



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN KUALITAS AIR DENGAN PEMANFAATAN
LUMPUR ALUM SEBAGAI KOAGULAN PADA PROSES
PENGOLAHAN AIR MINUM MENGGUNAKAN *RESPONSE
SURFACE METHOD***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ZUANASTIA
0706201393**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Zuanastia
NPM : 0706201393
Tanda Tangan :
Tanggal : Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Zuanastia
NPM : 0706201393
Program Studi : Teknik Industri
Judul Skripsi : Peningkatan Kualitas Air Dengan Pemanfaatan Lumpur Alum Sebagai Koagulan Pada Proses Pengolahan Air Minum Menggunakan *Response Surface Method*.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana S1 pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Isti Surjandari, Ph.D ()
Penguji : Farizal, Ph.D ()
Penguji : Ir. Boy Nurtjahyo M., MSIE ()
Penguji : Ir. Rahmat Nurcahyo, MEngSc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Desember 2009

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Industri pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Ir. Isti Surjandari, Ph.D, selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu memberikan kepercayaan, semangat setiap saat, bimbingan, dan bantuan yang luar biasa.
2. Ibu Ir. Fauzia Dianawati, MSc, selaku pembimbing akademis.
3. Bapak Ir. M. Dachyar, MSc, bapak Ir. Boy Nurtjahyo M., MSIE, dan ibu Arian Dhini, ST, MT atas semua masukan dan sarannya selama masa seminar.
4. Segenap jajaran dosen Departemen Teknik Industri yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan.
5. Bagian Administrasi Departemen Teknik Industri (Mas Dody, Mba Fatimah, Mas Santo) yang selalu membantu penulis dalam segala urusan administrasi.
6. Keluarga penulis (Ibu, Ayah dan adikku Risma) atas doa yang tidak pernah putus, semangat, perhatian dan kasih sayang tulus tanpa pamrih.
7. Teman seperjuangan “The I Team” : Sandra, Fiqi, Reymon atas segala bantuan, masukan, hiburan, dan dorongan semangatnya kepada penulis
8. Teman-teman TI 2007 yang selalu memberikan keceriaan dan persahabatan selama masa perkuliahan
9. Teman-teman ‘*Blok Barat Team*’ : Mami, dan Abu, beserta penyelundupnya Vian, Weny dan Ulya yang selalu memberi semangat disaat tugas datang
10. Semua pihak yang membantu memberikan masukan kepada penulis : Tiwi (PDAM Pejompongan), Pak Udisubakti (ITS), Mbak Wifqi (ITS).

11. Teman seperjuangan Weny Liviana, untuk semangatnya kuliah Bangkalemba, Cilegon-salemba yang memberi banyak inspirasi bagi penulis, untuk ketersediaannya mendengarkan segala keluh kesah.
12. *The special one* Ulya Muflianto, untuk support yang luar biasa, waktunya, pengertian, perhatian, dan kasih sayangnya yang memberi warna dalam hidup penulis.
13. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, semoga Allah SWT membalas segala amal dan kebaikan yang diberikan kepada penulis dari semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu ke depannya.

Depok, Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Zuanastia
NPM : 0706201393
Program Studi : Teknik Industri
Departemen : Teknik Industri
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Peningkatan Kualitas Air dengan Pemanfaatan Lumpur Alum sebagai Koagulan pada Proses Pengolahan Air Minum Menggunakan *Response Surface Method*”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis / pencipta dan sebagai pemilih Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Desember 2009

Yang menyatakan

(Zuanastia)

ABSTRAK

Nama : Zuanastia
Program Studi : Teknik Industri
Judul Skripsi : Peningkatan Kualitas Air Dengan Pemanfaatan Lumpur Alum Sebagai Koagulan Pada Proses Pengolahan Air Minum Menggunakan *Response Surface Method*.

