

EVALUASI BASIS TARIF DASAR JASA 3D PRINTING DENGAN SIMULASI ANYLOGIC

Julian Anindito Widiatmoko^{*1}, Ratna Purwaningsih², Aries Susanty²

¹ Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro,

² Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Saat ini teknologi 3D Printing sedang sangat berkembang dengan biaya yang semakin terjangkau. Hal ini mendorong bermunculannya jasa cetak 3D di beberapa kota di Indonesia. Model bisnis yang digunakan adalah menerima model 3D dari pelanggan kemudian mencetaknya dengan 3D printer. Disebabkan oleh tidak terbatasnya variasi model 3D yang mungkin diterima, jasa 3D printing perlu menetapkan basis tarif dasar yang dipakai. Terdapat dua pilihan basis tarif dasar yang merepresentasikan biaya langsung, yaitu basis material dan basis waktu cetak. Studi ini mengevaluasi performansi kedua basis tersebut menggunakan simulasi Anylogic dalam memaksimalkan pendapatan. Seratus model 3D digunakan untuk mengakomodir variasi pesanan. Estimasi jumlah material dan waktu cetak untuk masing-masing model didapat dari software slicer dan digunakan sebagai inputan simulasi. Dari hasil simulasi pada rentang waktu operasi satu tahun, didapatkan kesimpulan bahwa meskipun kedua basis tarif dasar menunjukkan keunggulan biaya langsung secara bergantian untuk model 3D yang berbeda, basis material dapat memberikan jumlah pendapatan total yang lebih besar.

Kata kunci: 3D printing; basis tarif; Anylogic; simulation

Rate basis evaluation of 3D printing service using Anylogic simulation. Nowadays, 3D printing technology has been vastly developed at an even more affordable cost. This fact encourages the growth of 3D print services in some Indonesian cities. The business model for this type of service is simple: receiving a 3D model from the customer and then realizing it using 3D printing. Since there are unlimited variations of 3D models that come in, 3D services providers need to determine their basic rate. Two options of rate basis represent direct cost of 3D printing operation, those are material basis and printing time basis. This article evaluates the performance of the two using Anylogic simulation in maximizing revenue. A hundred 3D models were utilized to accommodate variation in order. Material needs and printing time estimation of each model were determined using slicer software as input for the simulation. The result of one year simulation time shows that although both bases can give superiority on direct cost for different individual 3D models, the material basis rate was able to present greater operational income.

Keywords: 3D printing; rate basis; Anylogic; simulation

1. Pendahuluan

3D Printing adalah teknologi manufaktur maju untuk memfabrikasi produk dengan secara bertahap membangun lapisan demi lapisan sehingga menjadi benda tiga dimensi (Kruth et al., 1998). Sering disebut juga dengan *additive manufacturing*, teknologi ini sebenarnya sudah mulai dikembangkan sejak era 80-an, namun masih dengan biaya yang relatif tinggi. Seiring dengan berkembangnya riset baik pada metode operasi maupun material yang dapat digunakan, hari ini 3D

Printing menjadi sangat terjangkau (Canessa et al., 2013). Dalam beberapa aplikasi, 3D Printing bahkan memiliki potensi menjadi metode produksi yang lebih murah dari proses konvensional. Setidaknya ada tiga faktor yang mendukung hal ini, yaitu material yang lebih murah, konsumsi energi yang lebih hemat, dan tenaga kerja yang lebih sedikit (Sunarto et al., 2023).

Ada empat kelompok 3D Printing berdasarkan metode yang digunakan untuk mengendapkan lapisan material, antara lain: *fused deposition modelling* (FDM), *inkjet printing*, *stereolithography*, dan *powder based fusion* (Ngo et al., 2018). Dari keempatnya, FDM adalah salah satu yang paling banyak digunakan. Hal ini dimungkinkan karena bila dibandingkan dengan

^{*} Penulis Korespondensi.

E-mail: julian_w@untidar.ac.id

metode lainnya, FDM memiliki indeks biaya dan indeks waktu proses yang cenderung lebih rendah (Wu et al., 2016).

Prinsip kerja FDM adalah memanaskan material sampai titik leleh sehingga menjadi cenderung cair kemudian melewatkannya melalui sebuah *nozzle*. Selanjutnya, material tersebut akan diendapkan untuk membentuk lapisan-lapisan yang saling bertumpuk menjadi objek tiga dimensi (Mohamed et al., 2015). Material yang banyak digunakan berbentuk filamen dengan diameter 1.75 mm. Bahan dasar filamen adalah polimer *thermoplastic* seperti *Polylactic Acid* (PLA), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *polycaprolactone* (PCL), *polypropylene* (PP), *polyethylene terephthalate glycol-modified* (PETG), *polystyrene* (PS) dan *thermoplastic polyurethane* (TPU) (Xiao & Kan, 2022).

FDM adalah teknologi 3D *Printing* berbiaya relatif rendah, baik ditilik dari harga mesin 3D *Printer*-nya maupun material yang digunakan. Keunggulan kompetitif ini menjadikannya cocok untuk digunakan dalam aktivitas usaha skala kecil (Widiatmoko, 2023). Saat ini di beberapa kota di Indonesia, telah bermunculan bentuk usaha yang melayani jasa pembuatan produk berbasis 3D *Printing*. Beberapa diantaranya seperti NUSAMA 3D, Fomu 3D, Evolusi 3D, Centralab, 3D Zaiku, Solusi 3D, DR3D, dan Creativo. Model bisnis usaha ini sebenarnya serupa dengan jasa cetak dua dimensi yang telah lebih dulu populer, yaitu menerima desain dari pelanggan kemudian mencetaknya.

