajiner (-0.0099) disebut *pole* lambat karena dibutuhkan waktu lebih lama agar kondisi stabil dapat tercapai (sekitar 101 detik). Grafik respon waktu menunjukkan bahwa pada awalnya sistem mengalami kenaikan pesat akibat pengaruh *pole* cepat, kemudian dilanjutkan kenaikan lambat hingga mencapai kondisi stabil (*steady state*). Kehadiran *zero* di -0.0102 yang letaknya dekat dengan *pole* lambat sedikit mengurangi efek kelambatan ini, sehingga kondisi stabil dapat dicapai dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan jika *zero* tersebut tidak ada. Hubungan antara peta *pole-zero* dan respon waktu ini memberikan gambaran menyeluruh tentang dinamika sistem, yang dapat dimanfaatkan dalam perancangan pengendali untuk mencapai kinerja yang diinginkan.

B. Bode Plot

Analisis respon frekuensi merupakan salah satu metode penting dalam evaluasi kestabilan dan performa sistem kontrol. Salah satu teknik yang umum digunakan adalah *bode plot*, yaitu grafik yang menunjukkan hubungan antara magnitudo dan fase sistem terhadap perubahan frekuensi. Melalui *bode plot*, dapat diperoleh parameter kestabilan seperti *gain margin* (GM) dan *phase margin* (PM) yang menggambarkan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya osilasi atau ketidakstabilan. Pada sub-bab ini, respon frekuensi sistem kontrol level Tangki 11 (T11) dianalisis menggunakan MATLAB untuk menilai karakteristik kestabilan serta kemampuan sistem dalam meredam gangguan pada berbagai rentang frekuensi.



Gambar 5. Hasil Plot Bode Diagram Menggunakan MATLAB.



Berdasarkan hasil *bode plot* yang ditunjukkan pada gambar 4, sistem ini memiliki *phase margin* (Pm) sebesar 93° pada frekuensi 2,29 rad/s. Nilai *phase margin* yang besar menunjukkan bahwa sistem beradal dalam batas aman kondisi stabil dan memiliki kemampuan meredam osilasi dengan baik. Sementara itu, *gain margin* (Gm) bernilai tak hingga (∞), yang berarti penambahan penguatan dalam jumlah besar tidak akan mempengaruhi kestabilan sistem atau sistem akan tetap stabil.

Pada bagian *magnitude plot* (grafik atas), terlihat bahwa pada frekuensi rendah, penguatan sistem berada di kisaran 20–30 dB, lalu secara bertahap menurun hingga melewati titik 0 dB di frekuensi menengah. Karakter ini menunjukkan bahwa sistem bekerja seperti penyaring rendah (*low-pass filter*), yang mampu melewatkan sinyal berfrekuensi rendah dengan baik, namun melemahkan sinyal berfrekuensi tinggi. Pada *phase plot* (grafik bawah), fase awal berada di sekitar -10° , kemudian turun secara bertahap hingga mendekati -90° pada frekuensi tinggi. Pergeseran fase maksimum yang hanya mendekati -90° ini menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik orde dua. Secara keseluruhan, hasil analisis dapat dilihat bahwa sistem tidak hanya stabil, tetapi juga berada pada jarak yang jauh dari batas ketidakstabilan sistem dan respon yang mulus terhadap perubahan frekuensi.

Dari kedua pendekatan yang telah dilakukan, menghasilkan kesimpulan yang serupa. Yaitu, dari pendekatan peta *pole-zero*, respon sistem diperlihatkan terbentuk oleh komponen cepat dan lambat yang secara bertahap membawa sistem menuju *steady state*. Kehadiran *zero* di sekitar *pole* lambat berkontribusi dalam mempercepat tercapainya kestabilan. Dari hasil *bode plot*, ditunjukkan bahwa sistem berada pada jarak yang jauh dari batas ketidakstabilan sistem, serta kemampuan meredam gangguan pada berbagai frekuensi. Kemudian pada *bode plot* domain waktu, kestabilan ditunjukkan oleh tercapainya *steady state* tanpa osilasi berlebih, sedangkan pada domain frekuensi ditunjukkan oleh nilai *phase margin* dan *gain margin* yang besar. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol level yang dianalisis stabil.