Sebagai hasil samping dari pengolahan air sungai menjadi air minum, dihasilkan lumpur endapan (lumpur alum) yang seringkali dibuang dan tidak dimanfaatkan kembali. Pembuangan lumpur alum oleh Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) ke sungai dapat menimbulkan masalah karena akumulasi aluminium di perairan dapat mencemari lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan. Sebagai upaya menjalankan proses produksi bersih dan efektifitas reduksi kekeruhan air, maka lumpur alum tersebut dimanfaatkan kembali sebagai zat koagulan pembantu, yaitu dengan cara diresirkulasikan kedalam unit koagulasi-flokulasi. Dengan pemanfaatan lumpur alum tersebut maka perlu diketahui kombinasi optimal dari faktor-faktor yang berpengaruh dalam proses untuk mencapai kekeruhan air minimum. Faktor-faktor tersebut adalah dosis koagulan, kecepatan putaran serta lama pengadukan. Untuk mengetahui kombinasi optimal dari faktor-faktor tersebut digunakan *Response surface Method* (RSM). Hasil dari penelitian ini dapat direkomendasikan kepada pengelola IPAM, bahwa kombinasi optimal untuk menghasilkan kekeruhan air terendah adalah pada 52% dosis tawas, 48% dosis resirkulasi lumpur alum dengan kecepatan putaran 91 rpm dan lama pengadukan 12 menit.

Kata kunci :
Proses koagulasi-flokulasi, 3^k factorial design, Steepest descent, Response surface method

ABSTRACT

Name : Zuanastia
Study Program : Industrial Engineering
Title : Improvement of water quality with alum recovery as coagulant at the water treatment process using response surface method

In processing river water to become drinking water has mud sediment as a side product, and usually it's only thrown away and never reused. Mud sediment banishment IPAM in the river shows a problem because aluminium accumulation causing pollute the environment and health disturbance. As an effort to run a clean production process and effectiveness of the reduction of water turbidity, so alum mud is reused as coagulant agent assistant by resirculation in coagulation-floculation unit. The use of alum mud, its necessary to know the optimal combination of factors that influence the process to achieve the minimum water turbidity. These factors are coagulant dose, speed of rotation and mixing time. To find the optimal combination of these factor are used response surface method (RSM). Result from this study can be recommended to the manager of IPAM, is that the optimal combination to produce the lowest water turbidity at 52% of the dose of alum, 48% of the those of alum mud with 91 rpm rotation speed and mixing time 12 minutes.

Keywords:

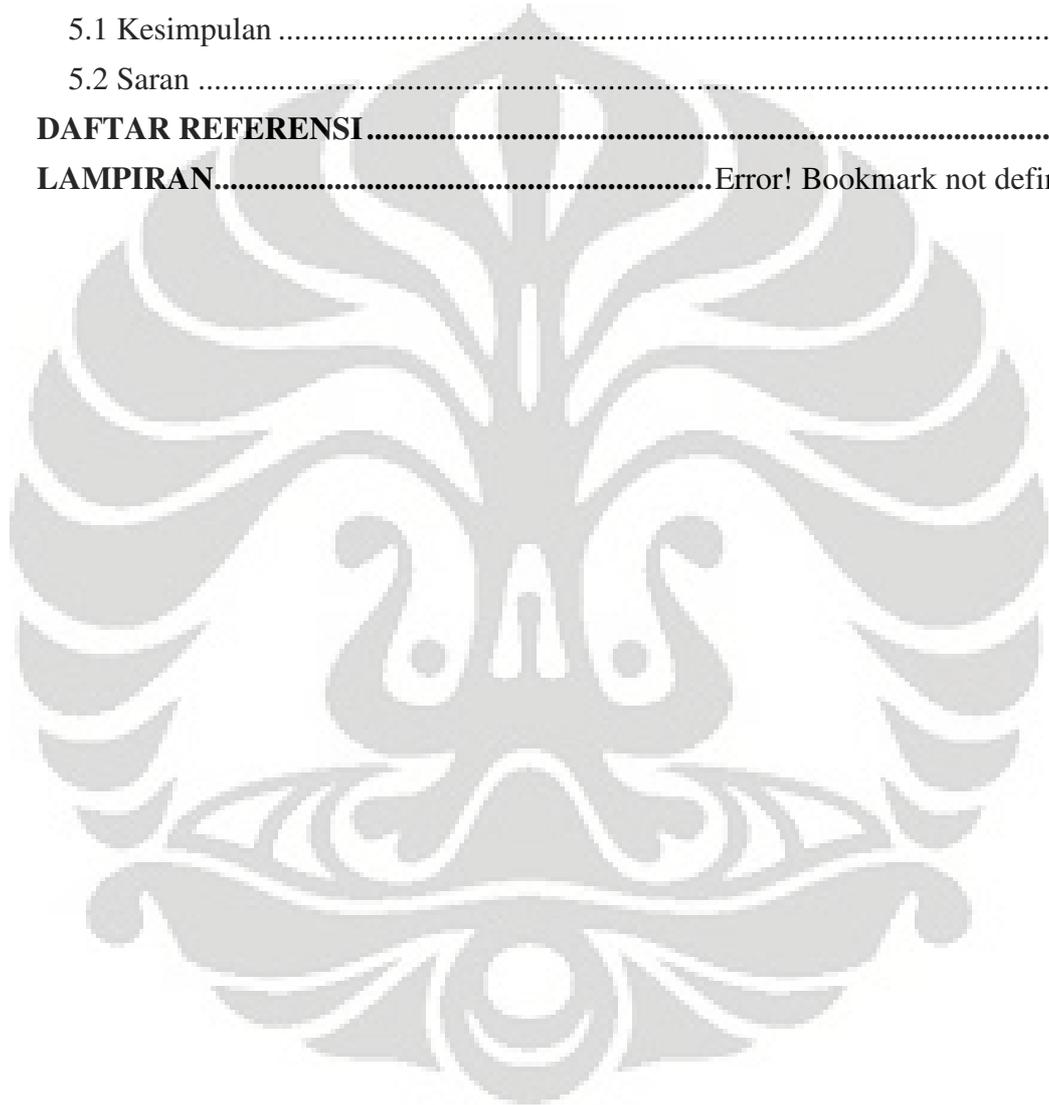
Coagulation-floculation process, 3^k factorial design, Steepest descent, Response surface method