Laplume et. al. dalam (Laplume et al., 2016) menerangkan bahwa pada bisnis skala kecil, agar menjadi layak secara bisnis dan menghasilkan *return of investment* yang tinggi, usaha berbasis 3D *Printing* harus memiliki tingkat utilitas yang tinggi. Bila tingkat utilitas tersebut dapat dicapai, maka perhitungan yang tepat atas beban biaya dan pendapatan musti dilakukan dengan cermat untuk menghasilkan profit yang memadai. Sayangnya, sampai saat ini informasi yang reliabel mengenai aspek ekonomi dari 3D *Printing* masih sangat terbatas (Serrano et al., 2020).

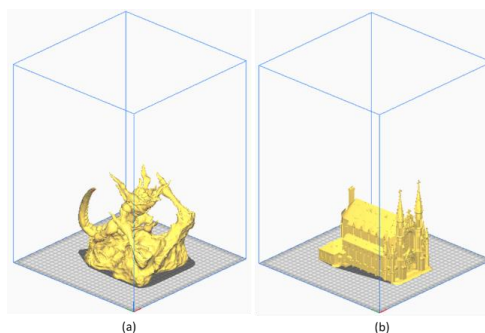
Keunggulan utama teknologi 3D *Printing* terletak pada kebebasan desain yang akan dicetak. Konsekuensinya, jasa 3D *Printing* akan menerima variasi model 3D yang tak terbatas sehingga perhitungan biaya menjadi lebih rumit. Hal ini menyebabkan tidak mungkin menentukan harga tertentu yang berlaku untuk semua desain. Untuk

mempermudah penentuan harga per pekerjaan, jasa 3D *Printing* dapat menggunakan basis jumlah material (filamen) yang dibutuhkan atau waktu cetak (*printing time*). Informasi ini dapat dengan mudah didapat dalam proses *slicing* menggunakan *software slicer*. Saat ini banyak *software slicer* yang tersedia gratis dan mudah didapatkan, seperti Ultimaker CURA dan Slic3r (Aumeunier et al., 2019).

Dasar tarif yang sederhana akan memudahkan perhitungan baik bagi pelanggan maupun pelaku usaha, sehingga keduanya mendapatkan penjelasan harga yang rasional. Selain itu pelanggan dapat pula mengestimasi harga cetak untuk desain mereka. Hal ini mendorong adanya kebutuhan perhitungan tarif akhir jasa 3D *printing* menggunakan sebuah basis tarif dasar yang mungkin: material atau waktu cetak. Perlu adanya evaluasi mengenai basis mana yang lebih baik untuk digunakan.

Berangkat dari hal tersebut, studi ini akan mengevaluasi basis penetapan tarif akhir jasa 3D *printing* yang diberikan kepada pelanggan. Basis material dan basis waktu cetak akan dibandingkan melalui simulasi menggunakan *software* Anylogic untuk menentukan mana yang memberikan pendapatan lebih besar. Perbandingan dengan simulasi ini diperlukan untuk mengetahui reliabilitas dalam menghadapi ketidakpastian berupa variasi model 3D serta perubahan kondisi permintaan. Hasil dari studi ini dapat digunakan oleh para pelaku usaha jasa 3D *printing* untuk menentukan basis tarif jasa mereka. Selain itu, dengan mengetahui keunggulan dan kelemahan masing-masing basis tarif, pelaku usaha dapat menentukan langkah-langkah dalam rangka menaikkan keuntungan.

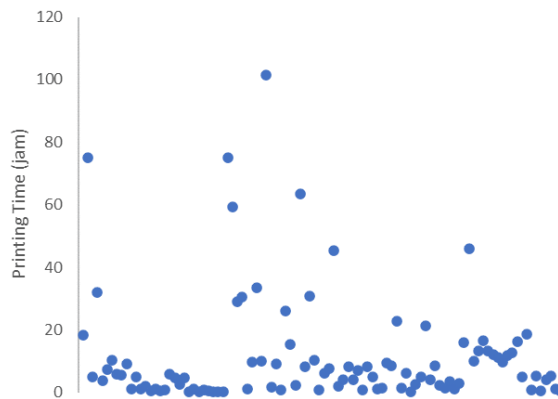
Biaya operasi pada 3D *Printing* dapat dibagi menjadi dua, yaitu biaya langsung dan biaya tidak langsung. Biaya langsung bertambah dengan meningkatnya utilisasi, terdiri dari biaya material dan listrik. Biaya listrik berbanding lurus dengan waktu cetak. Sementara biaya tidak langsung contohnya biaya tenaga kerja yang mengoperasikan 3D *Printer* (Laplume et al., 2016). Dalam kasus spesifik aplikasi teknologi di bidang operasi medis, Narita dalam (Narita et al., 2020) menyebutkan tiga faktor yang mempengaruhi biaya 3D *Printing*: waktu fabrikasi, material atau filamen yang digunakan, serta tenaga kerja dan biaya distribusi. Dalam jasa 3D *printing*, dua biaya terakhir dapat dikategorikan sebagai biaya tidak langsung.