Selain itu, berdasarkan hasil analisis respon waktu yang tertera pada tabel 1, sistem juga menunjukkan kinerja yang stabil. Dimana, nilai *rise time* sebesar 20.67 s menandakan sistem mampu mencapai nilai referensi dengan cukup cepat, sedangkan *settling time* sebesar 60.78 s menunjukkan sistem mencapai kondisi tunak dalam waktu yang relatif singkat. Selain itu, nilai *overshoot* sebesar 0% mengindikasikan tidak adanya lonjakan respon melebihi *steady-state*. Dengan demikian, sistem dapat dikatakan stabil dan memberikan respon yang halus tanpa osilasi signifikan. Sehingga, sistem ini sesuai untuk diaplikasikan pada pengendalian level cairan di *boiler drum simulator*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Fungsi transfer orde dua yang diperoleh dari identifikasi data eksperimen mampu merepresentasikan dinamika sistem pengendalian level Tangki 11 pada *Boiler Drum Simulator* Model BDT921.
2. Analisis *pole-zero* menunjukkan sistem memiliki dua *pole* real negatif dan satu *zero*, seluruh *pole* berada di sisi kiri sumbu nyata sehingga sistem tergolong stabil. Kehadiran *zero* dekat dengan *pole* lambat mempercepat pencapaian kondisi *steady state*.
3. Berdasarkan *bode plot*, sistem memiliki *phase margin* sebesar 93° dan *gain margin* tak hingga, yang mengindikasikan sistem berada pada batas aman kestabilan serta mampu meredam osilasi dengan baik.
4. Karakteristik *low-pass filter* pada respon frekuensi menunjukkan sistem mampu melewatkan sinyal berfrekuensi rendah dan melemahkan sinyal berfrekuensi tinggi, sesuai dengan kebutuhan pengendalian level.

Secara keseluruhan, sistem kontrol level T11 dinyatakan stabil, tangguh terhadap gangguan, dan layak untuk diaplikasikan pada proses pengendalian level cairan di *boiler drum*.

SARAN

Berdasarkan kesimpulan yang telah didapatkan, disarankan penelitian selanjutnya mencakup beberapa hal berikut:

1. Melakukan identifikasi model dengan orde yang lebih tinggi atau menggunakan pendekatan nonlinier untuk memperoleh representasi sistem yang lebih akurat, mengingat proses *boiler drum* pada kondisi tertentu dapat bersifat kompleks dan tidak sepenuhnya linier.
2. Melakukan validasi model dan analisis kestabilan menggunakan metode tambahan seperti simulasi time-response atau implementasi langsung pada sistem *real-time* untuk memastikan kesesuaian antara model matematis dan perilaku sistem sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2021). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.
- Devarapalli, R., & Kumar, V. (2021). Poles and zeros assignment by state feedbacks in positive linear systems. *Archives of Control Sciences*, 31(4), 739–755. <https://doi.org/10.24425/acs.2021.138693> (<https://doi.org/10.24425/acs.2021.138693>).
- Hadi, D. S. N., Triwiyatno, A., & Setiyono, B. (2013). Pengendalian Level Air Pada Plan Tangki Penampungan Sistem Pengolahan Air Limbah Menggunakan Metode Kontrol PI. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 15(1), 28-35.
- Liu, Q., Zhang, J., & Yang, L. (2023). Application of Nyquist and root-locus methods in robust control design. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 34(1), 89–101. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2023.000012>
- Mao, Q., Xu, Y., & Wang, H. (2023). *Classical stability margins by PID control*. arXiv preprint. [<https://arxiv.org/abs/2311.11460>].
- Mohamed, A., & Kumar, R. (2019). Model order reduction and dynamic behaviour in control systems. *International Journal of Control Theory and Applications*, 12(4), 205–215.
- Mulyana, T., Than, M. N. M., & Hanafi, D. (2009). A Discrete Time Model of Boiler Drum and Heat Exchanger QAD Model BDT 921. In *Proceedings of the International Conference on Instrumentation, Control & Automation (ICA2009)*, pp. 154-159.
- Nise, N. S. (2011). *Control systems engineering (6th ed.)*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering (5th ed.)*. New Jersey Prentice Hall.
- Ou, M., Luo, Y., & Chen, Z. (2025). Sampling zero stability in sampled-data control systems with delays. *Scientific Reports*, 15, 13054. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13054-8>
- Pedersen, N., & Morales, F. (2020). Stability margins and robust control in frequency domain. *Annual Reviews in Control*, 49, 24–39. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.03.002>
- Smith, P., & Chen, Y. (2018). Stability criteria in classical control systems with applications. *Control Engineering Practice*, 73, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.01.005>
- Wang, S., & Li, H. (2022). Reduced-order model design for large-scale control systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 144(7), 071002. <https://doi.org/10.1115/1.4053500>

