

PEMANFAATAN LIMBAH PDAM UNTUK LAPISAN ATAS PAVING BLOCK MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN RSM BERBASIS SNI NO. 03-0691-1996

The Utilization of PDAM Sewage Sludge for Top Layer Paving Block Using Taguchi Method and RSM Based on SNI No. 03-0691-1996

Cucuk Nur Rosyidi, Retno Wulan Damayanti dan Winarno

Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami No. 36A, Ketingan, Surakarta, 57126
e-mail: cucuk@uns.ac.id, yantiehem@yahoo.com, wiwin.arno@gmail.com

Diajukan: 16 Februari 2012, Dinilai: 21 Februari 2012, Diterima: 23 April 2012

Abstrak

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Solo selain memberikan pelayanan air bersih juga memberikan pelayanan pengelolaan air limbah rumah tangga, instansi, dan komersial. Pelayanan pengelolaan air limbah tersebut dilakukan oleh PDAM menggunakan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Lumpur buangan hasil pengolahan limbah tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Dalam penelitian ini dilakukan pemanfaatan limbah lumpur IPAL PDAM sebagai campuran pembuatan lapisan atas paving block. Metode Taguchi digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan setting faktor optimal yang mempengaruhi karakteristik kualitas paving block. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 03-0691-1996, terdapat tiga karakteristik kualitas paving block yaitu kuat tekan, daya serap air, dan laju keausan. Selain itu, digunakan *response surface methodology* (RSM) untuk membantu menentukan hubungan antara karakteristik kualitas dengan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Hasil eksperimen menunjukkan setting level optimal diperoleh pada faktor ukuran maksimum agregat 10 mm, faktor air semen 0,3 dan 0,35 serta jumlah persentase lumpur yang digunakan sebesar 10%. Pemanfaatan lumpur IPAL PDAM Semanggi Solo dapat menghasilkan *paving block* dengan kualitas C Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 03-0691-1996 untuk kuat tekan dan mutu A untuk segi serapan air dan laju keausan.

Kata kunci: lumpur *paving block*, SNI, IPAL PDAM, *Taguchi*, *response surface methodology* (RSM)

Abstract

Local Drinking Water Company (PDAM) Solo not only produces clean water, but also provides waste water treatment for domestics, institutions, and commercials. The waste water treatment service is provided by PDAM using Waste Water Treatment Plant (IPAL). The sludge from the process in IPAL PDAM has not been used optimally. In this research, the sludge is used as a mixture of the top layer of paving block. Taguchi method is used in this research to find optimal setting of factor and its level which affecting the quality characteristics of the paving block. According to Indonesia National Standard (SNI) No. 03-0691-1996, there are three interesting quality characteristics for paving block which are compressive strength, water absorption, and wear rate. The response surface methodology is used to help determine the relationship between the quality characteristics and the influenced factors. The experimental results show that the optimal setting of the level is obtained when the condition factor of maximum size of aggregate is 10 mm, cement water factor are 0.3 and 0.35, and the percentage of sludge is 10%. Utilization of the sludge of IPAL PDAM Semanggi Solo produces paving blocks that meets the requirements of Indonesia National Standard (SNI) No. 03-0691-1996 resulting in grade C in terms of compressive strength and grade A in terms of water absorption and wear rate.

Keywords: *sludge, paving block, SNI, IPAL PDAM, Taguchi, response surface methodology (RSM)*

1. PENDAHULUAN

Paving blok merupakan produk bahan bangunan yang terdiri atas dua lapisan, yaitu lapisan atas dan bawah. Produk tersebut dibuat dari campuran semen, agregat, air, dan bahan tambahan lainnya. Lapisan atas merupakan bagian yang secara langsung berfungsi menahan beban sehingga seringkali terjadi retak

dan aus. Karena itu, lapisan tersebut harus dapat menahan gaya tekan, memiliki tingkat serapan air yang kecil, dan laju keausan yang rendah sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) *Paving block* No. 03-0691-1996.

PDAM Solo adalah perusahaan daerah yang tidak hanya menghasilkan air bersih untuk kebutuhan sehari-hari tetapi juga mengolah air limbah rumah tangga, industri, dan komersial.

Pelayanan pengolahan air limbah tersebut dilakukan oleh PDAM menggunakan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Proses pengolahan tersebut menghasilkan lumpur buangan yang belum dimanfaatkan secara optimal. Dalam penelitian ini, limbah lumpur IPAL PDAM Solo digunakan sebagai campuran pembuatan lapisan atas *paving block*. Dengan demikian limbah lumpur yang sebelumnya merupakan bahan buangan dapat digunakan sebagai bahan yang memiliki nilai lebih tinggi.