Gambar 1. Model 3D dalam Tampilan *Software Slicer* CURA (a) Karakter Ifrit (b) Miniatur Katredal

Tabel 1. *Printing Parameter* pada CURA

Printer	Creality CR-10
Material	PLA+
Nozzle diameter	0,4 mm
Profile	dynamic quality
Layer height	0,16 mm
Infill density	20%
Enable ironing	Yes
Printing temperature	220° C
Print speed	50 mm/s
Support	Tree
Plate Adhesion	Brim



Gambar 2. Sebaran Data Waktu Cetak

Penentuan tarif berbasis material filamen memiliki kelemahan saat berhadapan dengan desain yang memiliki geometri kompleks. Misalnya ditunjukkan pada **Gambar 1**, kedua model 3D membutuhkan jumlah filamen yang hampir sama, yaitu 425 gram untuk (a) dan 460 gram untuk (b). Namun waktu cetak keduanya berbeda sangat jauh, yaitu 3.803 menit dan 6.095 menit. Hal ini karena geometri model (a) jauh lebih kompleks dari model (b).

Waktu cetak berpengaruh langsung terhadap konsumsi listrik yang dipakai. Komponen biaya ini juga mempengaruhi tarif 3D *Printing* (Saputro et al., 2021). Secara umum, waktu cetak pada prinsipnya juga dipengaruhi oleh penggunaan material. Misalnya untuk membangun *support* dari produk saat proses cetak, diperlukan tambahan material yang secara signifikan dapat meningkatkan waktu cetak (Sharma et al., 2018). Studi-studi yang telah dilakukan sejauh ini memandang biaya yang diakibatkan oleh material dan waktu cetak sebagai komponen biaya. Keduanya merupakan bagian dari biaya total operasi 3D *printing*. Baik kontribusi maupun pengaruhnya terhadap satu sama lain telah dikaji. Namun demikian, belum ada studi yang mengkomparasikan keduanya sebagai dasar dalam menghitung biaya akhir yang dibebankan kepada pelanggan dalam bentuk tarif cetak.

2. Metode

2.1. Mengunduh Model 3D

Seratus model 3D dalam format *.stl* diunduh dari myminifactory.com, sebuah situs yang menyediakan model gratis bagi pegiat 3D *printing*. Penentuan model dilakukan dengan memilih sepuluh desain terpopuler

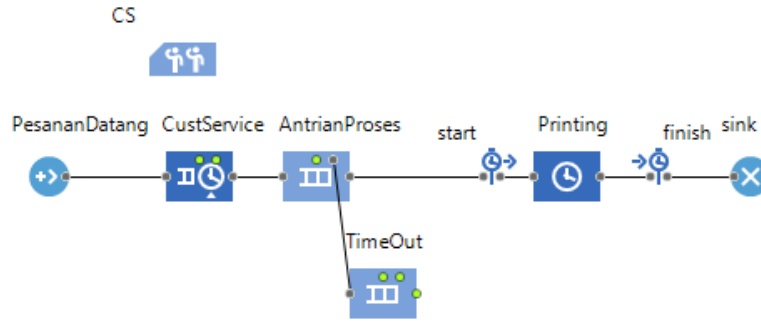
dari setiap kategori berdasarkan jumlah *view* pada situs tersebut. Kategori yang dimaksud antara lain: pendidikan, fashion dan aksesoris, perhiasan, *fan art*, arsitektur, gawai & elektronik, rumah tangga & berkebun, olah raga & *outdoor*, mainan & *game*, dan suku cadang. Seratus model ini merepresentasikan variasi permintaan cetak.

2.2. Mengestimasi waktu cetak dan jumlah material

Software slicer Ultimaker CURA kemudian digunakan untuk mengolah model 3D menjadi file *g-code*. Parameter cetak utama diatur seragam untuk semua model, rinciannya dapat dilihat pada **Tabel 1**. Mesin *printer* yang digunakan adalah Creality CR-10 yang berbasis FDM dengan material filamen PLA+ diameter 1,75 mm. Waktu cetak dan jumlah gram material yang diperlukan untuk setiap model dicatat dan dimasukkan dalam *database*. **Gambar 2** menampilkan sebaran waktu cetak dari data yang telah dikumpulkan. Data ini memiliki *mean* 11,56 jam dengan standar deviasi 17,69 jam. Sedangkan untuk kebutuhan material, *mean*-nya adalah 65,19 gram dan standar deviasi 101,22 gram.

2.3. Membangun model operasi 3D *printing*

Model yang merepresentasikan operasi 3D *printing* dalam sebuah penyedia jasa cetak berskala kecil dibangun menggunakan *software* Anylogic 8.8.3 Personal Learning Edition. Secara garis besar proses produksi diawali dengan datangnya pesanan (*order*). *Customer service* akan memproses pesanan ini dan memasukkannya ke daftar tunggu. Pesanan kemudian dicetak oleh 3D *printer* menurut waktu proses yang



Gambar 3. Building Block Model Operasi 3D Printing

bervariasi, sesuai dengan *database* waktu cetak hasil *slicing* Ultimaker CURA. **Gambar 3** menampilkan diagram *building block* model yang telah dibuat.

Pesanan datang dimodelkan menggunakan agen yang memiliki identitas unik. Tingkat kedatangan pesanan divariasikan 0.5, 1, 2, 3, 4, dan 5 pesanan per hari. Penerimaan pesanan oleh *customer service* hanya dapat dilakukan pada jam 08.00 sampai 22.00 hari Senin sampai Sabtu. Pesanan yang belum dapat diproses karena mesin 3D *printer* sibuk, menunggu dalam antrian. Bila waktu tunggu lebih dari 3 hari, maka terjadi *time out*. Dalam simulasi ini *time out* berarti pesanan akan meninggalkan antrian karena pelanggan membatalkan pesanan. Pada proses cetak dalam blok *Printing*, model akan mengenali agen berdasarkan identitasnya, kemudian mengatur waktu cetak yang sesuai dengan *database*. Jumlah 3D *printer* adalah satu unit. Setelah proses cetak, pesanan akan meninggalkan sistem.

