

Optimasi Proses *Cutting* Mesin CNC Router G-Weike WK1212 dengan Metode *Full Factorial Design* dan Optimasi Plot Multi Respon

Dewa Kusuma Wijaya¹, Herwin Suprijono², dan Dony Satriyo Nugroho³

^{1,2,3})Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Dian Nuswantoro

Jl. Nakula 1 no.5-11 Semarang 50131

Email: dewa.kuja@dsn.dinus.ac.id, herwin.suprijono@dsn.dinus.ac.id, dony.satriyo.n@dsn.dinus.ac.id

Abstrak

Penelitian pada mesin CNC Router G-Weike WK1212 terkait optimasi untuk proses *cutting* material kayu. Kendala operasionalitas mesin adalah *level* faktor setting untuk *depth per cut*, *spindle speed*, dan *motion speed* masih berdasarkan asumsi dan perkiraan. Mesin tersebut belum memiliki acuan tabulasi *level* faktor setting yang optimal terhadap beberapa jenis material seperti kayu, logam, akrilik, dan sebagainya. Penelitian ini menggunakan *Design of Experiment* (DoE) dengan metode *Full Factorial Design* untuk mengetahui formulasi matematis dari pengujian yang dilakukan. Selanjutnya, dilakukan optimasi plot multi respon untuk mengetahui *level setting* optimal dengan parameter efisiensi waktu proses dan kesesuaian dimensi hasil proses meliputi *depth*, *length*, dan *width*. Penelitian ini menggunakan kayu mahoni sebagai material dengan dimensi uji sampel berukuran 20x20x20 mm menggunakan mata pahat *end mill 4 flute* berdiameter 3 mm. Hasil penelitian ini diketahui *level* faktor setting optimal *depth per cut* adalah 0,25 mm, *spindle speed* adalah 7 step, dan *motion speed* adalah 6 step.

Kata kunci: CNC Router, Optimasi, *Cutting*, DoE, *Full Factorial Design*.

Abstract

Research on the G-Weike WK1212 CNC Router machine is related to optimization for wood material cutting process. The machine operational constraint is setting level factor for *depth per cut*, *spindle speed*, and *motion speed* is still based on assumptions and estimates. The machine does not yet have an optimal tabulation setting level factor reference for several types of material such as wood, metal, acrylic, and so on. This research uses *Design of Experiment* (DoE) with *Full Factorial Design* method to determine mathematical formulation of the tests conducted. Next, a multi-response optimization plot is performed to determine optimal setting level with the parameters of processing time efficiency and suitability dimensions of process results including *depth*, *length*, and *width*. This research uses mahogany as a material with dimensions of the sample test measuring is 20x20x20 mm using a 4 mm flute end mill chisel with 3 mm diameter. The results of this research note that the optimal setting factor level *depth per cut* is 0.25 mm, *spindle speed* is 7 steps, and *motion speed* is 6 steps.

Keywords: CNC Router, Optimization, *Cutting*, DOE, *Full Factorial Design*.

PENDAHULUAN

Penelitian ini berawal dari permasalahan pada mesin CNC Router G-Weike tipe WK1212 yang tidak memiliki acuan tabulasi dalam melakukan *setting level* proses pada panel kontrolnya untuk proses permesinan potong (*cutting*) maupun ukir (*engraving*) pada material-material seperti kayu dengan berbagai jenisnya, logam, akrilik, dan lain sebagainya. Operasionalitas dari mesin tersebut selama ini hanya menggunakan asumsi dan perkiraan

saja untuk setiap memproses material-material di atas baik proses *cutting* maupun *engraving*. Bahkan di dalam penggunaan setiap mata pahat untuk memproses semua material tersebut juga masih menggunakan asumsi dan perkiraan.

Dampak yang dihasilkan dari implementasi asumsi dan perkiraan dalam melakukan *setting level* proses pada mesin tersebut memunculkan beberapa permasalahan. Permasalahan pertama adalah terkait mata pahat yang cepat dan sering gumpil pada pisau pahatnya, bengkok pada bagian pangkal (*shank*), dan bahkan patah. Permasalahan berikutnya adalah kecepatan putaran spindel dan gerak pemakanan yang tidak teratur, sehingga berdampak pada aktual waktu proses permesinan yang tidak konsisten, temperatur mata pahat yang terlalu panas (*over heat*). Hal ini tentu saja dapat memberikan dampak lanjutan terkait efisiensi permesinan, kondisi maupun performa dari mesin itu sendiri, dan lain sebagainya. Penelitian ini dipandang perlu dilakukan untuk mereduksi dampak permasalahan yang ada dengan memberikan solusi acuan tabulasi *setting level* faktor yang optimal di dalam operasionalitas mesin tersebut.



Gambar 1. CNC Router G-Weike WK1212

Optimasi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan 3 faktor *setting* dari mesin tersebut yaitu tingkat kedalaman per pemakanan (*depth per cut*), kecepatan spindel (*spindle speed*), dan kecepatan gerak pemakanan (*motion speed*). Di lain sisi, untuk parameter multi respon yang digunakan adalah efisiensi waktu proses dengan mengukur secara aktual total waktu proses dan kesesuaian dimensi hasil proses meliputi kedalaman (*depth*), panjang (*length*), dan lebar (*width*). Optimasi pada penelitian ini dilakukan dengan penerapan *Design of Experiment* (DoE) menggunakan metode *Full Factorial Design* untuk memperoleh formulasi matematisnya. Selanjutnya, proses optimasi dilakukan terhadap parameter multi respon yang telah ditentukan di atas menggunakan metode *optimization plot*. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan *setting level* faktor yang optimal dari *depth per cut*, *spindle speed*, dan *motion speed* agar efisiensi dari sisi waktu proses dapat tercapai namun dengan kualitas hasil yang presisi.

TINJAUAN PUSTAKA

Design of Experiment (DoE)

Sir Ronald Fisher pada tahun 1930 memperkenalkan metode *Design of Experiment* (DoE) untuk menyelesaikan suatu permasalahan penelitian dalam menentukan solusi optimal dari beberapa parameter uji. Menurut Montgomery (2013) secara teknis metode DoE sendiri terdiri dari beberapa faktor, *level*, dan respon. Faktor adalah komponen *input* dari suatu proses yang diklasifikasikan sebagai beberapa variabel yang terkendali maupun tidak terkendali. Faktor sendiri merupakan suatu bentuk variabel berupa masukan fisik yang mampu di *setting* atau diubah pengaturannya dari *level*-nya. *Level* sendiri adalah tingkatan pengaturan dari setiap faktor tersebut, dimana *level* tersebut dapat di-*adjust* atau diatur sesuai dengan komposisi pengujian yang diinginkan berdasarkan respon parameternya dalam suatu penelitian. Respon merupakan suatu bentuk *output* parameter dari pengujian yang dilakukan berdasarkan *level* faktor yang telah diatur. Respon sendiri dapat berjumlah tunggal maupun jamak atau biasa disebut multi respon yang artinya terdapat beberapa *output* parameter. Respon dapat berupa nilai efektifitas, efisiensi, kualitas, performa, dan lain sebagainya sejauh itu adalah suatu bentuk *output* terukur.

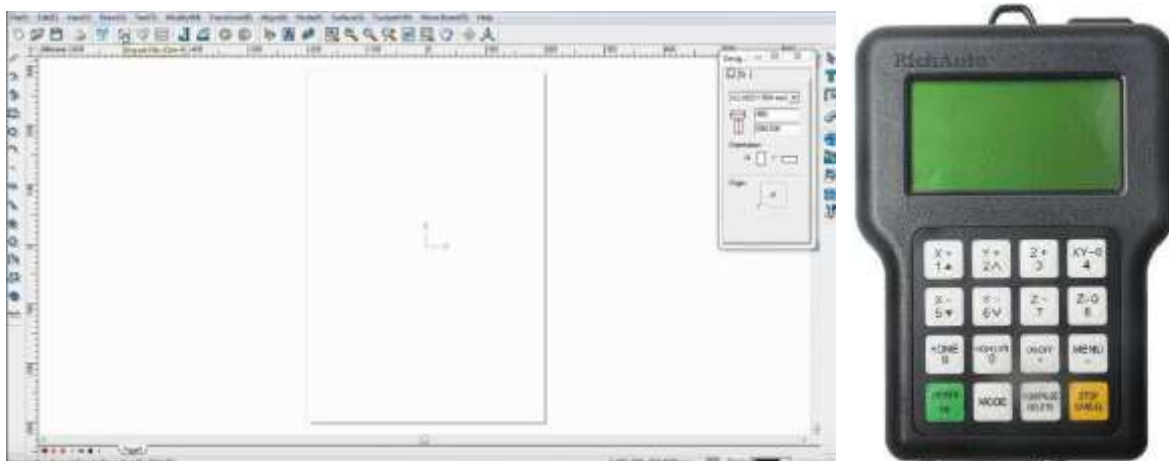
Metode DoE sendiri memiliki tujuan utama yaitu menghasilkan suatu solusi optimal dengan mengurangi jumlah pengujian agar suatu eksperimen dapat dilakukan secara efektif namun tetap efisien. DoE memiliki beberapa metode di dalamnya diantaranya adalah *screening design*, *factorial design*, *response surface*, *mixture design*, *taguchi*, dan lain sebagainya. Metode-metode tersebut akan menghasilkan suatu formulasi model matematis yang selanjutnya akan dilakukan optimasi berupa maksimasi, minimasi, dan target dari faktor-faktor yang ada. Sementara untuk proses optimasi dapat menggunakan metode *optimization plot*, *grey relational analysis*, dan metaheuristik. Setiap metode DoE sendiri memiliki syarat implementasinya masing-masing sesuai dengan kondisi dan peruntukannya, bahkan setiap metode tersebut dapat digunakan bersamaan sehingga dapat diketahui solusi paling optimal dengan mengetahui *error* model matematisnya.

