

A. Judul Proyek

Simulasi Numerik Suhu *Hotend* dan *Printbed* pada 3D Printer Menggunakan *Lumped-Parameter Model* dan Penerapan *Digital Twin*

B. Nama Lengkap Penulis

Nazhmi Fadhila

C. Afiliasi

Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia

D. Abstrak

Laporan ini mengembangkan *lumped-parameter model* untuk *hotend* (E3D V6) dan *bed printer* 3D (MK2B), lalu melakukan *fitting* model dengan data suhu dan nilai PWM yang direkam dengan OctoPrint. Model satu *node*, diselesaikan secara numerik dengan metode Euler, Heun (RK2), dan RK4, kemudian dibandingkan dengan model dua *node* (blok dan sensor). Parameter dianalisis dengan menggunakan kuadrat terkecil non-linear (RMSE). Hasilnya, RMSE *hotend* dikalkulasikan sebesar $1.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1-node) dan $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2-node) pada suhu sekitar $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan RMSE *bed* sebesar $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1-node) dan $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2-node). Orde konvergensi yang teramati adalah 1.0, 2.0, dan 4.1. Model dua *node* dapat memperbaiki prediksi suhu *hotend*, tetapi tidak untuk suhu *bed*. Investigasi selanjutnya diperlukan untuk memvalidasi model dengan data baru dengan target suhu dan model printer 3D berbeda.

E. Deklarasi Penulis

1. Deep Awareness (of) I

Penulis menyadari bahwa pekerjaan teknis ini dilakukan dengan kesadaran penuh dan ingatan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sebagai satu-satunya sumber ilmu dan kemampuan. Kesadaran ini menjadi dasar tanggung jawab etis, yaitu jujur dalam mengolah data dan melaporkan keterbatasan model.

2. Niat Kegiatan Proyek

Membangun model simulasi suhu *hotend* dan *bed* yang sederhana, dapat dipahami, dan tervalidasi dengan data nyata. Sehingga dapat dijadikan dasar kontrol suhu printer 3D yang akurat.

F. Pendahuluan

Suhu *hotend* dan *bed* sangat menentukan kualitas cetak printer 3D. *Firmware* Marlin mengendalikan suhu dengan PID untuk *hotend* dan bang-bang untuk *bed*. Dengan pemodelan, parameter seperti kapasitas panas (*heat capacity*) dan panas hilang (*heat loss*) dapat diperkirakan dari data suhu yang didapat dari sensor bawaan printer 3D melalui OctoPrint [1]

Pemikiran Awal (tentang Masalah)

Menganalisis Masalah

Seberapa baik model *lumped-parameter* sederhana dapat mereproduksi suhu *hotend* dan *bed* nyata, dan metode numerik mana yang akurat?

Penelitian Sebelumnya dan Kesenjangan yang Ada

Metode *lumped capacitance* adalah pendekatan standar dalam perpindahan panas [2] Pada printer 3D, firmware Marlin dapat mengendalikan *hotend* dengan PID yang disetel otomatis (M303) tanpa model [3]. Kesenjangan atau *research gap* ialah model yang digunakan Marlin tidak dapat berubah seiring dengan data yang diperoleh dari sensor.

Mengurai Masalah

- Mengestimasi P/C dan K/C dari data suhu dan PWM;
- Membuat model termal *hotend* (PID) dan *bed* (bang-bang).
- Menentukan metode numerik yang digunakan.
- Interpretasi hasil.

Dekonstruksi ke Prinsip Dasar

Prinsip yang digunakan ialah sebagai berikut:

- Neraca Energi

$$C \frac{dT}{dt} = P - K(T - T_{\text{amb}})$$

- Perpindahan panas yang terdiri dari konduksi, konveksi dan radiasi dan diwakili dengan koefisien K)
- Teori kontrol (PID dan bang-bang).
- Metode Numerik Euler, Heun dan RK4.

State-of-the-art

Marlin versi terbaru menyediakan *Model Predictive Control* (M306) yang memodelkan *hotend* sebagai beberapa massa termal (blok pemanas, sensor, udara sekitar, dan filamen), dengan parameter *heat capacity* (J/K), koefisien perpindahan panas antar udara (W/K), dan respons sensor. Parameter ini mirip dengan yang diterapkan pada laporan ini. *State-of-the-art* dari laporan ini ialah mencoba untuk menerapkan sebuah sistem dimana model yang digunakan berubah seiring dengan data yang diperoleh dari sensor. Saat ini, laporan belum mencapai tujuan.

G. Metode & Langkah-langkah Solusi

Idealisasi

- Setiap komponen (*hotend*, *bed*) dianggap satu massa dengan suhu seragam (lumped), dengan persamaan:

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot u(t - t_d) - k(T - T_{\text{amb}})$$

Dimana a dan k merupakan:

$$a = \frac{P}{C} \text{ dan } k = \frac{K}{C}$$

- Diasumsikan *heat loss* linear terhadap selisih suhu, suhu *ambient* (26.85 °C), dan kipas pendingin (*blower fan*) mati.
- *u* adalah duty PWM (127 = 100%)
- *t_d* adalah waktu *sensor lag*.