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Diagram Keterkaitan Masalah	4
1.3 Perumusan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Asumsi dan Batasan Masalah	5
1.6 Metodologi Penelitian.....	6
1.7 Sistematika Penulisan	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Proses Pengolahan Air Minum	10
2.1.1 Screening	11
2.1.2 Prasedimentasi.....	11
2.1.3 Koagulasi	11
2.1.3.1 Koagulan.....	13
2.1.4 Flokulasi	14
2.1.5 Sedimentasi.....	15
2.1.6 Filtrasi.....	15
2.1.7 Desinfeksi	16
2.1.8 Klorinasi	17
2.1.9 Ozonisasi	18
2.1.10 Radiasi	19
2.1.11 Resorvoir	19

2.2. <i>Design Of Eksperimen</i> (DOE)	19
2.2.1. Sejarah Desain Eksperimen.....	19
2.2.2. Definisi Desain Eksperimen.....	20
2.2.3. Fungsi Desain Eksperimen.....	23
2.2.4. Istilah Dalam Desain Eksperimen	24
2.2.5. Parameter Dalam Desain Eksperimen	25
2.2.6. Beberapa Metode Percobaan	26
2.2.7. Langkah –langkah percobaan.....	28
2.2.8. Uji Hipotesis.....	29
2.2.9. <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	30
2.2.10. Pengujian Model.....	31
2.2.11. Metode 3^k <i>Factorial Design</i>	37
2.2.12. <i>Response Surface Method</i>	39
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	45
3.1. Profil Perusahaan	45
3.1.1. Gambaran Singkat IPAM	45
3.1.2. Kegiatan Usaha Perusahaan	46
3.1.3. Visi dan Misi Perusahaan	46
3.2. Perancangan dengan Metode <i>Design of Experiments</i> (DOE).....	47
3.2.1. Penentuan Faktor Terkontrol.....	47
3.2.2. Penentuan Level dari Faktor.....	48
3.2.3. Penentuan Variabel Respon.....	48
3.2.4. Perancangan dengan Metode <i>Design of Experiments</i> (DOE).....	49
3.2. Pengumpulan Data Eksperimen	49
3.3. Pengolahan Data	50
3.3.1. Penentuan Pengaruh Penggunaan <i>Single</i> Koagulan dan <i>Double</i> Koagulan.....	50
3.3.2. <i>Design Of Eksperimen</i> 3^k <i>Factorial Design</i>	55
3.3.3. <i>Response Surface Method</i>	60
BAB 4 PEMBAHASAN.....	75
4.1 Analisa ANOVA <i>Single</i> Koagulan vs <i>Double</i> Koagulan.....	75
4.1.1. Analisa Grafik Residual	75
4.1.2. Analisa Faktor dan Interaksinya	76
4.2 Analisa 3^k <i>Factorial Design</i>	77
4.2.1. Analisa Grafik Residual	77

4.2.2 Analisa Faktor dan Interaksinya.....	78
4.3 Analisa <i>Response Surface Method</i>	81
4.3.1. Analisa First Order Model.....	81
4.3.2. Analisa Steepest Descent.....	81
4.3.3. Analisa Second Order Model	82
4.3.4. Analisa Surface Plot dan Countour Plot.....	83
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR REFERENSI.....	87
LAMPIRAN.....	Error! Bookmark not defined.