Metode Optimasi

Implementasi dari optimasi permesinan CNC dengan penerapan metode DoE dan optimasi multi respon sudah banyak dilakukan. Dewa (2019) menggunakan metode *mixture design* dengan *simplex centroid design* dan metode optimasi *optimization plot* untuk proses *engraving* mesin CNC *laser cutting* G-Weike LC6090 terhadap material akrilik dengan menggunakan 3 jenis faktor dan 3 jenis respon parameter. Vardhan (2017) mengimplementasikan *Response Surface Methodology* (RSM) dan Taguchi untuk optimasi proses *cutting* mesin CNC *milling* terhadap material logam P20 *steel*. Kemudian pada tahun selanjutnya Vardhan (2018) mengembangkan optimasi proses *cutting* mesin CNC *milling* tersebut dengan menggunakan pendekatan metode metaheuristik yaitu *Artificial Neural Network* (ANN) terhadap material logam yang sama yaitu P20 *steel*. Nataraj (2018) menerapkan penggunaan metode *Response Surface* untuk optimasi proses *cutting* mesin CNC *milling* namun terhadap material yang berbeda yaitu logam Al/Al₂O₃. Menggunakan objek yang sama, Pandivelan (2018) menggunakan metode Taguchi untuk optimasi proses *forming* terhadap material lembaran atau plat logam AA5052 *metal sheet*. Sementara pada tahun yang sama, optimasi dengan pendekatan metode metaheuristik dilakukan oleh Kaushik (2018) menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) untuk proses *cutting* CNC *milling* terhadap material logam Al 7068. Pada tahun sebelumnya penelitian terhadap optimasi proses *cutting* mesin CNC *milling* juga pernah dilakukan oleh Das (2015) terhadap material logam komposit yaitu Al-4.5%Cu-TiC dengan menggunakan metode metaheuristik kombinasi *Fuzzy Logic* dan *Grey Relational Analysis* (GRA).

Full Factorial Design

Factorial design merupakan metode yang mengkombinasikan seluruh *level* dari suatu faktor dengan seluruh *level* dari faktor-faktor lain untuk mengetahui efek perubahan tiap kombinasi *level* faktor tersebut. Metode *factorial design* terdapat beberapa jenis diantaranya adalah *half fractional*, *full factorial*, dan lain sebagainya. Penelitian ini menerapkan metode *full factorial design* oleh karena kondisi dari objek penelitian yang memiliki karakteristik khusus. Kondisi khusus tersebut diantaranya adalah jumlah *level* yang berbeda untuk setiap faktornya dan *level* dari faktornya tidak dapat diatur secara lebih spesifik. Penelitian ini menggunakan objek CNC Router G-Weike WK1212 untuk proses *cutting* material kayu mahoni menggunakan mata pahat *end mill 4 flute* berdiameter 3 mm. Mesin tersebut menggunakan *software* UcanCam 10 sebagai *software* CAM untuk mengenerate *gcode* dan *toolpath*-nya serta menggunakan DSP controller untuk mengoperasikan mesin tersebut. Pengaturan atau setting dari *level* faktor dilakukan di *software* UcanCam 10 dan DSP controller. Menggunakan metode *full factorial design*, penelitian ini menggunakan 3 jenis faktor yaitu *depth per cut*, *spindle speed*, dan *motion speed*. Faktor *depth per cut* disetting melalui *software* UcanCam 10 dan dapat diatur secara lebih spesifik, sedangkan faktor *spindle speed* dan *motion speed* disetting melalui DSP controller dari mesin namun kekurangannya adalah tidak dapat diatur secara spesifik. Proses optimasi dari penelitian ini menggunakan metode *optimization plot* dengan bantuan *software* optimasi.



Gambar 2. *Software UcanCam V.10 dan DSP Controller Rich Auto*

METODE PENELITIAN

Struktur Penelitian

Penelitian dimulai dari penentuan faktor, *level*, dan respon. Faktor merupakan variabel utama penelitian ini yaitu *depth per cut*, *spindle speed*, dan *motion speed*. Selanjutnya mengetahui *level* dalam setiap faktor tersebut seperti pada Tabel 1, kemudian penentuan respon dan jumlah sampel berdasarkan metode *Full Factorial Design*. Sampel yang diambil menggunakan material kayu mahoni dan mata pahat *end mill 4 flute* diameter 3 mm. Jumlah kombinasi sampel penelitian ini adalah sebanyak 98 sampel dengan ukuran setiap sampel uji pada proses *cutting* kayu mahoni tersebut memiliki dimensi panjang 20 mm, lebar 20 mm, dan kedalaman 20 mm. Sampel tersebut kemudian akan dilakukan pengambilan data uji aktual waktu proses dengan menggunakan alat *stopwatch*, dimensi panjang dan lebar menggunakan *vernier caliper*, dan kedalaman menggunakan *depth gauge*. Kemudian menggunakan bantuan *software* optimasi akan dilakukan analisa untuk diketahui formulasi model matematis untuk setiap respon parameternya (Y).

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_p X_1 X_2 \dots X_k \quad (1)$$

Dimana:

Y = Respon

α_0 = Koefisien *intercept*

$X_1, X_2 \dots X_k$ = Faktor

$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_p$ = Koefisien faktor dan interaksi

Setelah diketahui model matematis untuk setiap respon, selanjutnya dilakukan optimasi dari respon tersebut menggunakan bantuan *software* optimasi dengan tujuan mengetahui setting *level* faktor yang optimal dari *depth per cut*, *spindle speed*, dan *motion speed* agar efisiensi mesin CNC Router G-Weike WK1212 dari sisi waktu proses dapat tercapai dengan kualitas hasil yang presisi.

Model Uji Komposisi

Penelitian ini menggunakan model uji kombinasi komposisi dengan 3 faktor yaitu *depth per cut* (X_1), *spindle speed* (X_2), dan *motion speed* (X_3) dengan variasi *level* faktornya. Khusus faktor *Depth per cut* penelitian ini menggunakan 2 nilai *level* pengaturan tingkat pemakanannya yaitu 0,25 dan 0,5 mm, hal ini dikarenakan nilai pemakanan lebih dari 0,5 terindikasi mata pahat akan patah oleh karena terlalu dalam. Sementara itu, untuk faktor *spindle speed* dan *motion speed* nilai *level* pengaturannya terdapat 7 tingkatan seperti pada tabel 1 di bawah. Khusus nilai *level* faktor *spindel speed* tidak dimulai dari nilai *level* 1, hal ini dikarenakan pada setting DSP *controller* mesin CNC Router G-Weike WK1212 nilai 1 pada *spindel speed* menyebabkan spindel tidak akan berputar sama sekali atau 0 RPM.

Tabel 1. Faktor dan *Level*

Faktor	Level
X_1 <i>Depth per cut</i> (pemakanan)	0,25 mm - 0,5 mm
X_2 <i>Spindle Speed</i> (kecepatan putaran spindel)	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 DSP <i>Controller Step</i>
X_3 <i>Motion Speed</i> (kecepatan gerak pemakanan)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 DSP <i>Controller Step</i>

Tabel 1 menunjukkan terdapat 3 faktor dengan jumlah tingkatan (*level*) yang bervariasi, yaitu pemakanan terdapat 2 variasi tingkatan serta kecepatan putaran spindel dan gerak pemakanan sama-sama memiliki 7 variasi tingkatan. Menggunakan metode *full factorial*, maka total jumlah kombinasi uji komposisi yang dapat dihasilkan dari variasi tingkatan tersebut adalah $2 \times 7 \times 7 = 98$ komposisi uji. Sementara itu, Respon parameter dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Y_1 Waktu proses (*process time*) dalam satuan menit.
2. Keseuaian dimensi (*dimension*) hasil proses, meliputi Y_2 panjang (*length*), Y_3 lebar (*width*), dan Y_4 kedalaman (*depth*) dalam satuan mm.