Penelitian tentang pemanfaatan limbah lumpur IPAL telah dilakukan antara lain oleh Susilowati (2004). Pada penelitian tersebut dilakukan solidifikasi terhadap lumpur IPAL Bojongsong Kabupaten Bandung yang berasal dari pengolahan limbah cair domestik dengan mencampurkan semen dan pasir. Hasil solidifikasi lumpur yang disinyalir mengandung logam Cu kemudian digunakan sebagai bahan *paving block* dan Batako. Kedua produk tersebut kemudian diuji kekuatan tekan, daya serap air, dan durabilitasnya secara terpisah.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh campuran lumpur IPAL PDAM Semanggi Solo terhadap respon yang berupa kuat tekan, daya serap air dan laju keausan lapisan atas *paving block*. Dalam penelitian ini, ketiga respon tersebut diteliti secara simultan menggunakan metode Taguchi multirespon. Metode Taguchi adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan *setting* optimal sebuah proses. Metode Taguchi menggunakan sebagian kecil dari rancangan eksperimen faktorial yang disebut *orthogonal array*. Metode tersebut lebih efisien dibandingkan dengan faktorial penuh. Metode Taguchi pada awalnya digunakan hanya untuk kasus respon tunggal (Jeyapaul dkk., 2006).

Jeyapaul dkk. (2006) melakukan penelitian untuk mengetahui faktor yang berpengaruh dalam eksperimen Taguchi untuk kasus multirespon dengan *analysis of variance* (ANOVA). Penentuan faktor berpengaruh, dilakukan dengan memisahkan variansi total dari normalisasi *signal to noise ratio* (*S/N ratio*) semua respon, dengan menghitung jumlah kuadrat deviasi dari total *S/N ratio* yang berkontribusi terhadap masing-masing parameter proses dan *error*-nya.

Beberapa pendekatan optimisasi multirespon Taguchi yang sudah dilakukan meliputi *PCA* (*principal component analysis*), *DEAR* (*Data envelopment analysis based ranking approach*) dan *Genetic Alghorithm* (GA). Analisis komponen utama atau *PCA* adalah suatu metode yang melibatkan prosedur matematika yang mengubah dan

mentransformasikan sejumlah besar variabel yang berkorelasi menjadi sejumlah kecil variabel yang tidak berkorelasi, dan kemudian digunakan untuk memecahkan kasus multirespon.

Penelitian yang menggunakan pendekatan *PCA* antara lain dilakukan oleh Khandey (2009) yang melakukan penelitian multi respon menggunakan *PCA* untuk optimisasi multi respon pada proses *turning*. Routara dkk. (2010) menggunakan pendekatan *PCA* untuk menyelesaikan masalah optimisasi dengan respon persyaratan kualitas permukaan logam tertentu pada proses grinding dengan memperhatikan empat parameter pengukuran yang meliputi rata-rata, *root mean square roughness*, kurtosis, dan *mean line peak spacing*. Kelemahan *PCA* adalah ketika komponen utama yang terpilih memiliki variansi yang lebih kecil, komponen tersebut dipertanyakan kemampuannya dalam menjelaskan total variansi yang ada.

Pendekatan *DEAR* merupakan pendekatan yang digunakan untuk menentukan level faktor optimal dengan bobot untuk membantu dalam pengambilan keputusan. Sedangkan GA digunakan dalam metode Taguchi untuk menghasilkan bobot *S/N ratio* dari masing-masing respon. Jumlah dari bobot *S/N ratio* digunakan untuk menentukan level faktor yang optimal.

Al-Refaie, dkk. (2010) mengusulkan pendekatan yang lebih sederhana dan efektif jika dibandingkan dengan pendekatan *PCA*, *DEAR* dan *Genetic Alghorithm*. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian tersebut tidak hanya mengurangi kompleksitas dan analisis data statistik, tetapi juga dalam hal estimasi bobot. Pendekatan tersebut juga mengurangi keterlibatan manusia dalam proses pengambilan keputusan dalam penentuan nilai bobot masing-masing respon.

Selain metode Taguchi, *Response Surface Methodology* (RSM) juga merupakan metode optimisasi proses, baik untuk *single respon* maupun untuk kasus multirespon. RSM adalah sekumpulan teknik matematik dan statistik yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis respon yang dipengaruhi oleh beberapa variabel prediktor (Montgomery, 2001). Pada penelitian ini, RSM digunakan untuk mengetahui hubungan antara respon dengan sekumpulan variabel prediktor dalam eksperimen untuk mendapatkan *setting* level optimal responnya. Desain dari model tersebut biasanya dinyatakan dalam sebuah grafik atau kontur untuk memperjelas permukaan respon dalam optimisasi proses.

2. BAHAN DAN METODE

Subbab ini menjelaskan bahan dan metode yang digunakan dalam penelitian.

2.1 Benda Uji

Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen pembuatan lapisan atas *paving block* dengan memanfaatkan limbah lumpur IPAL PDAM Semanggi Solo. Spesimen uji dibuat berukuran 50mm x 50mm x 50mm.

2.2 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1940, merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses yang secara bersamaan dapat menekan biaya. Metode Taguchi berupaya mencapai tujuan tersebut dengan menjadikan produk atau proses *robust* terhadap *noise* dengan berbagai faktor seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja, dan kondisi-kondisi operasional lainnya.