2.4. Run simulasi

Simulasi dijalankan untuk periode waktu 1 tahun. Informasi-informasi berikut diambil dari pengolahan hasil simulasi:

- Total waktu cetak
- Total material yang dipakai
- Jumlah pesanan yang berhasil diproses
- Utilisasi rata-rata 3D *printer*
- Jumlah pesanan yang dibatalkan (*time out*)

Data waktu cetak diambil dari *log* simulasi yang mengumpulkan informasi mengenai waktu setiap agen berada di blok *Printing*. Informasi tentang waktu ini diukur oleh dua *time measurement palette* yang diletakkan sebelum dan sesudah blok *Printing*. Sementara data jumlah material yang digunakan diambil dengan mencocokkan identitas setiap agen dengan data yang ada di *database*.

2.4. Evaluasi performansi basis tarif

Pada prinsipnya, biaya material dan biaya listrik saling mempengaruhi, keduanya muncul secara bersamaan saat proses cetak. Untuk mengakomodir hal ini tarif berbasis material dan berbasis waktu cetak ditentukan dengan formula sebagai berikut.

$$T_m = m + r_{tm}p \quad (1)$$

$$T_t = p + r_{mt}m \quad (2)$$

Dimana T_m dan T_t masing-masing melambangkan tarif dasar berbasis material dan tarif dasar berbasis waktu cetak. Sedangkan m adalah biaya material per gram yang dapat ditentukan berdasarkan informasi harga filamen. Kemudian p adalah biaya listrik per jam, yaitu perkalian antara konsumsi listrik yang dibutuhkan oleh printer dan tarif dasar listrik. Selanjutnya r_{tm} adalah rata-rata rasio yang didapat dengan membagi waktu cetak dengan jumlah material. Rata-rata rasio jumlah material dan waktu cetak dilambangkan dengan r_{mt} . Kedua rasio ini dihitung berdasarkan rata-rata dari 100 data model 3D.

Berdasarkan T_m dan T_t , biaya langsung untuk setiap model 3D yang dicetak dengan operasi 3D *printing* kemudian dihitung dengan persamaan (3) dan (4).

$$VC_m = T_m \times g \quad (3)$$

$$VC_t = T_t \times t \quad (4)$$

VC_m adalah biaya langsung untuk mencetak model 3D berdasarkan basis material, sedangkan VC_t adalah biaya langsung berbasis waktu cetak. Kemudian g adalah estimasi jumlah gram material yang digunakan dan t adalah waktu cetak dalam menit. Total biaya langsung (TVC) dalam satu tahun kemudian dapat dihitung dengan mengalikan keduanya dengan Total Material (M) untuk basis material atau Total Waktu Cetak (T) untuk basis waktu cetak.