Instrument Penelitian

Instrument dari penelitian ini terdiri dari instrument pengukuran dan instrument pendukung pengambilan sampel data, diantaranya adalah:

1. *Stopwatch* untuk mengukur aktual waktu proses tiap sampel uji.
2. *Vernier caliper* merk Insize untuk mengukur dimensi *length* dan *width* sampel uji.
3. *Depth gauge* merk Insize untuk mengukur dimensi *depth* sampel uji.
4. *Software UcanCam v.10* untuk mengenerate *gcode* dan *toolpath* pada mesin CNC.
5. DSP *controller* sebagai konsol kendali (*jog*) dan inputan setting mesin CNC.
6. *Quick release F clamp* dan *spring clamp* untuk menjepit benda kerja.
7. Mata pahat *end mill 4 flute* diameter *blade-shank* 3 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Komposisi

Hasil pengujian sebanyak 98 kombinasi yang telah dilakukan menggunakan 3 jenis faktor dan 4 jenis respon parameter berdasarkan kombinasi komposisi *level* faktor pengujian yang telah ditetapkan dengan metode *Full Factorial Design* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Komposisi

Komposisi Uji	Depth per cut (X ₁)	Spindle Speed (X ₂)	Motion Speed (X ₃)	Waktu (min) Proses (Y ₁)	Depth (Y ₂)	Dimensi (mm) Length (Y ₃) Width (Y ₄)	
1	0,25	2	1	80,26	22,38	19,76	19,88
2	0,25	2	2	40,54	22,57	19,73	19,88
3	0,25	2	3	27,43	22,58	19,79	19,88
4	0,25	2	4	21	22,12	19,43	19,68
5	0,25	2	5	17,05	21,72	19,57	19,7
6	0,25	2	6	14,27	21,92	19,44	19,65
7	0,25	2	7	12,37	21,92	19,56	19,68
8	0,25	3	1	80,02	21,57	19,45	19,56
9	0,25	3	2	40,33	21,72	19,43	19,52
10	0,25	3	3	27,33	21,63	19,4	19,58
11	0,25	3	4	20,59	21,99	19,54	19,7
12	0,25	3	5	17,05	21,95	19,59	19,7
13	0,25	3	6	14,27	21,91	19,54	19,68
14	0,25	3	7	12,39	21,85	19,49	19,74
15	0,25	4	1	79,56	21,59	19,42	19,53
16	0,25	4	2	40,39	21,42	19,36	19,55
17	0,25	4	3	27,35	21,83	19,46	19,55
18	0,25	4	4	21	21,96	19,51	19,69
19	0,25	4	5	17,03	21,89	19,69	19,68
20	0,25	4	6	14,27	21,82	19,59	19,71
21	0,25	4	7	12,39	21,92	19,53	19,73
22	0,25	5	1	79,56	21,65	19,4	19,51
23	0,25	5	2	40,39	21,83	19,22	19,46
24	0,25	5	3	27,35	21,74	19,34	19,53
25	0,25	5	4	21	21,87	19,56	19,73
26	0,25	5	5	17,05	21,95	19,53	19,67
27	0,25	5	6	14,27	21,88	19,53	19,71
28	0,25	5	7	12,39	22,22	19,51	19,65
29	0,25	6	1	79,56	21,5	19,35	19,55
30	0,25	6	2	40,39	21,58	19,41	19,53
31	0,25	6	3	27,33	21,64	19,43	19,56
32	0,25	6	4	21,07	22,06	19,66	19,81
33	0,25	6	5	17,1	22,05	19,7	19,82
34	0,25	6	6	13,32	22,05	19,71	19,82
35	0,25	6	7	12,39	22,03	19,59	19,9
36	0,25	7	1	79,57	21,54	19,31	19,57
37	0,25	7	2	40,53	21,58	19,35	19,57
38	0,25	7	3	27,33	22,23	19,46	19,73
39	0,25	7	4	21,07	21,98	19,68	19,83
40	0,25	7	5	17,09	21,98	19,63	19,85
41	0,25	7	6	14,31	21,91	19,89	19,86
42	0,25	7	7	12,43	21,95	19,61	19,81
43	0,25	8	1	79,55	22,27	19,69	19,7
44	0,25	8	2	40,39	22,09	19,53	19,68
45	0,25	8	3	27,33	22,21	19,39	19,71
46	0,25	8	4	21,01	21,98	19,54	19,65
47	0,25	8	5	17,04	21,97	19,59	19,68
48	0,25	8	6	14,15	21,94	19,41	19,66
49	0,25	8	7	12,35	21,88	19,53	19,73

Tabel 2. Hasil Uji Komposisi (Lanjutan)

Komposisi Uji	Depth per cut (X ₁)	Spindle Speed (X ₂)	Motion Speed (X ₃)	Waktu (min) Proses (Y ₁)	Depth (Y ₂)	Dimensi (mm) Length (Y ₃)	Width (Y ₄)
50	0,5	2	1	39,5	21,77	19,34	19,57
51	0,5	2	2	20,15	21,78	19,37	19,61
52	0,5	2	3	13,43	22,06	19,41	19,64
53	0,5	2	4	10,28	21,51	19,54	19,59
54	0,5	2	5	8,3	21,55	19,46	19,7
55	0,5	2	6	7,12	21,85	19,46	19,69
56	0,5	2	7	6,16	22,08	19,5	19,7
57	0,5	3	1	39,51	21,75	19,57	19,61
58	0,5	3	2	20,15	21,67	19,43	19,55
59	0,5	3	3	13,44	21,69	19,42	19,6
60	0,5	3	4	10,28	22,17	19,53	19,67
61	0,5	3	5	8,3	22,31	19,37	19,67
62	0,5	3	6	7,12	22,34	19,4	19,62
63	0,5	3	7	6,16	22,42	19,53	19,68
64	0,5	4	1	39,51	21,76	19,52	19,55
65	0,5	4	2	20,15	21,72	19,42	19,51
66	0,5	4	3	13,42	21,66	19,4	19,45
67	0,5	4	4	10,28	22,33	19,48	19,62
68	0,5	4	5	8,3	22,38	19,54	19,63
69	0,5	4	6	7,12	22,51	19,48	19,66
70	0,5	4	7	6,16	22,52	19,49	19,67
71	0,5	5	1	39,44	21,74	19,43	19,56
72	0,5	5	2	20,18	22,04	19,4	19,58
73	0,5	5	3	13,43	22,02	19,5	19,6
74	0,5	5	4	10,28	22,58	19,56	19,66
75	0,5	5	5	8,31	22,47	19,49	19,62
76	0,5	5	6	7,12	22,05	19,52	19,66
77	0,5	5	7	6,16	22,08	19,45	19,49
78	0,5	6	1	39,51	22,13	19,42	19,62
79	0,5	6	2	20,16	21,98	19,5	19,63
80	0,5	6	3	13,42	21,86	19,5	19,67
81	0,5	6	4	10,26	22,22	19,48	19,67
82	0,5	6	5	8,31	21,79	19,48	19,67
83	0,5	6	6	7,12	21,8	19,41	19,63
84	0,5	6	7	6,16	21,87	19,46	19,73
85	0,5	7	1	39,49	22,05	19,48	19,67
86	0,5	7	2	20,16	22,21	19,47	19,6
87	0,5	7	3	13,42	22,35	19,49	19,51
88	0,5	7	4	10,28	21,93	19,48	19,7
89	0,5	7	5	8,31	21,86	19,42	19,57
90	0,5	7	6	7,12	21,9	19,46	19,68
91	0,5	7	7	6,16	21,84	19,44	19,62
92	0,5	8	1	39,5	22,18	19,44	19,55
93	0,5	8	2	20,16	22,21	19,47	19,69
94	0,5	8	3	13,44	22,26	19,38	19,66
95	0,5	8	4	10,28	21,87	19,41	19,62
96	0,5	8	5	8,3	21,92	19,35	19,6
97	0,5	8	6	7,12	21,93	19,37	19,7
98	0,5	8	7	5,49	20,58	19,35	19,54

Formulasi Model Matematis

Hasil uji tiap kombinasi dari komposisi *level* faktor yang sudah diketahui di atas selanjutnya akan dilakukan analisa regresi untuk mengetahui formulasi model matematis dari metode *Full Factorial* pada setiap respon parameternya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dengan menggunakan bantuan *software* optimasi.