Instruksi (Set)

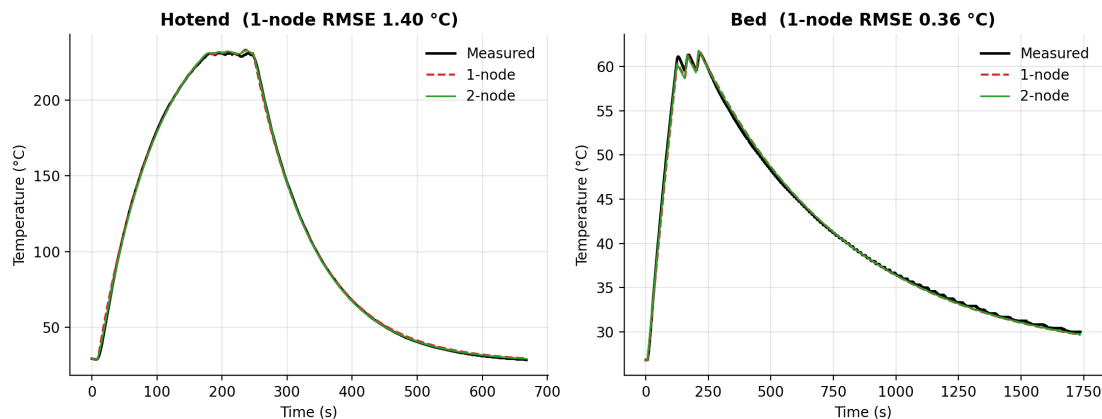
1. *Hotend* dipanaskan ke 230 °C lalu dimatikan sementara *bed* ke 60 °C lalu setelahn beberapa saat dimatikan. Selain itu suhu dan PWM direkam tiap ± 1 detik dan diambil melalui file serial.log di OctoPrint (perintah M105).
2. Data yang diperoleh setelah itu di-*parse* dengan Python menjadi waktu, suhu, dan *duty*.
3. Melakukan *fitting* dengan metode numerik Euler, Heun dan RK4.
4. Melakukan iterasi hingga suhu yang diperoleh sesuai dengan suhu yang diprediksi dengan model.

H. Hasil dan Diskusi

Tabel 1 merangkum parameter hasil *fitting*. Pada *hotend*, hasil *fitting* $P/C = 2.59$ K/s sejalan dengan asumsi parameter *hotend* (24 W dan 10.4 J/K, sekitar 2.3 K/s). Jika *hotend* diasumsikan 24 W (12 V, 6 Ω), maka diperoleh $C \approx 9.3$ J/K dan $K \approx 0.098$ W/K. Nilai k dari data saat *hotend* mati (0.01073 1/s) hanya berbeda sekitar 2% dari *fitting* data penuh (0.01054 1/s), sehingga model dinilai konsisten.

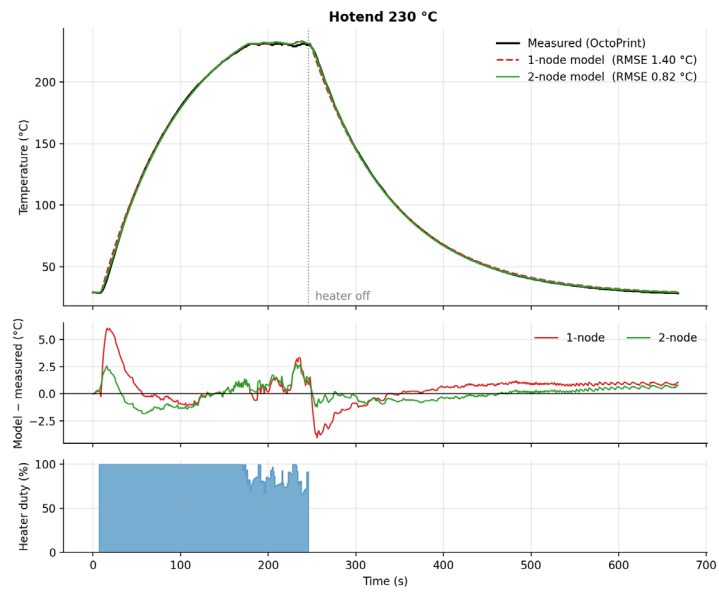
Tabel 1. Parameter hasil pencocokan (*duty* 100% = PWM 127)

Parameter	<i>Hotend</i>	<i>Bed</i>	Satuan
P/C (pada <i>duty</i> 100%)	2.59	0.314	K/s
K/C	0.01054	0.00165	1/s
C/K	≈ 95	≈ 604	s
Waktu <i>sensor lag</i>	≈ 2.0	≈ 2.0	s
RMSE model 1-node	1.40	0.36	°C
RMSE model 2-node	0.82	0.30	°C