Metode Taguchi menggunakan seperangkat matriks khusus yang disebut *orthogonal array*. Matriks standar ini merupakan langkah untuk menentukan jumlah percobaan minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin tentang semua faktor yang mempengaruhi parameter. Dalam metode Taguchi, *orthogonal array* digunakan sebagai dasar dalam merancang sebuah eksperimen.

Taguchi memperkenalkan *signal to noise (S/N) ratio* untuk meneliti pengaruh faktor *noise* terhadap variasi. Tujuan metode Taguchi adalah menghasilkan kombinasi faktor-faktor terkendali yang *robust* terhadap faktor *noise* sehingga tidak menimbulkan variabilitas yang besar. Selanjutnya, ANOVA digunakan untuk mengetahui parameter proses yang berpengaruh terhadap respon. Dengan *S/N ratio* dan analisis ANOVA akan diperoleh parameter proses yang optimal dalam menghasilkan respon tertentu.

2.3 Response Surface Methodology

Langkah awal dalam RSM adalah menentukan fungsi *response surface* yang menghubungkan parameter proses atau variabel terhadap respon yang diinginkan. Untuk mendapatkan persamaan *response surface*, beberapa rancangan atau model dirumuskan dengan menggunakan eksperimen. Dalam RSM terdapat dua persamaan dasar, yaitu persamaan order pertama dan kedua seperti dinyatakan masing-masing pada persamaan (1) dan (2).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

Setelah diperoleh persamaan *response surface*, persamaan tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kondisi optimal respon berdasarkan setting parameter proses yang ada. Dengan bantuan grafik *response surface*, dapat diketahui puncak permukaan respon yang merupakan kondisi *setting* optimal dari parameter-parameter prosesnya. Dalam penelitian ini, penentuan *setting* level optimal didasarkan pada fungsi *desirability* dengan fungsi objektif dari 0 batas terluar sampai 1 pada tujuannya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dijelaskan hasil eksperimen dan analisis terhadap hasil penelitian.

3.1 Pengumpulan Data

Data diperoleh berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan. Adapun *setting* level faktor eksperimen dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1. Faktor-faktor terkendali pada tabel tersebut dikombinasikan dengan faktor tak terkendali yaitu faktor suhu perawatan yang terdiri dari dua level perlakuan yaitu pada suhu kamar dengan rentang suhu antara 26-30°C dan suhu luar antara 31-37°C (siang hari). Matriks *orthogonal array* $L_9(3^4)$ dipilih sebagai dasar rancangan eksperimen sebagaimana terlihat pada Tabel 2.

Hasil eksperimen pengujian kuat tekan untuk *paving block* perlakuan pertama (A1, B1 dan C1) pada suhu kamar diperoleh nilai kuat tekan 15,5 MPa dengan gaya tekan maksimum 38.808 N pada luas permukaan 0,0025 m². Untuk pengujian serapan air terhadap *paving block* yang dirawat pada suhu luar untuk perlakuan pertama, diperoleh nilai serapan air 5,458%, dengan berat *paving block* kondisi basah 276,3 gram dan berat kering oven (105°C) 262 gram. Pengujian keausan dilakukan menggunakan kertas abrasif No.220 dengan pembebanan 0,5 kg. prinsip pengujian keausan adalah dengan menggesekkan spesimen pada piringan berputar dimana pada piringan tersebut dipasang amplas/kertas abrasif. Hasil

penimbangan berat awal sebelum pengausan untuk eksperimen ke 3 kondisi suhu kamar sebesar 258,8 gr dan berat setelah pengausan 256,6 gr. Dengan demikian diperoleh laju keausan *paving block* yang di aus selama 5 menit

sebesar 0,088 mm/menit. Secara lengkap, hasil eksperimen pengujian kuat tekan, daya serap air, dan laju keausan berturut-turut disajikan dalam Tabel 3, 4, dan 5.

Tabel 1 *Setting Level Faktor Terkendali*

Kode	Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
A	Ukuran maksimum agregat	3 mm	5 mm	10 mm
B	Faktor air semen	0,3	0,35	0,4
C	Persentase lumpur IPAL PDAM	10 %	15 %	20 %

Tabel 2 Matriks Ortogonal *Inner Array* dan *Outer Array* (Peace, 1992)

Run	Inner control factor array			Outer noise array	
	A	B	C	Level 1	Level 2
1	1	1	1	Experiment Data	
2	1	2	2		
3	1	3	3		
4	2	1	2		
5	2	2	3		
6	2	3	1		
7	3	1	3		
8	3	2	1		
9	3	3	2		