Tabel 3. Formulasi Model Matematis *Full Factorial*

<i>Response</i>	<i>Regression Equation</i>
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & 22,63 + 7,656 X1_{0,25} - 7,656 X1_{0,50} + 0,07020 X2_{25} + 0,004490 X2_{35} + 0,003776 X2_{45} + 0,003776 X2_{55} - 0,05551 X2_{65} + 0,02806 X2_{75} \\ & - 0,05480 X2_{85} + 36,98 X3_{15} + 7,657 X3_{25} - 2,245 X3_{35} - 7,014 X3_{45} - 9,953 X3_{55} - 12,01 X3_{65} - 13,41 X3_{75} + 0,05694 X1 \cdot X2_{0,25 \ 2} \\ & - 0,01163 X1 \cdot X2_{0,25 \ 3} - 0,009490 X1 \cdot X2_{0,25 \ 4} - 0,006633 X1 \cdot X2_{0,25 \ 5} - 0,06878 X1 \cdot X2_{0,25 \ 6} + 0,01480 X1 \cdot X2_{0,25 \ 7} + 0,02480 X1 \cdot X2_{0,25 \ 8} \\ & - 0,05694 X1 \cdot X2_{0,50 \ 2} + 0,01163 X1 \cdot X2_{0,50 \ 3} + 0,009490 X1 \cdot X2_{0,50 \ 4} + 0,006633 X1 \cdot X2_{0,50 \ 5} + 0,06878 X1 \cdot X2_{0,50 \ 6} - 0,01480 X1 \cdot X2_{0,50 \ 7} \\ & - 0,02480 X1 \cdot X2_{0,50 \ 8} + 12,46 X1 \cdot X3_{0,25 \ 1} + 2,476 X1 \cdot X3_{0,25 \ 2} - 0,6952 X1 \cdot X3_{0,25 \ 3} - 2,313 X1 \cdot X3_{0,25 \ 4} - 3,279 X1 \cdot X3_{0,25 \ 5} \\ & - 4,154 X1 \cdot X3_{0,25 \ 6} - 4,494 X1 \cdot X3_{0,25 \ 7} - 12,46 X1 \cdot X3_{0,50 \ 1} - 2,476 X1 \cdot X3_{0,50 \ 2} + 0,6952 X1 \cdot X3_{0,50 \ 3} + 2,313 X1 \cdot X3_{0,50 \ 4} \\ & + 3,279 X1 \cdot X3_{0,50 \ 5} + 4,154 X1 \cdot X3_{0,50 \ 6} + 4,494 X1 \cdot X3_{0,50 \ 7} + 0,1998 X2 \cdot X3_{2 \ 1} - 0,01592 X2 \cdot X3_{2 \ 2} - 0,02949 X2 \cdot X3_{2 \ 3} - 0,05020 X2 \cdot X3_{2 \ 4} \\ & - 0,07663 X2 \cdot X3_{2 \ 5} + 0,003367 X2 \cdot X3_{2 \ 6} - 0,03092 X2 \cdot X3_{2 \ 7} + 0,1505 X2 \cdot X3_{3 \ 1} - 0,05520 X2 \cdot X3_{3 \ 2} - 0,008776 X2 \cdot X3_{3 \ 3} - 0,1895 X2 \cdot X3_{3 \ 4} \\ & - 0,01092 X2 \cdot X3_{3 \ 5} + 0,06908 X2 \cdot X3_{3 \ 6} + 0,04480 X2 \cdot X3_{3 \ 7} - 0,07878 X2 \cdot X3_{4 \ 1} - 0,02449 X2 \cdot X3_{4 \ 2} - 0,008061 X2 \cdot X3_{4 \ 3} \\ & + 0,01622 X2 \cdot X3_{4 \ 4} - 0,02020 X2 \cdot X3_{4 \ 5} + 0,06980 X2 \cdot X3_{4 \ 6} + 0,04551 X2 \cdot X3_{4 \ 7} - 0,1138 X2 \cdot X3_{5 \ 1} - 0,009490 X2 \cdot X3_{5 \ 2} - 0,003061 X2 \cdot X3_{5 \ 3} \\ & + 0,01622 X2 \cdot X3_{5 \ 4} - 0,005204 X2 \cdot X3_{5 \ 5} + 0,06980 X2 \cdot X3_{5 \ 6} + 0,04551 X2 \cdot X3_{5 \ 7} - 0,01949 X2 \cdot X3_{6 \ 1} + 0,03980 X2 \cdot X3_{6 \ 2} \\ & + 0,04122 X2 \cdot X3_{6 \ 3} + 0,1005 X2 \cdot X3_{6 \ 4} + 0,07908 X2 \cdot X3_{6 \ 5} - 0,3459 X2 \cdot X3_{6 \ 6} + 0,1048 X2 \cdot X3_{6 \ 7} - 0,1081 X2 \cdot X3_{7 \ 1} + 0,02622 X2 \cdot X3_{7 \ 2} \\ & - 0,04235 X2 \cdot X3_{7 \ 3} + 0,02694 X2 \cdot X3_{7 \ 4} - 0,009490 X2 \cdot X3_{7 \ 5} + 0,06551 X2 \cdot X3_{7 \ 6} + 0,04122 X2 \cdot X3_{7 \ 7} - 0,03020 X2 \cdot X3_{8 \ 1} + 0,03908 X2 \cdot X3_{8 \ 2} \\ & + 0,05051 X2 \cdot X3_{8 \ 3} + 0,07980 X2 \cdot X3_{8 \ 4} + 0,04337 X2 \cdot X3_{8 \ 5} + 0,06837 X2 \cdot X3_{8 \ 6} - 0,2509 X2 \cdot X3_{8 \ 7} + 0,2073 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 1} \\ & + 0,005918 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 2} - 0,01765 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 3} - 0,03980 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 4} - 0,05908 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 5} + 0,01663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 6} \\ & - 0,1134 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 2 \ 7} + 0,1509 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 1} - 0,03051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 2} - 0,004082 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 3} - 0,1762 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 4} \\ & + 0,009490 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 5} + 0,08520 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 6} - 0,03480 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 3 \ 7} - 0,08122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 1} - 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 2} \\ & + 0,01378 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 3} + 0,02663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 4} - 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 5} + 0,08306 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 6} \\ & - 0,03694 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 4 \ 7} - 0,04908 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 1} - 0,02051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 2} + 0,005918 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 3} + 0,02378 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 4} \\ & - 0,000510 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 5} + 0,08020 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 6} - 0,03980 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 5 \ 7} - 0,02194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 1} + 0,05163 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 2} \\ & + 0,06306 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 3} + 0,1309 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 4} + 0,08663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 5} - 0,3327 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 6} + 0,02235 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 6 \ 7} \\ & - 0,09051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 1} + 0,03806 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 2} - 0,02051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 3} + 0,03735 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 4} \\ & - 0,001939 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 5} + 0,07878 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 6} - 0,04122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 7 \ 7} - 0,1155 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 1} - 0,04194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 2} \\ & - 0,04051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 3} - 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 4} - 0,03194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 5} - 0,01122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 6} + 0,2438 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,25 \ 8 \ 7} \\ & - 0,2073 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 1} - 0,005918 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 2} + 0,01765 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 3} + 0,03980 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 4} + 0,05908 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 5} \\ & - 0,01663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 6} + 0,1134 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 2 \ 7} - 0,1509 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 1} + 0,03051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 2} + 0,004082 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 3} \\ & + 0,1762 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 4} - 0,009490 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 5} - 0,08520 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 6} + 0,03480 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 3 \ 7} + 0,08122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 1} \\ & + 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 2} - 0,01378 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 3} - 0,02663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 4} + 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 5} \\ & - 0,08306 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 6} + 0,03694 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 4 \ 7} + 0,04908 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 1} + 0,02051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 2} - 0,005918 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 3} \\ & - 0,02378 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 4} + 0,000510 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 5} - 0,08020 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 6} + 0,03980 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 5 \ 7} + 0,02194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 1} \\ & - 0,05163 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 2} - 0,06306 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 3} - 0,1309 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 4} - 0,08663 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 5} + 0,3327 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 6} \\ & - 0,02235 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 6 \ 7} + 0,09051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 1} - 0,03806 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 2} + 0,02051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 3} - 0,03735 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 4} \\ & + 0,001939 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 5} - 0,07878 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 6} + 0,04122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 7 \ 7} + 0,1155 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 1} + 0,04194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 2} \\ & + 0,04051 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 3} + 0,002653 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 4} + 0,03194 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 5} + 0,01122 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 6} \\ & - 0,2438 X1 \cdot X2 \cdot X3_{0,50 \ 8 \ 7} \end{aligned} $

Tabel 3. Formulasi Model Matematis *Full Factorial* (Lanjutan)