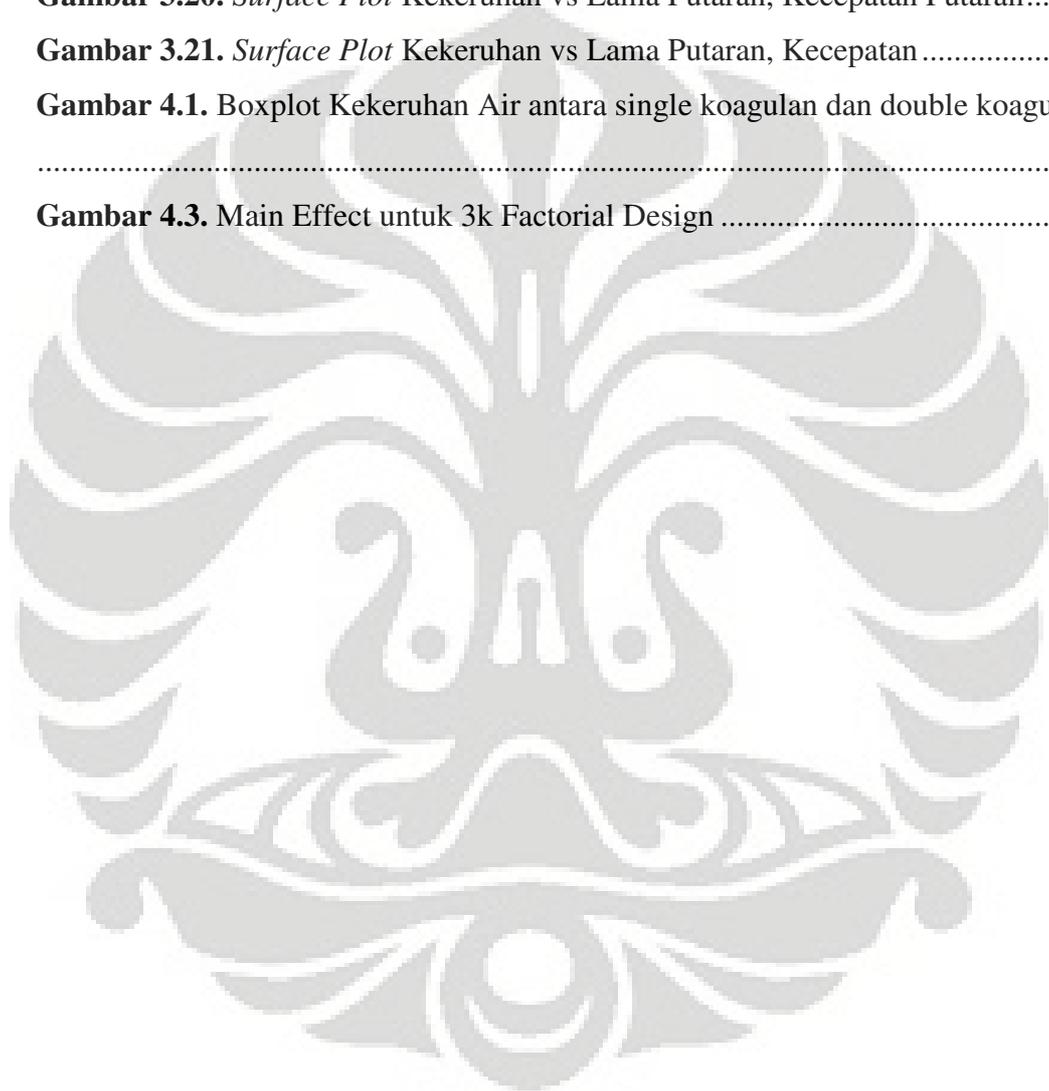
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Sebaran Potensi Air Permukaan dan Air Tanah di Indonesia	1
Tabel 2.1. Perhitungan Analisis Varians	31
Tabel 2.2. Tabel ANOVA untuk 3k Factorial Design.....	38
Tabel 3.1. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air	48
Tabel 3.2. Data Kekeruhan Air dengan Single Koagulan dan Double Koagulan	51
Tabel 3.3. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air	55
Tabel 3.4. Data Kekeruhan Air dengan 3 ^k Factorial.....	55
Tabel 3.5. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air (RSM)	61
Tabel.3.6. Data First Order Model (Box-Behnken Design).....	62
Tabel.3.7. Randomisasi First Order Model (Box-Behnken Design).....	62
Tabel 3.8. Hasil Percobaan Steepest Descent Kekeruhan Air.....	64
Tabel 3.9. Kode Level Nilai X1, X2 dan X3 Setelah Steepest Descent.....	65
Tabel 3.10. Data <i>Second First-Order</i> Model untuk Kekeruhan Air.	66
Tabel.3.11. Randomisasi Second First Order Model (Box-Behnken Design)	67
Tabel 3.12. Data Second Order Model.....	68
Tabel 4.1. Nilai P-Value 3 ^k Factorial Design	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Gambar proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air bersih ...	3