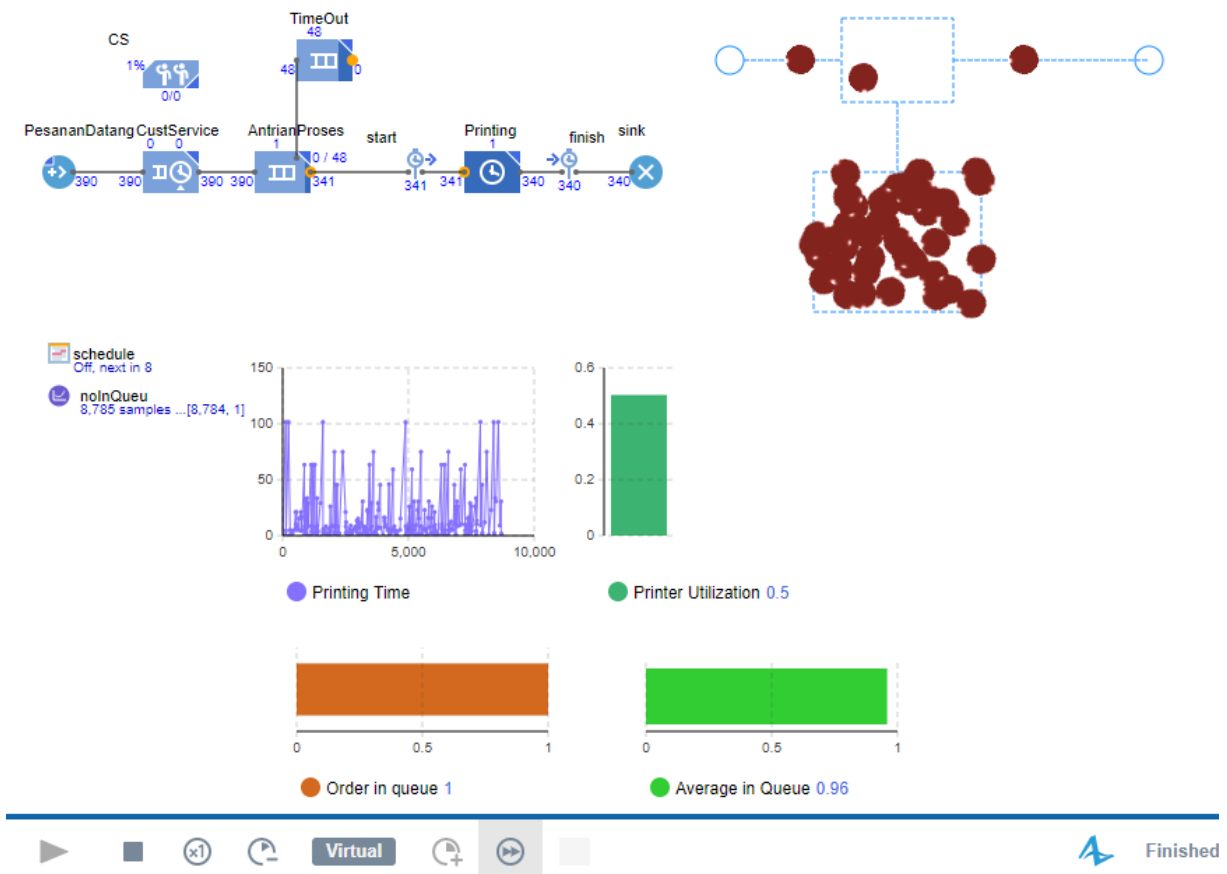
$$TVC_m = VC_m \times M \quad (5)$$

$$TVC_t = VC_t \times T \quad (6)$$

Kedua basis tarif dibandingkan berdasarkan performansinya dalam menghasilkan biaya langsung dan total biaya langsung pada berbagai skenario tingkat kedatangan permintaan.

Sebagai pendukung, untuk lebih menggambarkan kondisi bisnis yang lebih nyata, ditambahkan pula komponen biaya tetap. Biaya tetap merupakan biaya-biaya yang tidak bergantung pada banyaknya pesanan yang diproses. Bila komponen biaya tetap dimasukkan, nilai biaya per satuan basis tarif (C) dapat dihitung dengan persamaan (7).

$$C = (TFC + TVC)/T \quad (7)$$



Gambar 4. Tampilan Simulasi

Tabel 2. Parameter Hasil Simulasi

Tingkat kedatangan (per hari)	Jumlah Pesanan	Utilisasi Printer (%)	Time-out	Total Waktu Cetak (jam)	Total Material (gram)
0.5	194	27	6	2,357	14,453
1	390	50	48	4,411	26,808
2	766	83	253	7,321	43,747
3	1,107	90	511	7,864	47,482
4	1,471	88	914	7,720	46,705
5	1,843	85	1,220	7,442	44,744

Dalam persamaan tersebut TFC adalah total biaya tetap dalam 1 tahun dan TVC adalah total biaya langsung selama 1 tahun. Sedangkan T adalah total gram material yang digunakan dalam 1 tahun bila memakai basis material atau total waktu cetak dalam satu tahun bila memakai basis waktu cetak. Evaluasi keuntungan dilakukan dengan menetapkan tarif akhir (Tr) berdasarkan nilai biaya per satuan basis tarif. Kemudian keuntungan per satuan basis tarif (P) dihitung berdasarkan persamaan (8)

$$P = Tr - C \quad (8)$$

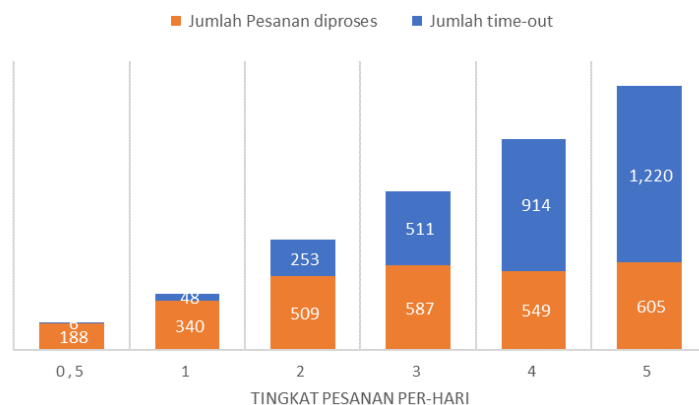
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Utilisasi

Gambar 4 menampilkan tangkapan layar simulasi proses operasi jasa 3D printing. Pada bagian

kiri, pesanan dilambangkan dengan lingkaran warna coklat. Di bagian bawah terdapat beberapa chart yang menyajikan informasi waktu cetak, utilisasi, printer, jumlah antrian, dan rata-rata pesanan dalam antrian. Angka-angka kecil di sekitar *building block* menunjukkan jumlah pesanan (*size*) yang masuk, sedang diproses, dan keluar dari setiap blok. Tabel 2 merangkum hasil simulasi yang telah berjalan selama 1 tahun waktu model.

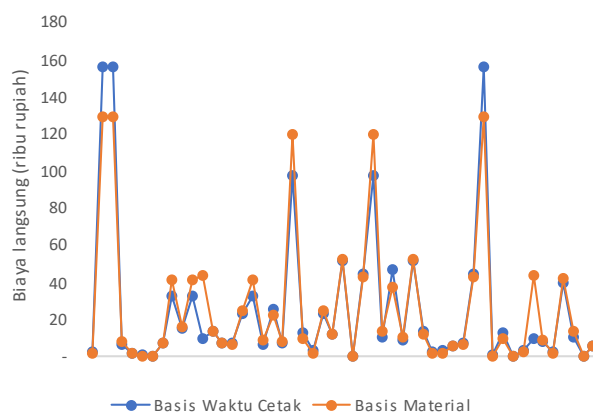
Jumlah pesanan yang masuk sebanding dengan tingkat kedatangan pesanan per hari. Dapat dilihat bahwa utilisasi 3D Printer pada awalnya naik sampai tingkat kedatangan mencapai 3 pesanan per hari. Namun setelah itu mengalami penurunan secara perlahan. Hal ini disebabkan karena banyak pesanan yang tidak dapat diproses selama lebih dari 3 hari, sehingga dibatalkan. Seperti disajikan pada Gambar 5,