<i>Response</i>	<i>Regression Equation</i>
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & 21,95 - 0,03806 X1_0,25 + 0,03806 X1_0,50 + 0,03367 X2_2 - 0,02633 X2_3 - 0,002041 X2_4 + 0,05582 X2_5 - 0,05561 X2_6 - 0,002041 X2_7 \\ & - 0,003469 X2_8 - 0,1042 X3_1 - 0,06704 X3_2 + 0,03010 X3_3 + 0,08796 X3_4 + 0,03224 X3_5 + 0,03367 X3_6 - 0,01276 X3_7 + 0,2245 X1*X2_0,25\ 2 \\ & - 0,08551 X1*X2_0,25\ 3 - 0,1369 X1*X2_0,25\ 4 - 0,09337 X1*X2_0,25\ 5 - 0,01480 X1*X2_0,25\ 6 - 0,03122 X1*X2_0,25\ 7 + 0,1373 X1*X2_0,25 \\ & 8 - 0,2245 X1*X2_0,50\ 2 + 0,08551 X1*X2_0,50\ 3 + 0,1369 X1*X2_0,50\ 4 + 0,09337 X1*X2_0,50\ 5 + 0,01480 X1*X2_0,50\ 6 + 0,03122 X1*X2_0,50\ 7 \\ & - 0,1373 X1*X2_0,50\ 8 - 0,02480 X1*X3_0,25\ 1 - 0,02051 X1*X3_0,25\ 2 + 0,03520 X1*X3_0,25\ 3 - 0,008367 X1*X3_0,25\ 4 - 0,01694 X1*X3_0,25\ 5 \\ & - 0,02980 X1*X3_0,25\ 6 + 0,06520 X1*X3_0,25\ 7 + 0,02480 X1*X3_0,50\ 1 + 0,02051 X1*X3_0,50\ 2 - 0,03520 X1*X3_0,50\ 3 + 0,008367 X1*X3_0,50\ 4 \\ & + 0,01694 X1*X3_0,50\ 5 + 0,02980 X1*X3_0,50\ 6 - 0,06520 X1*X3_0,50\ 7 + 0,1928 X2*X3_2\ 1 + 0,2556 X2*X3_2\ 2 + 0,3035 X2*X3_2\ 3 \\ & - 0,2594 X2*X3_2\ 4 - 0,3837 X2*X3_2\ 5 - 0,1351 X2*X3_2\ 6 + 0,02633 X2*X3_2\ 7 - 0,1622 X2*X3_3\ 1 - 0,1644 X2*X3_3\ 2 - 0,2965 X2*X3_3\ 3 \\ & + 0,06561 X2*X3_3\ 4 + 0,1713 X2*X3_3\ 5 + 0,1649 X2*X3_3\ 6 + 0,2213 X2*X3_3\ 7 - 0,1715 X2*X3_4\ 1 - 0,3137 X2*X3_4\ 2 - 0,2358 X2*X3_4\ 3 \\ & + 0,1063 X2*X3_4\ 4 + 0,1520 X2*X3_4\ 5 + 0,1806 X2*X3_4\ 6 + 0,2820 X2*X3_4\ 7 - 0,2094 X2*X3_5\ 1 - 0,006531 X2*X3_5\ 2 - 0,1587 X2*X3_5\ 3 \\ & + 0,1285 X2*X3_5\ 4 + 0,1692 X2*X3_5\ 5 - 0,07724 X2*X3_5\ 6 + 0,1542 X2*X3_5\ 7 + 0,02204 X2*X3_6\ 1 - 0,05010 X2*X3_6\ 2 - 0,1772 X2*X3_6\ 3 \\ & + 0,1549 X2*X3_6\ 4 - 0,009388 X2*X3_6\ 5 - 0,005816 X2*X3_6\ 6 + 0,06561 X2*X3_6\ 7 - 0,05153 X2*X3_7\ 1 + 0,01133 X2*X3_7\ 2 + 0,3092 X2*X3_7\ 3 \\ & - 0,08367 X2*X3_7\ 4 - 0,06296 X2*X3_7\ 5 - 0,07939 X2*X3_7\ 6 - 0,04296 X2*X3_7\ 7 + 0,3799 X2*X3_8\ 1 + 0,2678 X2*X3_8\ 2 + 0,2556 X2*X3_8\ 3 \\ & - 0,1122 X2*X3_8\ 4 - 0,03653 X2*X3_8\ 5 - 0,04796 X2*X3_8\ 6 - 0,7065 X2*X3_8\ 7 + 0,1434 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 1 + 0,2291 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 2 \\ & + 0,03837 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 3 + 0,1269 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 4 - 0,08449 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 5 - 0,1216 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 6 - 0,3316 X1*X2*X3_0,25\ 2\ 7 \\ & + 0,05837 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 1 + 0,1691 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 2 + 0,05837 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 3 + 0,04194 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 4 - 0,03949 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 5 \\ & - 0,06163 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 6 - 0,2266 X1*X2*X3_0,25\ 3\ 7 + 0,1148 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 1 + 0,04551 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 2 + 0,2248 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 3 \\ & - 0,001633 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 4 - 0,05306 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 5 - 0,1402 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 6 - 0,1902 X1*X2*X3_0,25\ 4\ 7 + 0,1112 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 1 \\ & + 0,04694 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 2 - 0,04378 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 3 - 0,2152 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 4 - 0,1116 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 5 + 0,07622 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 6 \\ & + 0,1362 X1*X2*X3_0,25\ 5\ 7 - 0,2373 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 1 - 0,1266 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 2 - 0,09235 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 3 - 0,01878 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 4 \\ & + 0,1998 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 5 + 0,2077 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 6 + 0,06765 X1*X2*X3_0,25\ 6\ 7 - 0,1609 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 1 - 0,2252 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 2 \\ & - 0,02592 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 3 + 0,1027 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 4 + 0,1462 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 5 + 0,1041 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 6 + 0,05908 X1*X2*X3_0,25\ 7\ 7 \\ & - 0,02949 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 1 - 0,1388 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 2 - 0,1595 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 3 - 0,03592 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 4 - 0,05735 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 5 \\ & - 0,06449 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 6 + 0,4855 X1*X2*X3_0,25\ 8\ 7 - 0,1434 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 1 - 0,2291 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 2 - 0,03837 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 3 \\ & - 0,1269 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 4 + 0,08449 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 5 + 0,1216 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 6 + 0,3316 X1*X2*X3_0,50\ 2\ 7 - 0,05837 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 1 \\ & - 0,1691 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 2 - 0,05837 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 3 - 0,04194 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 4 + 0,03949 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 5 + 0,06163 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 6 \\ & + 0,2266 X1*X2*X3_0,50\ 3\ 7 - 0,1148 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 1 - 0,04551 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 2 - 0,2248 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 3 + 0,001633 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 4 \\ & + 0,05306 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 5 + 0,1402 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 6 + 0,1902 X1*X2*X3_0,50\ 4\ 7 - 0,1112 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 1 - 0,04694 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 2 \\ & + 0,04378 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 3 + 0,2152 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 4 + 0,1116 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 5 - 0,07622 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 6 - 0,1362 X1*X2*X3_0,50\ 5\ 7 \\ & + 0,2373 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 1 + 0,1266 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 2 + 0,09235 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 3 + 0,01878 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 4 - 0,1998 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 5 \\ & - 0,2077 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 6 - 0,06765 X1*X2*X3_0,50\ 6\ 7 + 0,1609 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 1 + 0,2252 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 2 + 0,02592 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 3 \\ & - 0,1027 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 4 - 0,1462 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 5 - 0,1041 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 6 - 0,05908 X1*X2*X3_0,50\ 7\ 7 + 0,02949 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 1 \\ & + 0,1388 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 2 + 0,1595 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 3 + 0,03592 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 4 + 0,05735 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 5 + 0,06449 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 6 \\ & - 0,4855 X1*X2*X3_0,50\ 8\ 7 \end{aligned} $

Tabel 3. Formulasi Model Matematis *Full Factorial* (Lanjutan)