Tabel 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan *Paving Block*

No	Suhu Kamar		Kuat Tekan (MPa)	No	Suhu Kamar		Kuat Tekan (MPa)
	P Maks (N)	A (m ²)			P Maks (N)	A (m ²)	
1	38808	0.0025	15.5	1	34355.1	0.0025	13.7420
2	70963.1	0.0025	7.4	2	22876.7	0.0025	9.1507
3	17638.8	0.0025	7.1	3	16124.8	0.0025	6.4499
4	20384	0.0025	8.2	4	20776	0.0025	8.3104
5	19645	0.0025	7.9	5	20873.8	0.0025	8.3495
6	33373.6	0.0025	13.3	6	33479.5	0.0025	13.3918
7	19736.9	0.0025	7.9	7	18228	0.0025	7.2912
8	30043.5	0.0025	12.0	8	29239.1	0.0025	11.6956
9	20486.8	0.0025	8.2	9	27729.3	0.0025	11.0917

Tabel 4 Hasil Pengujian Penyerapan Air *Paving Block*

No	Suhu Kamar		Penyerapan Air (%)	No	Suhu Kamar		Penyerapan Air (%)
	Berat Basah	Berat Kering			Berat Basah	Berat Basah	
1	275.4	267.5	2.953	1	276.3	262	5.459
2	263.9	256.5	2.885	2	272.8	259.6	5.085
3	261.9	250.7	4.467	3	260.8	246.9	5.630
4	260.1	248.7	4.584	4	271.9	258.1	5.347
5	267.7	257.1	3.719	5	275.4	263.4	4.556
6	265.6	255.7	3.872	6	268.6	255.3	5.210
7	270.1	262.2	3.013	7	270.4	256	5.625
8	269.6	260.7	3.414	8	278.2	265.7	4.705
9	249.1	236.1	5.506	9	259.3	244.5	6.053

Tabel 5 Hasil Pengujian Keausan *Paving Block*

No	Suhu Kamar				No	Suhu Kamar			
	Berat Awal (gr)	Berat Setelah Pengausan (gr)	Berat Jenis (gr/mm ³)	Laju Keausan (mm/menit)		Berat Awal (gr)	Berat Setelah Pengausan (gr)	Berat Jenis (gr/mm ³)	Laju Keausan (mm/menit)
1	271.3	270	0.00214	0.049	1	273.3	272.2	0.00210	0.042
2	262.7	260.7	0.00205	0.078	2	267.4	266.1	0.00208	0.050

No	Suhu Kamar				No	Suhu Kamar			
	Berat Awal (gr)	Berat Setelah Pengausan (gr)	Berat Jenis (gr/mm ³)	Laju Keausan (mm/menit)		Berat Awal (gr)	Berat Setelah Pengausan (gr)	Berat Jenis (gr/mm ³)	Laju Keausan (mm/menit)
3	258.8	256.6	0.00201	0.088	3	254.8	253.3	0.00198	0.061
4	257.2	255.1	0.00199	0.084	4	266.5	265.3	0.00206	0.046
5	262.2	260.9	0.00206	0.050	5	270.7	269	0.00211	0.065
6	262.1	261.1	0.00205	0.039	6	263.4	261.7	0.00204	0.067
7	267.3	265.1	0.00210	0.084	7	266.8	264.9	0.00205	0.074
8	264.7	263.4	0.00209	0.050	8	276.2	274.4	0.00213	0.068
9	244.1	242.2	0.00189	0.080	9	253.9	252.4	0.00196	0.061

3.2 Pengolahan Data

Dari hasil eksperimen, dilakukan pengolahan data untuk menentukan variabel yang berpengaruh menggunakan ANOVA dan menentukan setting optimal terhadap variabel tersebut menggunakan metode Taguchi dan RSM. Dalam uji ANOVA multirespon, digunakan pendekatan yang dikembangkan oleh Jeyapaul dkk. (2006).

3.2.1 Penentuan Faktor Berpengaruh

ANOVA digunakan untuk menentukan variable-variabel yang berpengaruh signifikan terhadap ketiga respon. Dalam penelitian ini digunakan persamaan (3) dan (4) untuk menghitung S/N ratio, masing-masing untuk karakteristik kualitas *larger the better* dan *smaller the better*. Pada kedua persamaan tersebut, y_{ij} menyatakan nilai S/N ratio eksperimen ke- i untuk respon ke- j sedangkan Z_{ij} menyatakan nilai normalisasi S/N ratio

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n)}{\max(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n) - \min(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n)} \quad (3)$$

$$Z_{ij} = \frac{\max(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n) - y_{ij}}{\max(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n) - \min(y_{ij}, i=1,2,3 \dots n)} \quad (4)$$

Hasil perhitungan normalisasi S/N ratio terhadap ketiga respon dapat dilihat pada Tabel 6. Pada tabel tersebut, untuk respon kuat tekan pada perlakuan eksperimen ke-2 dengan menggunakan persamaan (3) diperoleh nilai 0,269. Sedangkan persamaan (4) digunakan untuk respon serapan air dan laju keausan diperoleh nilai masing-masing 0,017 dan 0,659 dengan hasil total nilai normalisasi untuk perlakuan ke-2 adalah 0,944. Setelah diperoleh total normalisasi secara keseluruhan untuk masing-masing perlakuan, dilakukan perhitungan nilai rata-rata normalisasi yang dikontribusikan ke masing-masing level dan faktor. Dalam Tabel 6 pada kolom *main effects on sum of normalized* diperoleh hasil perhitungan rata-rata normalisasi untuk level 1 faktor 1 yaitu sebesar 1,223.