Gambar 5. Perbandingan Jumlah Pesanan Diproses dan Dibatalkan

Tabel 3. Mean dan Standar Deviasi Hasil Simulasi

Tingkat Kedatangan Per Hari	Waktu Cetak (Jam)		Jumlah Material (Gram)	
	Mean	Standar Deviasi	Mean	Standar Deviasi
0,5	12,54	19,42	76,88	117,34
1	12,97	20,41	78,85	121,27
2	14,38	21,16	85,95	124,48
3	13,40	19,86	80,89	119,50
4	14,06	20,03	85,07	122,23
5	12,30	17,69	73,96	108,36



Gambar 6. Biaya Langsung Operasi 3D Printing dengan Dua Basis Tarif Dasar

ketika tingkat kedatangan pesanan melebihi 4 per hari, maka lebih banyak pesanan yang dibatalkan daripada yang diproses. Bila dilihat kembali pada Gambar 2, beberapa model 3D memang memiliki waktu cetak melebihi 3 hari (72 jam), sehingga saat pesanan seperti ini masuk, dipastikan pesanan yang datang segera setelahnya akan dibatalkan.

Dalam usaha yang berbasis teknologi 3D printing, utilisasi mesin sangat menentukan keberlangsungan bisnis printing. Dalam kasus ini, tingkat utilisasi yang tinggi dapat dicapai bila tingkat kedatangan pesanan paling tidak mencapai 2 pesanan per hari. Namun, bila dilihat pada Gambar 5, pada level tersebut sangat banyak pesanan yang dibatalkan. Dari aspek bisnis, hal ini tentu buruk bagi kepuasan pelanggan.

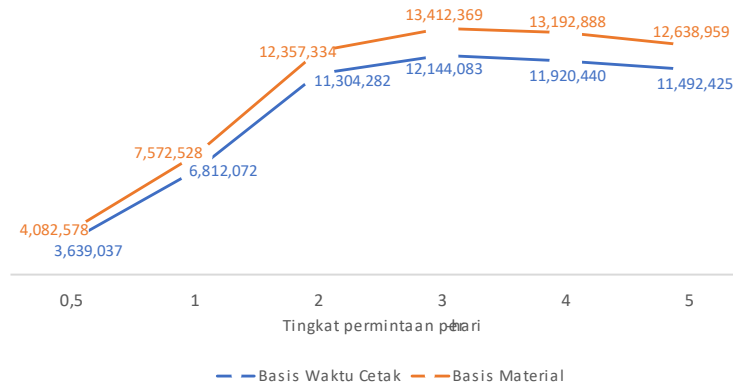
3.2. Perbandingan basis tarif dasar

Tabel 3 menampilkan profil statistik dari waktu cetak dan jumlah material. Keduanya menunjukkan nilai standar deviasi yang sangat tinggi. Dalam konteks 3D printing, dimana pesanan yang datang memang

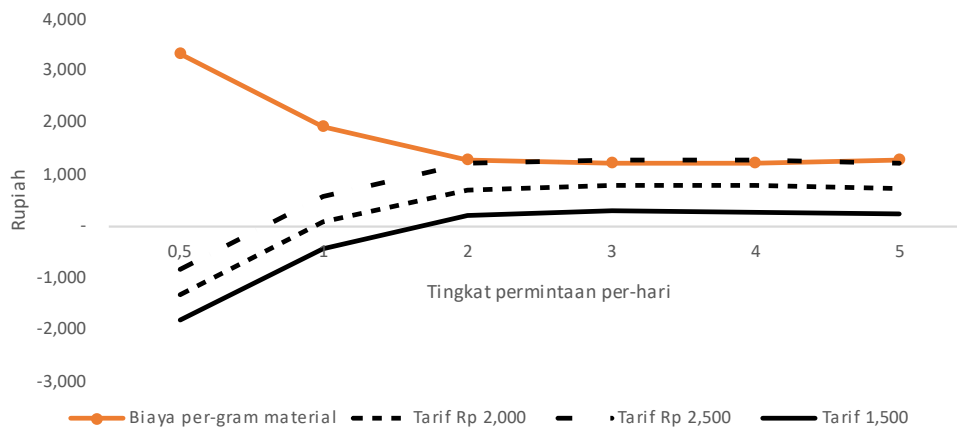
diharapkan memiliki variasi yang tinggi, nilai standar deviasi tersebut menunjukkan hal yang positif.

Dari platform *e-commerce* Tokopedia, harga 1 roll filamen PLA+ dengan berat 1 kg adalah Rp 210.000,- sehingga diperoleh biaya 1 gram filamen sebesar Rp 210,-. Nilai ini dapat dijadikan patokan biaya material operasi 3D printing. Sedangkan biaya yang langsung dipengaruhi oleh waktu cetak adalah biaya listrik. Konsumsi energi listrik untuk Creality CR-10 tergantung pada model 3D yang dicetak, namun diambil rata-rata 4.11 watt per menit atau 246.33 watt per jam (Husár & Kaščák, 2022). Sedangkan sesuai dengan TDL PLN, tarif listrik untuk usaha kecil yang berlaku untuk batas daya 1.300 VA adalah 1.444,70 per kWh. Sehingga dapat dihitung biaya listrik per jam untuk operasi 3D printing adalah Rp 354,88. Sementara itu, perhitungan r_{tm} dan r_{mt} menghasilkan nilai 0,20 jam/gram dan 5,66 gram/jam secara berturut-turut. Sehingga dari persamaan (1) dan (2), diperoleh T_m Rp 282,47 per gram dan T_t 1.544,18 per menit.