<i>Response</i>	<i>Regression Equation</i>
$Y_3 =$	$ \begin{aligned} & 19,49 + 0,03633 X1_{0,25} - 0,03633 X1_{0,50} + 0,03490 X2_{0,25} - 0,01296 X2_{0,50} + 0,001327 X2_{0,25} - 0,03082 X2_{0,50} + 0,01633 X2_{0,25} - 0,02133 X2_{0,50} \\ & - 0,03010 X2_{0,25} - 0,02082 X3_{0,25} - 0,05582 X3_{0,50} - 0,03582 X3_{0,25} + 0,03776 X3_{0,50} + 0,03847 X3_{0,25} + 0,02418 X3_{0,50} + 0,01204 X3_{0,25} + 0,04939 X1*X2_{0,25} \\ & - 0,02276 X1*X2_{0,25} - 0,01990 X1*X2_{0,25} - 0,05490 X1*X2_{0,25} + 0,006531 X1*X2_{0,25} + 0,01296 X1*X2_{0,25} + 0,02867 X1*X2_{0,25} \\ & - 0,04939 X1*X2_{0,50} + 0,02276 X1*X2_{0,50} + 0,01990 X1*X2_{0,50} + 0,05490 X1*X2_{0,50} - 0,006531 X1*X2_{0,50} - 0,01296 X1*X2_{0,50} \\ & - 0,02867 X1*X2_{0,50} - 0,02347 X1*X3_{0,25} - 0,03847 X1*X3_{0,25} - 0,02418 X1*X3_{0,25} - 0,004898 X1*X3_{0,25} + 0,04867 X1*X3_{0,25} \\ & + 0,03582 X1*X3_{0,25} + 0,006531 X1*X3_{0,25} + 0,02347 X1*X3_{0,50} + 0,03847 X1*X3_{0,50} + 0,02418 X1*X3_{0,50} + 0,004898 X1*X3_{0,50} \\ & - 0,04867 X1*X3_{0,50} - 0,03582 X1*X3_{0,50} - 0,006531 X1*X3_{0,50} + 0,04510 X2*X3_{0,25} + 0,08010 X2*X3_{0,25} + 0,1101 X2*X3_{0,25} \\ & - 0,07847 X2*X3_{0,25} - 0,04918 X2*X3_{0,25} - 0,09990 X2*X3_{0,25} - 0,007755 X2*X3_{0,25} + 0,05296 X2*X3_{0,25} + 0,007959 X2*X3_{0,25} - 0,03204 X2*X3_{0,25} \\ & + 0,01939 X2*X3_{0,25} - 0,03633 X2*X3_{0,25} - 0,03204 X2*X3_{0,25} + 0,02010 X2*X3_{0,25} - 0,001327 X2*X3_{0,25} - 0,04633 X2*X3_{0,25} - 0,02633 X2*X3_{0,25} \\ & - 0,03490 X2*X3_{0,25} + 0,08439 X2*X3_{0,25} + 0,01867 X2*X3_{0,25} + 0,005816 X2*X3_{0,25} - 0,02418 X2*X3_{0,25} - 0,09418 X2*X3_{0,25} \\ & - 0,004184 X2*X3_{0,25} + 0,06224 X2*X3_{0,25} + 0,01153 X2*X3_{0,25} + 0,04082 X2*X3_{0,25} + 0,007959 X2*X3_{0,25} - 0,1013 X2*X3_{0,25} \\ & + 0,003673 X2*X3_{0,25} - 0,006327 X2*X3_{0,25} + 0,02510 X2*X3_{0,25} + 0,04439 X2*X3_{0,25} + 0,02867 X2*X3_{0,25} + 0,005816 X2*X3_{0,25} \\ & - 0,09633 X2*X3_{0,25} - 0,04633 X2*X3_{0,25} - 0,001327 X2*X3_{0,25} + 0,03010 X2*X3_{0,25} - 0,02561 X2*X3_{0,25} + 0,1387 X2*X3_{0,25} + 0,000816 X2*X3_{0,25} \\ & + 0,1251 X2*X3_{0,25} + 0,09510 X2*X3_{0,25} - 0,03990 X2*X3_{0,25} - 0,02347 X2*X3_{0,25} - 0,02918 X2*X3_{0,25} - 0,09490 X2*X3_{0,25} - 0,03276 X2*X3_{0,25} \\ & + 0,1478 X1*X2*X3_{0,25} + 0,1328 X1*X2*X3_{0,25} + 0,1285 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1358 X1*X2*X3_{0,25} - 0,07939 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,1315 X1*X2*X3_{0,25} - 0,06224 X1*X2*X3_{0,25} - 0,05010 X1*X2*X3_{0,25} + 0,02490 X1*X2*X3_{0,25} + 0,000612 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,003673 X1*X2*X3_{0,25} + 0,04776 X1*X2*X3_{0,25} + 0,02061 X1*X2*X3_{0,25} - 0,04010 X1*X2*X3_{0,25} - 0,04296 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,007959 X1*X2*X3_{0,25} + 0,03776 X1*X2*X3_{0,25} + 0,003469 X1*X2*X3_{0,25} + 0,009898 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,002755 X1*X2*X3_{0,25} - 0,002959 X1*X2*X3_{0,25} + 0,02704 X1*X2*X3_{0,25} - 0,03296 X1*X2*X3_{0,25} - 0,03724 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,02347 X1*X2*X3_{0,25} - 0,01010 X1*X2*X3_{0,25} - 0,01224 X1*X2*X3_{0,25} + 0,04204 X1*X2*X3_{0,25} - 0,05439 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,04939 X1*X2*X3_{0,25} - 0,05367 X1*X2*X3_{0,25} + 0,05204 X1*X2*X3_{0,25} + 0,01847 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,07133 X1*X2*X3_{0,25} + 0,01561 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1108 X1*X2*X3_{0,25} - 0,07082 X1*X2*X3_{0,25} - 0,04010 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,05561 X1*X2*X3_{0,25} + 0,007041 X1*X2*X3_{0,25} + 0,1299 X1*X2*X3_{0,25} + 0,02918 X1*X2*X3_{0,25} + 0,08347 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,003469 X1*X2*X3_{0,25} - 0,03582 X1*X2*X3_{0,25} + 0,004898 X1*X2*X3_{0,25} + 0,006327 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,08082 X1*X2*X3_{0,25} + 0,01847 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1478 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1328 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1285 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,1358 X1*X2*X3_{0,25} + 0,07939 X1*X2*X3_{0,25} + 0,1315 X1*X2*X3_{0,25} + 0,06224 X1*X2*X3_{0,25} + 0,05010 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,02490 X1*X2*X3_{0,25} - 0,000612 X1*X2*X3_{0,25} + 0,003673 X1*X2*X3_{0,25} - 0,04776 X1*X2*X3_{0,25} - 0,02061 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,04010 X1*X2*X3_{0,25} + 0,04296 X1*X2*X3_{0,25} + 0,007959 X1*X2*X3_{0,25} - 0,03776 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,003469 X1*X2*X3_{0,25} - 0,009898 X1*X2*X3_{0,25} - 0,002755 X1*X2*X3_{0,25} + 0,002959 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,02704 X1*X2*X3_{0,25} + 0,03296 X1*X2*X3_{0,25} + 0,03724 X1*X2*X3_{0,25} - 0,02347 X1*X2*X3_{0,25} + 0,01010 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,01224 X1*X2*X3_{0,25} - 0,04204 X1*X2*X3_{0,25} + 0,05439 X1*X2*X3_{0,25} + 0,04939 X1*X2*X3_{0,25} + 0,05367 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,05204 X1*X2*X3_{0,25} - 0,01847 X1*X2*X3_{0,25} - 0,07133 X1*X2*X3_{0,25} - 0,01561 X1*X2*X3_{0,25} + 0,1108 X1*X2*X3_{0,25} \\ & + 0,07082 X1*X2*X3_{0,25} + 0,04010 X1*X2*X3_{0,25} - 0,05561 X1*X2*X3_{0,25} - 0,007041 X1*X2*X3_{0,25} - 0,1299 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,02918 X1*X2*X3_{0,25} - 0,08347 X1*X2*X3_{0,25} - 0,003469 X1*X2*X3_{0,25} - 0,03582 X1*X2*X3_{0,25} - 0,004898 X1*X2*X3_{0,25} \\ & - 0,006327 X1*X2*X3_{0,25} + 0,08082 X1*X2*X3_{0,25} - 0,01847 X1*X2*X3_{0,25} \end{aligned} $

Tabel 3. Formulasi Model Matematis *Full Factorial* (Lanjutan)