Hasil perhitungan normalisasi pada Tabel 6 digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis terhadap variansi hasil eksperimen. Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai rasio F lebih besar dari F tabel untuk ketiga faktor terkendali. Hal ini menunjukkan bahwa faktor A, B, dan C berpengaruh terhadap ketiga respon yang dieksperimentasikan dalam penelitian ini. Adapun hasil perhitungan ANOVA dapat dilihat pada Tabel 7. Dari tabel tersebut juga dapat dilihat bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap respon adalah faktor B. Hal ini dapat dilihat dari nilai kontribusinya yang sebesar 63,35%.

Tabel 6 Normalisasi Nilai S/N Ratio

Run Eksperimen	S/N Ratio			Normalized Value of S/N Ratio			Sum of Normalized Values
	Kuat Tekan	Serapan Air	Laju Keausan	Kuat Tekan	Serapan Air	Laju Keausan	
1	35.875	-6.314	33.389	1.000	0.191	0.000	1.191
2	30.957	-5.795	30.204	0.269	0.017	0.659	0.944
3	29.151	-7.589	28.977	0.000	0.621	0.913	1.534
4	30.863	-7.412	29.862	0.255	0.561	0.730	1.546
5	30.730	-5.847	31.280	0.235	0.034	0.436	0.706
6	35.076	-6.703	31.787	0.881	0.323	0.331	1.535
7	30.168	-6.556	28.556	0.151	0.273	1.000	1.424
8	34.033	-5.745	31.045	0.726	0.000	0.485	1.211
9	32.334	-8.716	39.439	0.473	1.000	0.817	2.291
Main effects on sum of normalized value			A	B		C	

Run Eksperimen	S/N Ratio			Normalized Value of S/N Ratio			Sum of Normalized Values
	Kuat Tekan	Serapan Air	Laju Keausan	Kuat Tekan	Serapan Air	Laju Keausan	
Level 1			1.223		1.387		1.313
Level 2			1.262		0.954		1.594
Level 3			1.642		1.786		1.221

Tabel 7 Hasil Perhitungan ANOVA

Faktor	df	Sq	MSq	F-ratio	F-Tabel	Sq'	% contribution
A	2	0.321112	0.160556	17.983955	8.94054512	0.30325647	18.78%
B	2	1.040815	0.520408	58.291112	8.94054512	1.02295959	63.35%
C	2	0.226185	0.113093	12.667561	8.94054512	0.020832977	12.90%
Error	3	0.0026783	0.008928			0.08034960	4.98%
Total	9	18.648962					100%

3.2.2 Optimisasi *Setting Level*

Optimisasi *setting level* dalam penelitian ini dilakukan dengan dua metode, yaitu Taguchi dan RSM.

1. Metode *Taguchi*

Optimisasi *setting level* dengan pendekatan yang dilakukan Al-Refaie, dkk. (2010) merupakan suatu usulan dengan pendekatan yang lebih sederhana dan efektif untuk pemecahan kasus multirespon di dalam metode Taguchi. Dasar ide pendekatan ini adalah rata-rata *S/N Ratio* untuk masing-masing faktor level dari masing-masing respon dengan pembobotan pada *S/N Ratio* terbesar dari faktor tersebut. Kemudian hasil dari pembobotan seluruh respon digunakan dalam menentukan level faktor optimal. Langkah-langkah usulan Al-Refaie dkk. (2010) yang digunakan dalam penelitian ini untuk pemecahan masalah multirespon adalah sebagai berikut:

1. Hitung nilai *S/N ratio* (η) untuk semua respon. Terdapat beberapa jenis *S/N ratio* yang tergantung pada karakteristik kualitas yang diinginkan. *S/N ratio* yang dianalisis dalam penelitian ini, yaitu:

a) Nilai *smaller the better* (STB) untuk respon kuat tekan sebagai berikut:

$$S/N_{stb} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum x_i^2 \right] \quad (5)$$

b) Nilai *larger the better* (LTB) untuk respon serapan air dan laju keausan sebagai berikut:

$$S/N_{lb} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y} \right] \quad (6)$$