Gambar 6 mengilustrasikan biaya langsung yang dihitung dengan persamaan (3) dan (4) pada 50



Gambar 7. Total Biaya Langsung Berdasarkan Setiap Basis Tarif



Gambar 8. Biaya dan Keuntungan Per Gram

pesanan pertama yang diproses pada tingkat kedatangan pesanan 2 per hari. Dapat dilihat bahwa keduanya menunjukkan nilai yang cenderung berdekatan. Sebagian model 3D menghasilkan biaya yang lebih tinggi dengan menggunakan basis material, dan sebagian yang lain menunjukkan hal yang sama dalam basis waktu cetak. Artinya sebagaimana telah disinggung di awal, karakteristik desain berpengaruh pada efektifitas basis yang digunakan.

Namun demikian, dengan menggunakan persamaan (5) dan (6) untuk menentukan total biaya langsung, basis material menghasilkan nilai yang lebih besar seperti ditunjukkan dalam **Gambar 7**. Pada setiap tingkat kedatangan pesanan, total biaya langsung dalam satu tahun yang dihitung berdasarkan basis material selalu lebih besar dari basis waktu cetak. Selisih keduanya berkisar antara 9% sampai 10%. Hal ini menunjukkan bahwa basis material menunjukkan performa yang lebih baik daripada basis waktu cetak.

3.3. Tarif berbasis material

Perhitungan basis tarif dasar yang telah dibahas sebelumnya belum memasukkan komponen biaya tetap dan margin keuntungan. Pada prakteknya, biaya tetap ini dapat jauh lebih besar daripada biaya langsung operasional 3D *printing*. Namun, dengan menetapkan basis tarif dasar, biaya tetap dan margin dapat diserap pada tarif akhir yang diberikan kepada konsumen. Keduanya akan mengikuti variabel basis yang digunakan. Misalnya, ditetapkan bahwa tarif akhir adalah Rp 2.000,- per gram filamen yang digunakan.

Maka komponen biaya tetap dan margin sebesar Rp 1.718,- telah masuk dalam tarif akhir dan bersama-sama bertambah dengan banyaknya filamen yang digunakan.

Bila komponen biaya tetap dimasukkan dalam perhitungan, maka akan didapatkan biaya per satuan sebelum keuntungan. Dengan total biaya tetap sebesar 44 juta per tahun, nilai biaya per gram material (C_m) dapat dihitung dengan persamaan (7). Untuk setiap tingkat kedatangan pesanan, hasilnya disajikan pada **Gambar 8**. Sebagaimana umum berlaku, biaya per unit semakin menurun mengikuti jumlah permintaan yang diproses.

Gambar 8 juga menampilkan keuntungan per gram material yang dihitung dengan persamaan (8) untuk tiga skenario tarif yang berbeda: Rp 1.500 per gram; Rp 2.000 per gram; dan Rp 2.500 per gram. Dua besaran tarif terbesar yaitu Rp 2.500 dan Rp 2.000 per gram dapat memberikan keuntungan saat pesanan melebihi 1 per hari. Sementara tarif Rp 1.500 per gram mulai memberikan keuntungan saat tingkat permintaan melebihi 2 pesanan per hari. Grafik ini dapat digunakan untuk menentukan tarif akhir yang akan dipakai, tentu saja dengan menyeimbangkan tingkat keuntungan dengan penerimaan konsumen. Dalam tingkat individual pesanan, semakin banyak material yang digunakan untuk mencetak sudah model 3D, semakin berkurang pula biayanya. Hal ini membuka peluang untuk mengaplikasikan tarif progresif turun, yaitu pemberian tarif yang lebih kecil untuk model 3D yang membutuhkan lebih banyak filamen.

Perhitungan dasar tarif yang paling akurat sebenarnya adalah memasukkan biaya material dan konversi waktu cetak menjadi biaya listrik secara langsung. Artinya dua variabel tersebut dipakai secara utuh, sehingga persamaan (1) dan (2) diabaikan, dan diganti persamaan (9). Misalnya untuk tingkat kedatangan pesanan 2 per hari, nilai total biaya langsung dengan persamaan (9) adalah Rp 12.366.198,-. Nilai ini lebih tinggi dari basis waktu cetak. Nilai tersebut juga lebih besar bila dibandingkan dengan basis material, namun dengan selisih yang sangat kecil, berkisar antara 0,07% sampai 0,10%. Kelemahan praktikal pendekatan ini adalah pelanggan akan membutuhkan usaha lebih untuk menghitung biaya jasa untuk desainnya.

$$T = m + p \quad (9)$$

Beberapa model 3D memang membutuhkan waktu cetak yang melebihi rasio terhadap kebutuhan materialnya, namun penggunaan jumlah material sebagai basis tarif dasar akan memberikan akumulasi keuntungan yang lebih baik. Hal ini juga didukung fakta bahwa dengan pengaturan parameter yang tepat, waktu cetak dapat diturunkan.

Salah satu cara menurunkan waktu cetak adalah dengan menaikkan *printing speed* (Ansari & Kamil, 2021). Terdapat resiko menurunnya kualitas hasil cetak dengan cara ini, namun dapat ditanggulangi dengan pengaturan *extrusion speed* yang tepat (Geng et al., 2019). Penurunan kualitas, terutama yang berhubungan dengan kekuatan produk, adalah minor, namun dapat sangat berpengaruh pada penurunan biaya cetak Khosravani et al dalam (Khosravani et al., 2022). Menu kontrol pada CR-10 dan mesin 3D *printing* yang lain juga memungkinkan intervensi manusia untuk merubah *printing parameter*. Hal ini dapat dimanfaatkan untuk menaikkan *printing speed* pada bagian-bagian tertentu dari model 3D yang tidak mengharuskan kualitas yang tinggi.