<i>Response</i>	<i>Regression Equation</i>
$Y_4 =$	$ \begin{aligned} &19,65 + 0,03122 X1_{0,25} - 0,03122 X1_{0,50} + 0,05010 X2_{2} - 0,01918 X2_{3} - 0,04418 X2_{4} - 0,05133 X2_{5} + 0,03296 X2_{6} + 0,03010 X2_{7} \\ &+ 0,001531 X2_{8} - 0,05133 X3_{1} - 0,05633 X3_{2} - 0,03418 X3_{3} + 0,03367 X3_{4} + 0,02939 X3_{5} + 0,04153 X3_{6} + 0,03724 X3_{7} + 0,02949 X1*X2_{0,25} \\ &2 - 0,02551 X1*X2_{0,25} 3 - 0,006224 X1*X2_{0,25} 4 - 0,02480 X1*X2_{0,25} 5 - 0,004796 X1*X2_{0,25} 6 + 0,03092 X1*X2_{0,25} 7 + 0,000918 X1*X2_{0,25} \\ &8 - 0,02949 X1*X2_{0,50} 2 + 0,02551 X1*X2_{0,50} 3 + 0,006224 X1*X2_{0,50} 4 + 0,02480 X1*X2_{0,50} 5 + 0,004796 X1*X2_{0,50} 6 - 0,03092 X1*X2_{0,50} \\ &7 - 0,000918 X1*X2_{0,50} 8 - 0,01908 X1*X3_{0,25} 1 - 0,02980 X1*X3_{0,25} 2 - 0,001939 X1*X3_{0,25} 3 + 0,008776 X1*X3_{0,25} 4 + 0,01449 X1*X3_{0,25} \\ &5 + 0,000918 X1*X3_{0,25} 6 + 0,02663 X1*X3_{0,25} 7 + 0,01908 X1*X3_{0,50} 1 + 0,02980 X1*X3_{0,50} 2 + 0,001939 X1*X3_{0,50} 3 \\ &- 0,008776 X1*X3_{0,50} 4 - 0,01449 X1*X3_{0,50} 5 - 0,000918 X1*X3_{0,50} 6 - 0,02663 X1*X3_{0,50} 7 + 0,07276 X2*X3_{2} 1 + 0,09776 X2*X3_{2} 2 \\ &+ 0,09061 X2*X3_{2} 3 - 0,1022 X2*X3_{2} 4 - 0,03296 X2*X3_{2} 5 - 0,07510 X2*X3_{2} 6 - 0,05082 X2*X3_{2} 7 + 0,002041 X2*X3_{3} 1 - 0,04296 X2*X3_{3} 2 \\ &- 0,01010 X2*X3_{3} 3 + 0,01704 X2*X3_{3} 4 + 0,02133 X2*X3_{3} 5 - 0,02582 X2*X3_{3} 6 + 0,03847 X2*X3_{3} 7 - 0,01796 X2*X3_{4} 1 - 0,02296 X2*X3_{4} 2 \\ &- 0,07510 X2*X3_{4} 3 + 0,01204 X2*X3_{4} 4 + 0,01633 X2*X3_{4} 5 + 0,03418 X2*X3_{4} 6 + 0,05347 X2*X3_{4} 7 - 0,01582 X2*X3_{5} 1 - 0,02582 X2*X3_{5} 2 \\ &- 0,002959 X2*X3_{5} 3 + 0,05918 X2*X3_{5} 4 + 0,01347 X2*X3_{5} 5 + 0,04133 X2*X3_{5} 6 - 0,06939 X2*X3_{5} 7 - 0,05010 X2*X3_{6} 1 - 0,05010 X2*X3_{6} \\ &2 - 0,03724 X2*X3_{6} 3 + 0,01990 X2*X3_{6} 4 + 0,02918 X2*X3_{6} 5 - 0,002959 X2*X3_{6} 6 + 0,09133 X2*X3_{6} 7 - 0,01224 X2*X3_{7} 1 \\ &- 0,04224 X2*X3_{7} 2 - 0,02939 X2*X3_{7} 3 + 0,04776 X2*X3_{7} 4 - 0,002959 X2*X3_{7} 5 + 0,04490 X2*X3_{7} 6 - 0,005816 X2*X3_{7} 7 + 0,02133 X2*X3_{8} \\ &1 + 0,08633 X2*X3_{8} 2 + 0,06418 X2*X3_{8} 3 - 0,05367 X2*X3_{8} 4 - 0,04439 X2*X3_{8} 5 - 0,01653 X2*X3_{8} 6 - 0,05724 X2*X3_{8} 7 \\ &+ 0,1134 X1*X2*X3_{0,25} 2 1 + 0,1041 X1*X2*X3_{0,25} 2 2 + 0,06122 X1*X2*X3_{0,25} 2 3 - 0,02449 X1*X2*X3_{0,25} 2 4 - 0,07520 X1*X2*X3_{0,25} 2 5 \\ &- 0,08163 X1*X2*X3_{0,25} 2 6 - 0,09735 X1*X2*X3_{0,25} 2 7 - 0,01163 X1*X2*X3_{0,25} 3 1 + 0,009082 X1*X2*X3_{0,25} 3 2 - 0,01378 X1*X2*X3_{0,25} 3 \\ &3 + 0,000510 X1*X2*X3_{0,25} 3 4 - 0,005204 X1*X2*X3_{0,25} 3 5 + 0,02337 X1*X2*X3_{0,25} 3 6 - 0,002347 X1*X2*X3_{0,25} 3 7 \\ &- 0,01592 X1*X2*X3_{0,25} 4 1 + 0,02480 X1*X2*X3_{0,25} 4 2 + 0,02694 X1*X2*X3_{0,25} 4 3 + 0,001224 X1*X2*X3_{0,25} 4 4 - 0,01449 X1*X2*X3_{0,25} 4 \\ &5 - 0,000918 X1*X2*X3_{0,25} 4 6 - 0,02163 X1*X2*X3_{0,25} 4 7 - 0,01235 X1*X2*X3_{0,25} 5 1 - 0,03663 X1*X2*X3_{0,25} 5 2 - 0,03949 X1*X2*X3_{0,25} 5 \\ &3 + 0,01980 X1*X2*X3_{0,25} 5 4 + 0,004082 X1*X2*X3_{0,25} 5 5 + 0,01765 X1*X2*X3_{0,25} 5 6 + 0,04694 X1*X2*X3_{0,25} 5 7 \\ &- 0,04235 X1*X2*X3_{0,25} 6 1 - 0,04663 X1*X2*X3_{0,25} 6 2 - 0,07949 X1*X2*X3_{0,25} 6 3 + 0,03480 X1*X2*X3_{0,25} 6 4 + 0,03408 X1*X2*X3_{0,25} 6 5 \\ &+ 0,06765 X1*X2*X3_{0,25} 6 6 + 0,03194 X1*X2*X3_{0,25} 6 7 - 0,09306 X1*X2*X3_{0,25} 7 1 - 0,04735 X1*X2*X3_{0,25} 7 2 + 0,04980 X1*X2*X3_{0,25} 7 \\ &3 - 0,005918 X1*X2*X3_{0,25} 7 4 + 0,06337 X1*X2*X3_{0,25} 7 5 + 0,02694 X1*X2*X3_{0,25} 7 6 + 0,006224 X1*X2*X3_{0,25} 7 7 \\ &+ 0,06194 X1*X2*X3_{0,25} 8 1 - 0,007347 X1*X2*X3_{0,25} 8 2 - 0,005204 X1*X2*X3_{0,25} 8 3 - 0,02592 X1*X2*X3_{0,25} 8 4 - 0,006633 X1*X2*X3_{0,25} \\ &8 5 - 0,05306 X1*X2*X3_{0,25} 8 6 + 0,03622 X1*X2*X3_{0,25} 8 7 - 0,1134 X1*X2*X3_{0,50} 2 1 - 0,1041 X1*X2*X3_{0,50} 2 2 - 0,06122 X1*X2*X3_{0,50} 2 \\ &3 + 0,02449 X1*X2*X3_{0,50} 2 4 + 0,07520 X1*X2*X3_{0,50} 2 5 + 0,08163 X1*X2*X3_{0,50} 2 6 + 0,09735 X1*X2*X3_{0,50} 2 7 + 0,01163 X1*X2*X3_{0,50} \\ &3 1 - 0,009082 X1*X2*X3_{0,50} 3 2 + 0,01378 X1*X2*X3_{0,50} 3 3 - 0,000510 X1*X2*X3_{0,50} 3 4 + 0,005204 X1*X2*X3_{0,50} 3 5 \\ &- 0,02337 X1*X2*X3_{0,50} 3 6 + 0,002347 X1*X2*X3_{0,50} 3 7 + 0,01592 X1*X2*X3_{0,50} 4 1 - 0,02480 X1*X2*X3_{0,50} 4 2 - 0,02694 X1*X2*X3_{0,50} 4 \\ &3 - 0,001224 X1*X2*X3_{0,50} 4 4 + 0,01449 X1*X2*X3_{0,50} 4 5 + 0,000918 X1*X2*X3_{0,50} 4 6 + 0,02163 X1*X2*X3_{0,50} 4 7 \\ &+ 0,01235 X1*X2*X3_{0,50} 5 1 + 0,03663 X1*X2*X3_{0,50} 5 2 + 0,03949 X1*X2*X3_{0,50} 5 3 - 0,01980 X1*X2*X3_{0,50} 5 4 - 0,004082 X1*X2*X3_{0,50} 5 \\ &5 - 0,01765 X1*X2*X3_{0,50} 5 6 - 0,04694 X1*X2*X3_{0,50} 5 7 + 0,04235 X1*X2*X3_{0,50} 6 1 + 0,04663 X1*X2*X3_{0,50} 6 2 + 0,07949 X1*X2*X3_{0,50} \\ &6 3 - 0,03480 X1*X2*X3_{0,50} 6 4 - 0,03408 X1*X2*X3_{0,50} 6 5 - 0,06765 X1*X2*X3_{0,50} 6 6 - 0,03194 X1*X2*X3_{0,50} 6 7 + 0,09306 X1*X2*X3_{0,50} \\ &7 1 + 0,04735 X1*X2*X3_{0,50} 7 2 - 0,04980 X1*X2*X3_{0,50} 7 3 + 0,005918 X1*X2*X3_{0,50} 7 4 - 0,06337 X1*X2*X3_{0,50} 7 5 \\ &- 0,02694 X1*X2*X3_{0,50} 7 6 - 0,006224 X1*X2*X3_{0,50} 7 7 - 0,06194 X1*X2*X3_{0,50} 8 1 + 0,007347 X1*X2*X3_{0,50} 8 2 + 0,005204 X1*X2*X3_{0,50} \\ &8 3 + 0,02592 X1*X2*X3_{0,50} 8 4 + 0,006633 X1*X2*X3_{0,50} 8 5 + 0,05306 X1*X2*X3_{0,50} 8 6 - 0,03622 X1*X2*X3_{0,50} 8 7 \end{aligned} $