Gambar 1.2.	Diagram keterkaitan masalah	4
Gambar 1.3.	Diagram alir metodologi penelitian	7
Gambar 1.3.	Diagram alir metodologi penelitian (sambungan)	8
Gambar 2.1.	Skema Pengolahan Air Minum.....	10
Gambar 2.2.	Model Umum suatu Sistem	22
Gambar 2.3.	Grafik Residual Outliers	33
Gambar 2.4.	Grafik Residual dengan Pola Tersebar	33
Gambar 2.5.	Grafik Residual dengan Variasi Besar	34
Gambar 2.6.	Grafik Residual dari Distribusi Normal.....	34
Gambar 3.1.	Fish Bone Diagram Penyebab Kekeruhan Air Pada Proses Koagulasi-Flokulasi.....	47
Gambar 3.2.	Alat Jartest	50
Gambar 3.3.	Boxplot Kekeruhan Vs Dosis Koagulan.....	51
Gambar 3.4.	Grafik probability of the residual dan residual versus the order of data	52
Gambar 3.5.	Hasil Output Minitab 15 Terhadap Kekeruhan Vs Dosis Koagulan	52
Gambar 3.6.	Hasil Output Minitab 15 Uji Fisher Kekeruhan Vs Dosis Koagulan	53
Gambar 3.7.	Hasil Output Minitab Uji Turkey's Kekeruhan Vs Dosis Koagulan	54
Gambar 3.8.	Hasil Output Minitab Uji Hsu MSB Kekeruhan Vs Dosis Koagulan	54
Gambar 3.9.	Grafik probability of the residual dan residual versus the order of data	56
Gambar 3.9.	ANOVA 3 ^k Factorial Design	56
Gambar 3.11.	Main Effect untuk 3k Factorial Design	60
Gambar 3.12.	ANOVA First Order Model.....	63