2. Hitung nilai rata-rata *S/N ratio* (η) dari masing-masing level faktor semua respon.

3. Hitung nilai w_{ijk} (*weight*) level k untuk faktor i dari respon j .

a) Untuk karakteristik kualitas STB

$$w_{ijk} = \frac{\max_k \bar{\eta}_{jk}}{\bar{\eta}_{jk}} \quad (7)$$

b) Untuk karakteristik kualitas LTB

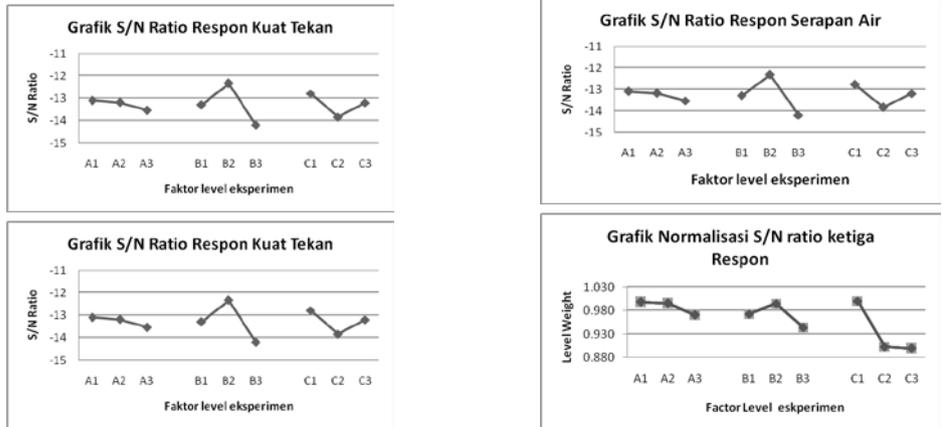
$$w_{ijk} = \frac{\bar{\eta}_{jk}}{\max_k \bar{\eta}_{jk}} \quad (8)$$

Hasil terbesar dari rata-rata nilai w_{ijk} menunjukkan kinerja yang lebih baik sehingga merupakan nilai *setting level* optimal dari respon-respon yang ada. Hasil perhitungan rata-rata nilai w ditunjukkan dalam Tabel 8 pada kolom *level weight*. Nilai terbesar untuk masing-masing faktor adalah faktor A level 2, B level 2 dan C pada level 1. Grafik yang menunjukkan nilai *S/N ratio* setiap level faktor untuk masing-masing respon dapat dilihat pada Gambar 1

Tabel 8 Bobot Level Faktor Masing-Masing Level

Response	Faktor			
	Level	A	B	C
Kuat Tekan	1	0.991	1.000	1.000
	2	1.000	0.985	0.873
	3	0.998	0.996	0.825
Serapan Air	1	1.000	0.927	1.000
	2	0.993	1.000	0.924
	3	0.968	0.868	0.969

Laju Keausan	1	0.995	0.990	1.000
	2	1.000	1.000	0.912
	3	0.947	0.968	0.903
Level Weights	1	0.995	0.973	1.000
	2	0.998	0.995	0.903
	3	0.971	0.911	0.899



Gambar 1 Grafik S/N Ratio Untuk Masing - Masing Parameter Proses

2. *Response Surface Methodology*

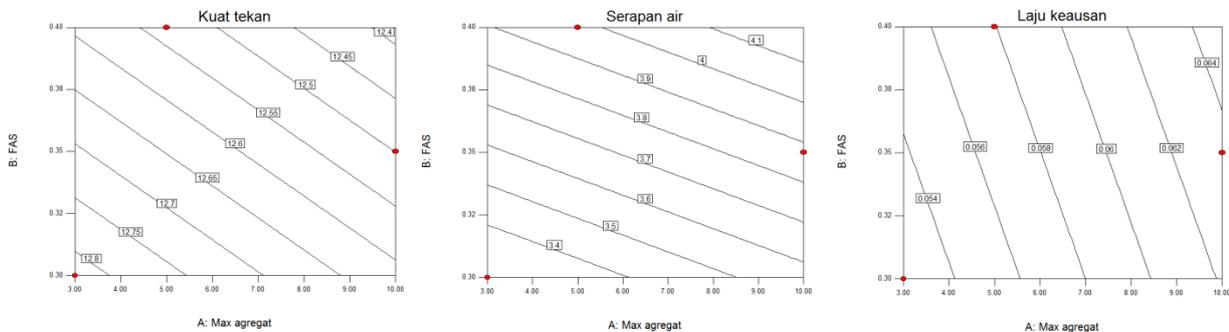
Model persamaan *response Surface* untuk masing-masing respon dalam penentuan *setting* level optimal diturunkan dengan bantuan perangkat lunak *Design Expert*. Dengan memasukkan data eksperimen beserta perlakuan dan hasil untuk ketiga respon, dilakukan analisis untuk memodelkan persamaan permukaan responnya dengan melihat hasil output untuk *fitting response model* dalam *Design Expert*. Adapun hasil model persamaan *response surface* untuk masing-masing respon adalah sebagai berikut:

$$Y_{kuat\ tekan} = 19.52 - 0.03A - 2.3B - 0.58C + 0.11D \tag{9}$$

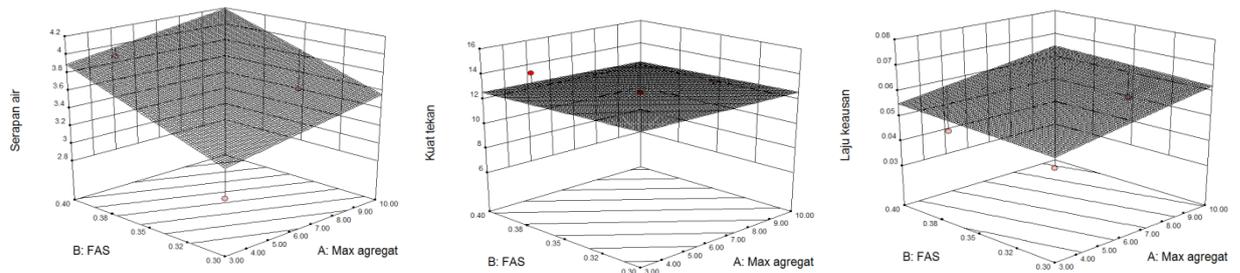
$$Y_{serapan\ air} = 1.77 + 0.042A + 6.26 B + 0.023C + 0,74D \tag{10}$$

$$Y_{Laju\ keausan} = 0,018 + 0,001393A + 0,027B + 0,001794C - 0,003919D \tag{11}$$

Untuk membantu secara visual dalam menganalisis model, dibuat *contour plot* dan *response surface plot* seperti terlihat pada Gambar 2 dan 3. Gambar 2 menunjukkan *contour plot* sedangkan Gambar 3 menunjukkan *response surface plot* untuk masing-masing respon dari hasil model yang dikembangkan terhadap berbagai rentang perubahan pada level faktor air semen dan maksimum agregat pada penambahan lumpur 10% dalam kondisi suhu kamar (26-30°C).



Gambar 2 *Contour Plot*



Gambar 3 *Response Surface Plot*

Dilihat dari hasil *fitting* respon model yang dikembangkan, secara individu nilai *setting* level optimal untuk respon kuat tekan yaitu pada kondisi ukuran maksimum

Agregat 3mm, faktor air semen 0,3%, dan lumpur IPAL PDAM yang digunakan sebesar 10%. Meskipun demikian, *setting* level tersebut belum dapat dijadikan sebagai parameter optimal, karena belum diuji secara statistik untuk ketiga karakteristik kualitas.

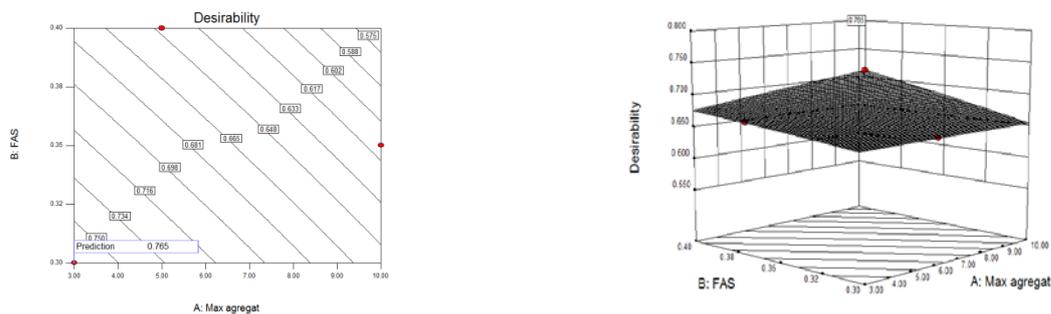
Desirability merupakan sebuah metode multirespon dengan fungsi objektif dari 0 batas terluar sampai 1 pada tujuannya. Beberapa respon dan faktor level secara keseluruhan dikombinasikan ke dalam satu fungsi *desirability*, $D(x)$ menggunakan persamaan (12)

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

Untuk optimisasi, persamaan (3) dan (4) digunakan untuk menghitung nilai d_1, d_2, \dots, d_n .

Masing-masing respon harus memiliki nilai tinggi dan rendah dengan nilai tujuan maksimum, minimum, target atau dalam rentang tertentu. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menyatakan parameter tujuan respon ke dalam nilai antara 0 sampai 1.

Fungsi *desirability* dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Design Expert*. Dari perangkat lunak tersebut diperoleh 56 solusi dengan kombinasi ketiga respon beserta *setting* level faktornya. Nilai *desirability* optimal diperoleh dari faktor maksimum agregat yang lolos ayakan 3 mm, faktor air semen yang digunakan 0,3 % dari berat semen, dengan substitusi lumpur IPAL PDAM sebanyak 10% pada suhu perawatan 26-30°C. Gambar 4 menunjukkan grafik fungsi *desirability* untuk memperjelas berbagai rentang kombinasi level faktor yang menghasilkan nilai respon berdasarkan model yang dikembangkan.



Gambar 4 Fungsi *Desirability*

3.2.3 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membuktikan kinerja hasil eksperimen pada kondisi optimal untuk level-level faktor dalam eksperimen. Jika hasil eksperimen konfirmasi membuktikan kinerja *setting* level faktor optimal, maka kondisi optimum dapat diterapkan dalam proses yang sebenarnya.

Eksperimen konfirmasi dalam penelitian ini dilakukan dengan *setting* parameter faktor optimal hasil metode Taguchi, yaitu pada ukuran

maksimum agregat yang lolos ayakan 3 mm, faktor air semen yang digunakan sebesar 0,35%, dan lumpur yang digunakan sebesar 10% dari berat semen dengan replikasi sebanyak tiga kali.