Bila *printing speed* dapat diturunkan tanpa mempengaruhi jumlah material yang digunakan, biaya listrik dapat ditekan. Selain konsumsi listrik, penurunan waktu cetak juga berefek pada utilisasi (Song & Zhang, 2019), yang berarti lebih banyak pesanan yang dapat diproses. Hal ini berarti keuntungan usaha dapat dimaksimalkan dari dua sisi, yaitu penurunan biaya dan kenaikan pendapatan.

4. Kesimpulan

Pada studi ini, simulasi operasi jasa cetak menggunakan teknologi 3D *printing* pada *software* Anylogic telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa utilisasi 3D *printer* di atas 80% dapat dicapai pada tingkat kedatangan 2 pesanan per hari. Selanjutnya, evaluasi penentuan tarif dasar berbasis material dan waktu cetak menunjukkan bahwa keduanya secara bergantian memberikan penetapan biaya langsung yang lebih tinggi satu sama lain. Namun, simulasi selama satu tahun waktu model dengan 100 variasi model 3D menunjukkan bahwa tarif dasar berbasis material dapat memberikan total pendapatan yang lebih besar.

Hasil dari studi ini merekomendasikan pemakaian tarif berbasis material untuk menghitung biaya jasa 3D *printing* bagi para pelaku usaha. Strategi-strategi pada tingkat operasional juga perlu dilakukan sebagai langkah untuk meminimalkan waktu cetak. Hal ini secara langsung dapat menurunkan biaya listrik sehingga memaksimalkan keuntungan. Di sisi lain, perlu dipastikan bahwa tingkat utilisasi *printer* mencapai nilai optimal dengan melakukan langkah-langkah untuk menaikkan permintaan.

Ucapan Terima Kasih: Ucapan terima kasih para penulis sampaikan kepada Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur (PSPPI) Universitas Diponegoro atas fasilitas yang diberikan selama penelitian dan penulisan artikel ini. Secara khusus, penulis pertama juga ingin mengucapkan terimakasih kepada Universitas Tidar yang merupakan *home base* penulis pertama yang juga telah memberikan fasilitas pendanaan untuk menempuh program profesi insinyur.

5. Daftar Pustaka

- Ansari, A. A., & Kamil, M. (2021). Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5462–5468. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.137>
- Aumeunier, M., Ealet, A., Prieto, E., -, al, Alexander, K. M., Pinter, C., Fichtinger, G., Šljivic, M., Pavlovic, A., Krašnik, M., & Ilić, J. (2019). Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 659(1), 012082. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012082>
- Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M., & Deadline, N. (2013). Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. *Low-Cost 3D Printing*, 11(1).
- Geng, P., Zhao, J., Wu, W., Ye, W., Wang, Y., Wang, S., & Zhang, S. (2019). Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 266–273. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2018.11.023>
- Husár, J., & Kaščák, J. (2022). Monitoring the Energy Consumption of FDM Device Based on the Variation of Operating Parameters: A Study. *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, 237–258. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90462-3_15/COVER
- Khosravani, M. R., Berto, F., Ayatollahi, M. R., & Reinicke, T. (2022). Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. *Scientific Reports 2022 12:1*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05005-4>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals*, 47(2), 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)

- Laplume, A., Anzalone, G. C., & Pearce, J. M. (2016). Open-source, self-replicating 3-D printer factory for small-business manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(1–4), 633–642. <https://doi.org/10.1007/S00170-015-7970-9/METRICS>
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/S40436-014-0097-7/METRICS>
- Narita, M., Takaki, T., Shibahara, T., Iwamoto, M., Yakushiji, T., & Kamio, T. (2020). Utilization of desktop 3D printer-fabricated “Cost-Effective” 3D models in orthognathic surgery. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, 42(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/S40902-020-00269-0/TABLES/3>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012>
- Saputro, A. K., Rochmakhayatin, F. A., Haryanto, & Ulum, M. (2021). Electrical Power Consumption Monitoring on Filament 3D Printer Using Web Based. *E3S Web of Conferences*, 328, 02002. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202132802002>
- Serrano, C., Fontenay, S., Van Den Brink, H., Pineau, J., Prognon, P., & Martelli, N. (2020). Evaluation of 3D printing costs in surgery: a systematic review. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 36(4), 349–355. <https://doi.org/10.1017/S0266462320000331>
- Sharma, M., Saraswat, P., & Joshi, D. (2018). Parametric Study on Printing Time and Cost of Component in 3D Printing. *SKIT Research Journal VOLUME*, 8, 45.
- Song, J. S., & Zhang, Y. (2019). Stock or Print? Impact of 3-D Printing on Spare Parts Logistics. *Https://Doi.Org/10.1287/Mnsc.2019.3409*, 66(9), 3860–3878. <https://doi.org/10.1287/MNSC.2019.3409>
- Sunarto, G., Katmini, K., & Dian Eliana, A. (2023). Efektifitas Biaya Penggunaan Teknologi Pencetakan 3D (Industri 4.0) pada Alat Bantu Ortotik Prostetik. *Jurnal Penelitian Kesehatan “SUARA FORIKES” (Journal of Health Research “Forikes Voice”)*, 14(1), 17–26. <https://doi.org/10.33846/SF14104>
- Widiatmoko, J. A. (2023). 3D printing untuk usaha mikro dalam perspektif 5M. *MUSTEK ANIM HA*, 12(01), 1–14. <https://doi.org/10.35724/MUSTEK.V12I01.5211>
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2016.04.005>
- Xiao, Y. Q., & Kan, C. W. (2022). Review on Development and Application of 3D-Printing Technology in Textile and Fashion Design. *Coatings 2022, Vol. 12, Page 267, 12(2)*, 267. <https://doi.org/10.3390/COATINGS12020267>