Gambar 3.13 . Grafik Steepest Descent Kekeruhan Air.....	65
Gambar 3.14. ANOVA <i>Second First Order Model</i>	67
Gambar 3.15. ANOVA <i>Second Order Model</i>	69
Gambar 3.16. <i>Surface Plot</i> Kekeruhan vs Kecepatan Putaran, Dosis Koagulan	72
Gambar 3.18. <i>Surface Plot</i> Kekeruhan vs Lama Putaran, Dosis Koagulan	73
Gambar 3.19. <i>Countour Plot</i> Kekeruhan vs Lama Putaran, Dosis Koagulan	73
Gambar 3.20. <i>Surface Plot</i> Kekeruhan vs Lama Putaran, Kecepatan Putaran....	74
Gambar 3.21. <i>Surface Plot</i> Kekeruhan vs Lama Putaran, Kecepatan	74
Gambar 4.1. Boxplot Kekeruhan Air antara single koagulan dan double koagulan	77
Gambar 4.3. Main Effect untuk 3k Factorial Design	80



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Standar Kualitar Air Minum Bedasarkan PERMENKES 2002

Lampiran 2 : Tabel Distribusi F



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan unsur yang vital dalam kehidupan manusia. Seseorang tidak dapat bertahan hidup tanpa air, karena itulah air merupakan salah satu penopang hidup bagi manusia. Menurut laporan Kelompok Kerja Air Minum dan Kesehatan Lingkungan Indonesia, ketersediaan air di Pulau Jawa hanya 1.750 meter kubik per kapita per tahun pada tahun 2000, dan akan terus menurun hingga 1.200 meter kubik per kapita per tahun pada tahun 2020. Padahal standar kecukupan minimal 2.000 meter kubik per kapita per tahun¹. Penyediaan air bersih bagi masyarakat erat kaitannya dengan keluaran-keluaran kualitas pembangunan manusia, dan hubungannya dengan tingkat kesehatan masyarakat, serta secara tidak langsung dampaknya dengan pertumbuhan ekonomi. Namun, yang menjadi kendala sekarang adalah pengelolaan sumber daya air yang buruk yang mengakibatkan tidak meratanya penyebaran air. Sebaran potensi air di beberapa pulau di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.1 berikut.

Tabel 1.1. Sebaran Potensi Air Permukaan dan Air Tanah di Indonesia

Wilayah	Air Permukaan	Air Tanah
	Volume (m ³ /tahun)	Volume (m ³ /tahun)
Sumatera	-	1 milyar
Jawa	118 milyar	1,172 milyar
Kalimantan	557 milyar	830 Juta
Sulawesi	-	358 Juta
Irian	1,401 milyar	217 Juta
Wilayah Lain	-	1,123 Juta

(Sumber : Ditjen Pengairan PU,2007)

Dari bagan diatas, dapat dilihat bahwa volume air di udara yang jatuh sebagai hujan cukup berlimpah.

¹<http://digilibampl.net/detail/>

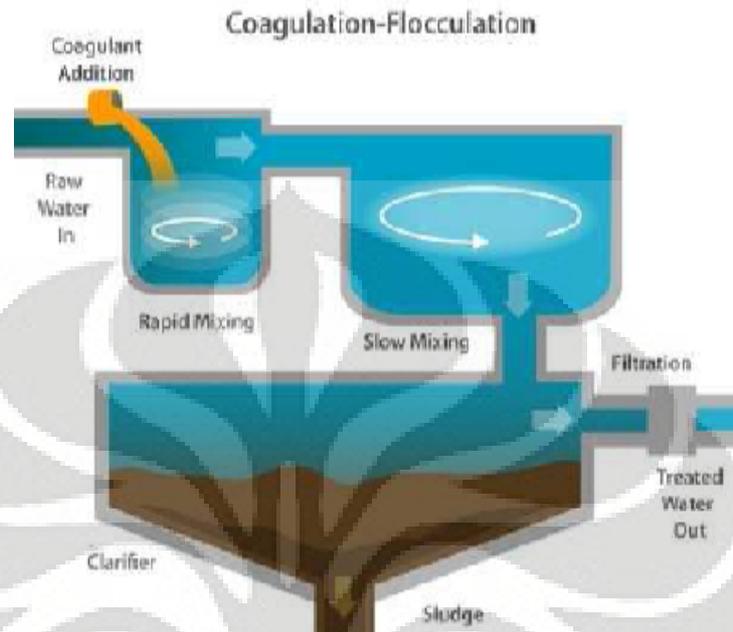
Namun ketika hujan mencapai bumi yang menjadi aliran mantap hanya 25% hampir tiga perempat terbuang percuma ke laut. Ini menunjukkan bahwa sumber daya air perlu dikelola dengan cara-cara yang benar.

Untuk dapat dikonsumsi oleh masyarakat, air yang diproduksi harus memenuhi standar kualitas yang telah ditentukan pemerintah. Oleh karena itu, perusahaan pengolah air minum harus melakukan proses produksi dengan baik. Salah satu proses produksi yang sangat penting adalah proses koagulasi-flokulasi, dimana proses ini berfungsi untuk menghilangkan bahan cemaran yang tersuspensi atau dalam bentuk koloid yang tidak dapat mengendap sendiri dan sulit ditangani oleh perlakuan fisik. Melalui proses koagulasi, kekokohan partikel koloid ditiadakan sehingga terbentuk flok-flok lembut yang kemudian dapat disatukan melalui proses flokulasi². Proses penggumpalan partikel tersuspensi ini membutuhkan bahan kimia sebagai koagulan. Koagulan yang dapat digunakan salah satunya adalah tawas (Al_2SO_4).