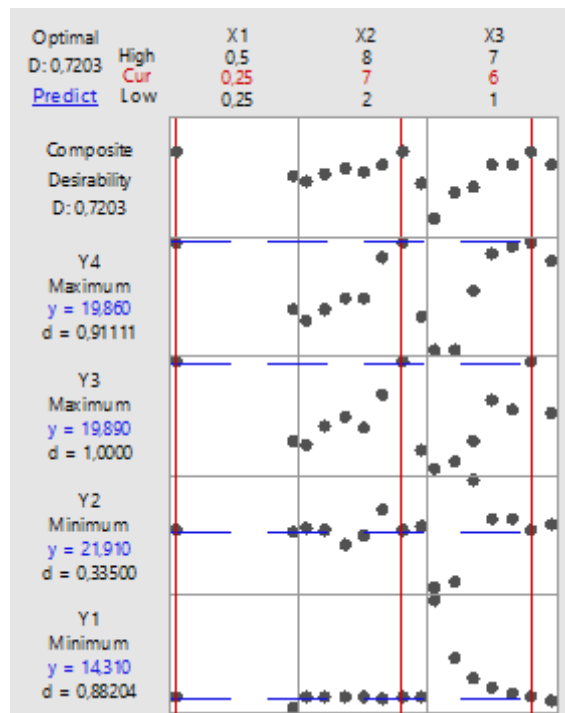
Optimasi Multi Respon

Formulasi model matematis yang sudah diketahui di atas selanjutnya dilakukan optimasi dari semua respon parameternya menggunakan bantuan *software* optimasi. Diketahui bahwa untuk respon parameter dimensi *depth* sebagian besar hasil pengujian menunjukkan hasil yang melampaui batas, sehingga pada optimasi responnya akan dilakukan minimasi. Sedangkan pada dimensi *length* dan *width* sebagian besar hasil pengujian menunjukkan hasil di bawah standar, sehingga optimasi dari respon akan dilakukan maksimasi. Respon parameter untuk efisiensi waktu proses menunjukkan hasil yang bervariasi, dimana variabel *depth per cut* dan *motion speed* terindikasi mempengaruhi perubahan aktual waktu proses, sehingga pada optimasi respon akan dilakukan minimasi.

Tabel 4. Fungsi Tujuan Optimasi Multi Respon

<i>Response</i>	<i>Goal</i>	<i>Lower</i>	<i>Target</i>	<i>Upper</i>
Y4	<i>Maximum</i>	19,45	19,90	-
Y3	<i>Maximum</i>	19,22	19,89	-
Y2	<i>Minimum</i>	-	20,58	22,58
Y1	<i>Minimum</i>	-	5,49	80,26

Fungsi tujuan optimasi multi respon yang sudah ditetapkan pada Tabel 4, selanjutnya dilakukan optimasi menggunakan metode *optimization plot* menggunakan bantuan *software* optimasi seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis *Optimization Plot*

Solusi optimal *level* faktor setting dari penelitian ini terangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Solusi Optimal

<i>Solution</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>Y4 Fit</i>	<i>Y3 Fit</i>	<i>Y2 Fit</i>	<i>Y1 Fit</i>	<i>Composite Desirability</i>
1	0,25	7	6	19,86	19,89	21,91	14,31	0,720321

Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat indikasi perubahan respon aktual waktu proses terhadap faktor *depth per cut* dan *motion speed* secara linier. Terlihat semakin rendah nilai variabel *depth per cut* dan *motion speed* menyebabkan aktual waktu proses menjadi tidak efisien, begitu juga sebaliknya. Di lain sisi, nilai respon dari kesesuaian dimensi hasil proses terlihat bervariasi tergantung dari kombinasi komposisi dari semua faktornya. Potensi penelitian lanjutan dari penelitian ini dengan berbagai respon parameter, material, mata pahat, teknik proses menggunakan objek mesin serupa.

PENUTUP

Simpulan

Kesimpulan dari penelitian terhadap objek mesin CNC Router G-Weike WK1212 untuk proses *cutting* material kayu mahoni menggunakan mata pahat *end mill 4 flute* diameter 3 mm terangkum berikut:

1. Hasil penelitian ini menunjukkan pola solusi optimal 1 titik (*single optimal solution*) dimana untuk *level* faktor setting optimal yang terpilih untuk *depth per cut* adalah 0,25, *spindle speed* adalah 7 step, dan *motion speed* adalah 6 step.
2. *Level* faktor setting optimal tersebut menghasilkan nilai respon untuk efisiensi waktu proses sebesar 14,31 menit dan kesesuaian dimensi hasil proses untuk *depth* sebesar 21,91 mm, *length* sebesar 19,89 mm, dan *width* 19,86 mm dengan nilai komposisi *desireability* sebesar 0,720321. Nilai komposisi *desireability* semakin mendekati nilai 1 menunjukkan semakin optimal nilai komposisi faktor terhadap respon yang dihasilkan.

Saran

Saran untuk penelitian lanjutan menggunakan objek mesin serupa terangkum berikut:

1. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan penambahan respon parameter seperti efisiensi penggunaan energi, efisiensi pemanfaatan mata pahat *end mill 4 flute* diameter 3 mm.
2. Penelitian lanjutan dapat dikembangkan dengan penggunaan mata pahat yang berbeda jenis seperti *ball mill*, *conical*, *dove tail*, *T slot*, dan lain sebagainya. Dapat juga dikembangkan dengan tingkat *flute*, diameter, dan jenis material mata pahat yang berbeda.
3. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan material kayu yang berbeda seperti jati, sonokeling, dan lain sebagainya. Dapat juga dikembangkan dengan material jenis lain seperti logam aluminium atau logam lunak lain, akrilik, polikarbonat, resin dan lain sebagainya.
4. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan teknik proses selain *cutting* seperti *engraving*, *relief*, dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B., Roy, S., Rai, R. N., & Saha, S. C. (2015). Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al-4.5%Cu-TiC MMCs with multi-performance characteristics. *Engineering Science and Technology an International Journal*, Vol.19, pp.857-865.
- Kaushik, V. S., Subramanian, M., & Sakthivel, M. (2018). Optimization of Processes Parameters on Temperature Rise in CNC End Milling of Al 7068 using Hybrid Techniques. *Materials Today*, Vol.5, pp.7037-7046.

- Montgomery C. D. (2013). *Design and Analysis of Experiment, Eight Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Nataraj, M., Balasubramanian, K., & Palanisamy, D. (2018). Optimization of Machining Parameters for CNC Turning of Al/Al₂O₃ MMC Using RSM Approach. *Materials Today*, Vol.5, pp.14265–14272.
- Pandivelan, C, Jeevanantham, A. K, & Sathiyarayanan, C. (2018). Optimization Study on Incremental Forming of Sheet Metal AA5052 for Variable Wall Angle using CNC Milling Machine. *Materials Today*, Vol.5. pp.12832–12836.
- Vardhan, M. V., Sankaraiah, G., & Yohan, M. (2018). Optimization of cutting Parameters and Prediction of Ra & MRR for machining of P20 Steel on CNC milling using Artificial Neural Networks. *Materials Today*, Vol.5, pp.27058–27064.
- Vardhan, M. V., Sankaraiah, G., Yohan, M., & Rao, H. J. (2017). Optimization of Parameters in CNC milling of P20 steel using Response Surface methodology and Taguchi Method. *Materials Today*, Vol.4, pp.9163–9169.
- Wijaya, D. K. & Izzhati, D. N. (2019). Optimasi Setup Proses Engraving CNC Laser Cutting Material Akrilik Menggunakan Simplex Centroid Design dan Optimasi Respon. *Dinamika Rekayasa*, Vol.15, no.1, pp.1-9.