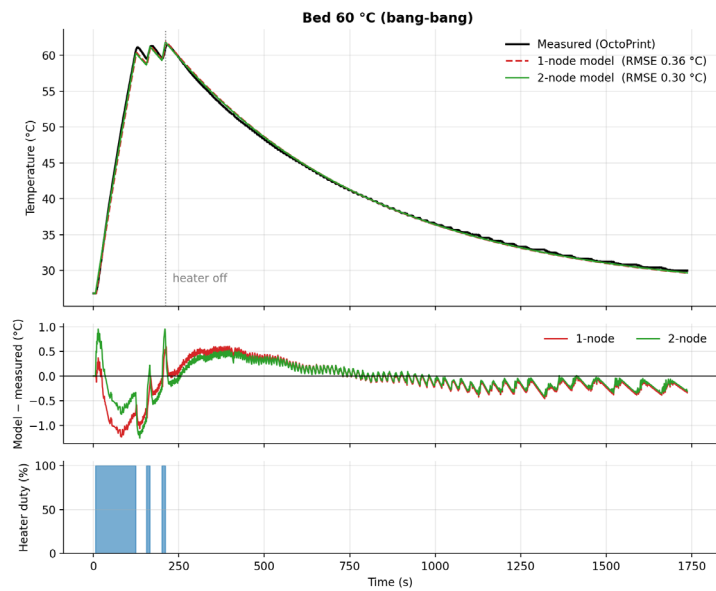


Gambar 1. Perbandingan suhu terukur dan hasil simulasi. (kiri: *hotend*, kanan: *bed*).

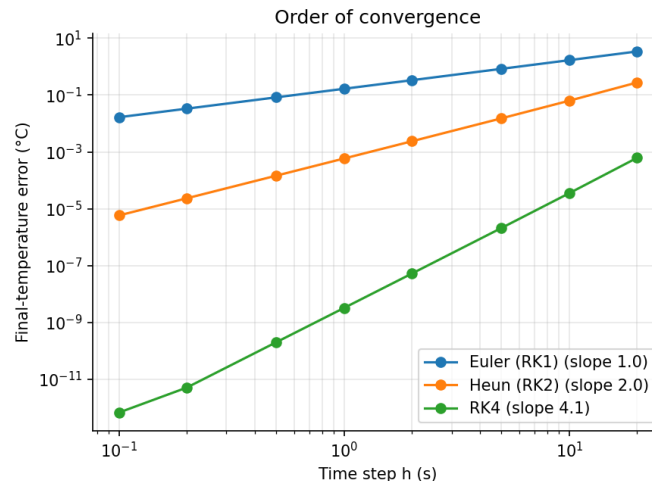
Model 1-node menunjukkan kurva pemanasan dan pendinginan dengan baik (Gambar 1–3). Error terbesar *hotend* muncul pada awal pemanasan (sekitar 6 °C, akibat waktu *sensor lag*) sementara itu model 2-node menurunkan error RMSE hingga sekitar 41% (1.40 menjadi 0.82 °C). Parameter 2-node belum tentu lebih akurat, namun hanya membuktikan bahwa penambahan node dapat menangkap *sensor lag*. *Bed* dikendalikan secara bang-bang (histeresis ± 1 °C) dan untuk model 2-node hanya memperbaiki RMSE dari 0.36 ke 0.30 °C, sehingga model 1-node dinilai sudah cukup akurat.



Gambar 2. Model vs data hotend 230 °C, beserta duty pemanas.



Gambar 3. Model vs data bed 60 °C, beserta duty pemanas.



Gambar 4. Orde konvergensi Euler (1,0), Heun (2,0), dan RK4 (4,1).

Studi konvergensi (Gambar 4) menunjukkan bahwa implementasi metode numerik sudah benar. Keterbatasan dari hasil ini ialah

- *Heat loss* dianggap linear (radiasi diabaikan sehingga akan terdapat error saat pendinginan).
- Model yang digunakan belum dapat divalidasi dengan target suhu dan printer 3D yang berbeda.

I. Kesimpulan, Penutup, Rekomendasi

- Model *lumped-parameter* 1-node cukup untuk mensimulasikan suhu *hotend* (RMSE 1.40 °C) dan *bed* (RMSE 0.36 °C).
- Model 2-node menurunkan RMSE *hotend* sekitar 41% sebagai kompensasi *sensor lag*.
- Euler, Heun, dan RK4 menunjukkan orde konvergensi mendekati 1, 2, dan 4.
- Tujuan yang belum dipenuhi: validasi pada data terpisah (target suhu dan printer 3D berbeda), menambahkan *heat loss* non-linear dan efek dari *blower fan*.

J. Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada dosen pembimbing, rekan, dan pihak lain yang mendukung pelaksanaan proyek ini.

K. Referensi yang Dikutip

- [1] OctoPrint, "OctoPrint," 2012. [Online]. Available: <https://github.com/OctoPrint/OctoPrint>
- [2] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York City, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] Marlin, "MarlinDocumentation," 2016. [Online]. Available: <https://github.com/MarlinFirmware/MarlinDocumentation>

L. Lampiran