Sebagai hasil samping dari proses koagulasi flokulasi, biasanya dihasilkan lumpur endapan (lumpur alum) yang seringkali dibuang dan tidak dimanfaatkan kembali. Pembuangan lumpur endapan oleh instalasi pengolahan air minum kesungai seringkali menimbulkan masalah karena akumulasinya di perairan (termasuk akumulasi aluminium). Lewat proses rantai makanan, aluminium yang berbahaya tersebut dapat berpindah lewat hewan air sampai ke manusia kembali. Dan apabila aluminium tersebut berakumulasi di tubuh manusia akan menimbulkan gangguan kesehatan. Oleh sebab itu perlu dilakukan proses produksi bersih oleh instalasi pengolahan air bersih, agar tidak menghasilkan hasil samping limbah, Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) menjalankan salah satu dari prinsip 3 R (*Recycle, Reused, Recovery*). Dari hasil penelitian terdahulu ini bisa disimpulkan bahwa lumpur yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali sebagai Alum *recovery*, yaitu mengambil kembali unsur alum yang ada didalam lumpur untuk dipakai kembali sebagai koagulan.

² http://en.wikipedia.org/wiki/Water_purification

Berikut adalah gambar proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air minum.

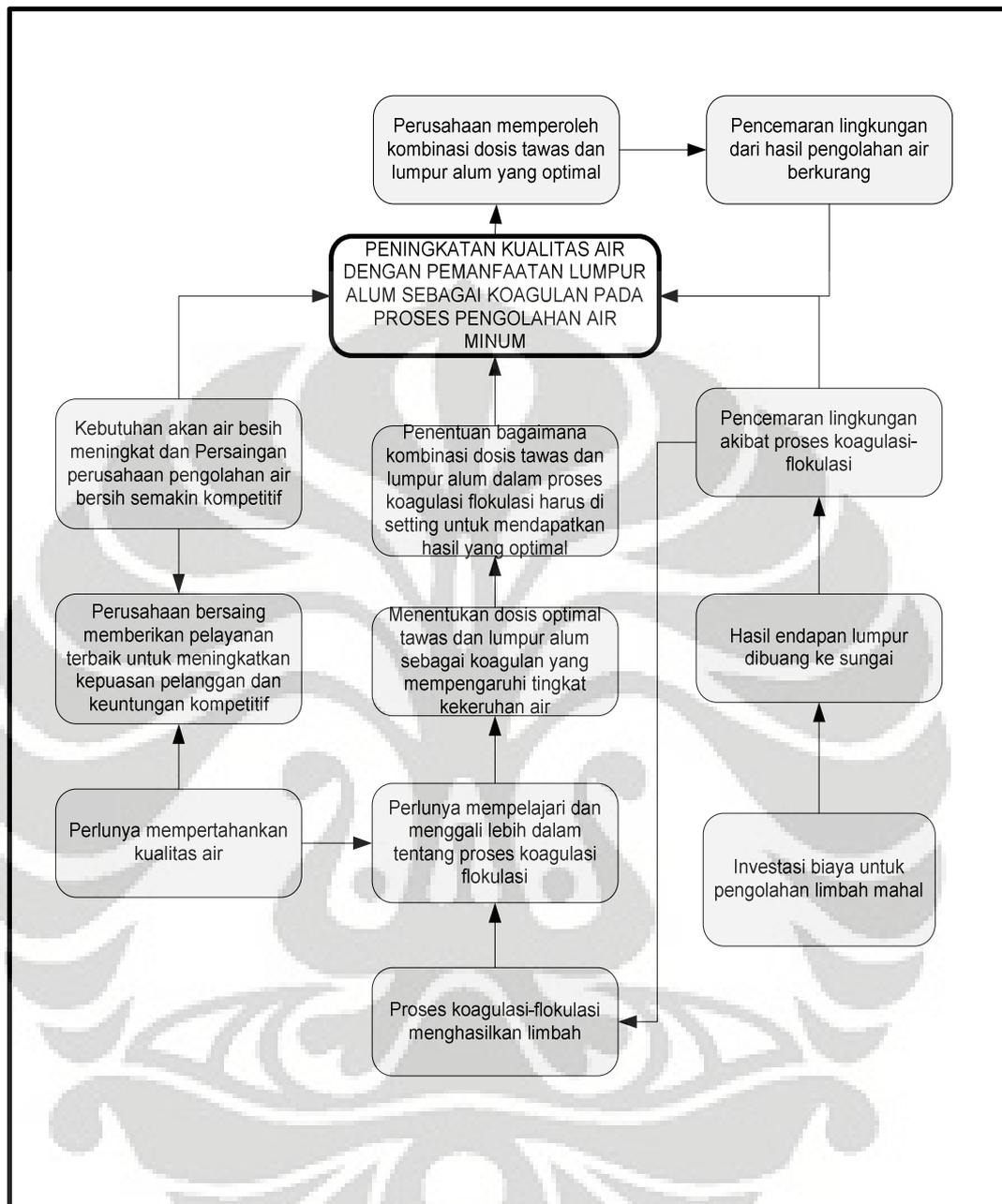


Gambar 1.1. Gambar proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air bersih
(Sumber : www.geocities.com)

Dalam rangka upaya menjalankan proses produksi yang ramah lingkungan pada pengolahan air minum di salah satu Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) di Tangerang, alternatif yang dapat dilakukan adalah mengurangi pemakaian bahan kimia koagulan tawas (Al_2SO_4). Proses reduksi kekeruhan air pada kualitas air baku, perlu ditunjang dengan penambahan zat koagulan pembantu yang antara lain dapat memanfaatkan lumpur alum, yaitu dengan cara diresirkulasikan ke dalam unit koagulasi-flokulasi.

Untuk mengetahui kombinasi optimal dosis koagulan dan lumpur alum serta settingan kecepatan putaran dan lama pengadukan dalam proses koagulasi-flokulasi untuk mencapai reduksi kekeruhan maksimal dapat dilakukan suatu analisa dengan menggunakan metode *Response Surface Method* yang merupakan lanjutan dari DOE (*Design of Experiment*). Dengan demikian perusahaan pengolah air minum dapat mengetahui kombinasi optimal dosis koagulan tawas dan lumpur alum untuk mengurangi kekeruhan air.