Peningkatan *S/N ratio* dan pergeseran dari nilai rata-rata prediksi dengan nilai aktual yang kecil merupakan tujuan atau keinginan yang menunjukkan adanya peningkatan kinerja dari parameter suatu proses yang dieksperimentasikan. Tabel 9 menunjukkan hasil peningkatan

pergeseran nilai rata-rata dan *S/N ratio* terhadap kondisi aktual eksperimen konfirmasi dari parameter prediksi optimal karakteristik kualitas *paving block* yaitu sebesar 5% dan 19,59%.

Tabel 9 Hasil Eksperimen Konfirmasi

Respon	Aktual (Mean)	Prediksi (Mean)	Aktual (SN)	Prediksi (SN)	Improvement	
					Mean	SN Ratio
Kuat Tekan	12.4003	10.4591	31.420	28.462	1.941	2.958
Serapan Air	4.6727	4.3481	-13.431	-12.737	0.325	-0.693
Laju Keausan	0.0499	0.0586	26.029	24.725	-0.009	1.304
Total improvement					5%	19.59%

Selain itu, eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membuktikan kecukupan dari model yang sudah dikembangkan. Kecukupan model dibuktikan dengan nilai residual yang merupakan hasil pengurangan nilai hasil eksperimen konfirmasi dengan nilai prediksi model *respon surface*. Semakin kecil nilai residual yang dihasilkan, semakin akurat model *respon surface* yang dikembangkan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai persentase *error* yang

terjadi dalam eksperimen konfirmasi, antara prediksi dengan hasil aktual yang diperoleh memiliki nilai rentang yang relatif kecil.

Adapun nilai rentang tersebut dapat dilihat pada Tabel.10 dengan rentang *error* antara -8.22 sampai 8.50%. Hal ini membuktikan bahwa model yang diprediksi memiliki tingkat akurasi yang baik dengan $\pm 8.5\%$ dari nilai aktualnya.

Tabel 10 Hasil Perhitungan Nilai Residual Eksperimen Konfirmasi

Respon	Aktual	Prediksi (RSM model)	Residual	Error
Kuat Tekan	12.4003	12.935	-0.535	-4.31
Serapan Air	4.6727	5.057	-0.384	-8.22
Laju Keausan	0.0499	0.04565	0.004	8-50

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan, faktor terkendali yang meliputi faktor maksimum agregat, faktor air semen dan faktor persentase lumpur IPAL PDAM Semanggi Solo berpengaruh terhadap ketiga karakteristik kualitas lapisan atas *paving block*.

Nilai *setting level* optimal dengan metode Taguchi pada kondisi faktor ukuran maksimum agregat 3 mm dan jumlah persentase lumpur yang digunakan sebesar 10% serta faktor air semen yang digunakan sebesar 0,35. Sedangkan pada metode *response surface*, *setting level* optimal pada saat kondisi faktor ukuran maksimum agregat 3 mm dan jumlah persentase lumpur yang digunakan sebesar 10% serta faktor air semen yang digunakan sebesar 0,3. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada penentuan setting optimal faktor air semen yang dalam penelitian ini diperoleh rentang 0,3 sampai 0,35 dari berat semen yang digunakan.

Dilihat dari segi hasil eksperimen dalam penelitian ini, pembuatan *paving block* dengan campuran lumpur IPAL PDAM Semanggi Solo

dapat menghasilkan *paving block* dengan kekuatan tekan kualitas C Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 03-0691-1996 dan kualitas A dalam hal daya serap air dan laju keausan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Refaie A., Wu, T-H., dan Li, M-H. (2010) An Effective for Solving the Multi-reponse Problem in Taguchi Method. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* Volume 4 number 2 pp. 314-323.
- Jeyapaul, R., Shahabudeen, P. dan Krishnaiah, K. (2006) Simultaneous Optimization of Multi-response Problems in the Taguchi Method using Genetic Algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Khandey, U. (2009) *Optimization of Surface Roughness, Material Removal Rate and Cutting Tool Flank Wear in Turning Using Extended Taguchi Approach*, Master Thesis, National Institute of Technology India.

- Montgomery, D. C. (2001) *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Routara, B. C., Mohanty S. D., Datta, S., Bandyopadhyay A., dan Mahapatra, S. S. (2010) Combined Quality Loss (CQL) Concept in WPCA-Based Taguchi Philosophy for Optimization of Multiple Surface Quality Characteristics of UNS C34000 Brass in Cylindrical Grinding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Peace, G. S. (1992) *Taguchi Method: A Hand-on Approach*. Addison-Wesley, New York.
- Standard Nasional Indonesia (SNI) Nomor 03-0691-1996. *Bata Beton (Paving Block)*. Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Susilowati, H. (2005) *Solidifikasi sebagai Alternatif Penanganan Limbah Instalasi Pengolahan Air Limbah Bojongsoang Kabupaten Bandung*. Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Lingkungan ITB