1.2 Diagram Keterkaitan Masalah



Gambar 1.2. Diagram keterkaitan masalah

1.3 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan diagram keterkaitan masalah yang telah dijelaskan, maka pokok masalah yang akan dibahas adalah menentukan kombinasi optimal dosis koagulan (tawas) dan resirkulasi lumpur alum serta settingan kecepatan putaran dan lama pengadukan untuk mengurangi kekeruhan air. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai masukan bagi perusahaan pengolah air minum.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kombinasi yang optimal dosis tawas dan lumpur alum serta settingan kecepatan putaran dan lama pengadukan yang digunakan untuk mengurangi kekeruhan air.

1.5 Asumsi dan Batasan Masalah

Dalam penelitian ini akan dilakukan pembatasan masalah agar pelaksanaan penelitian dan hasil yang diperoleh sesuai dengan tujuan. Batasan masalah penelitian ini meliputi:

1. Penelitian dilakukan di salah satu Water Treatment Plant di Tangerang.
2. Pengumpulan data berasal dari data observasi langsung yang didapatkan dari hasil penelitian.
3. Penelitian ini dibatasi hanya pada proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air bersih.
4. Air baku yang digunakan dalam penelitian adalah air sungai dengan tingkat kekeruhan 80-210 ppm
5. Kualitas air yang dilihat hanya pada tingkat kekeruhan air saja.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan metodologi sebagai berikut :

1. Persiapan Penelitian

Langkah langkah yang dilakukan dalam melakukan persiapan penelitian adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan topik dan permasalahan
- b. Menentukan rumusan permasalahan
- c. Menentukan tujuan penelitian
- d. Membuat batasan masalah

2. Penentuan landasan teori

Bagian ini menentukan landasan teori yang dipakai yang berhubungan dengan topik sebagai dasar teori dalam pelaksanaan penelitian. Adapun landasan teori yang terkait antara lain adalah proses pengolahan air bersih terkhusus pada proses koagulasi-flokulasi dengan memanfaatkan lumpur alum dan metode-metode analisa yang digunakan seperti *Response Surface Method*

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data pada penelitian ini diperoleh dari penelitian langsung, dengan mengamati faktor – faktor terkontrol yang mempengaruhi kualitas air pada proses koagulasi flokulasi di Instalasi Pengolahan air Minum (IPAM).

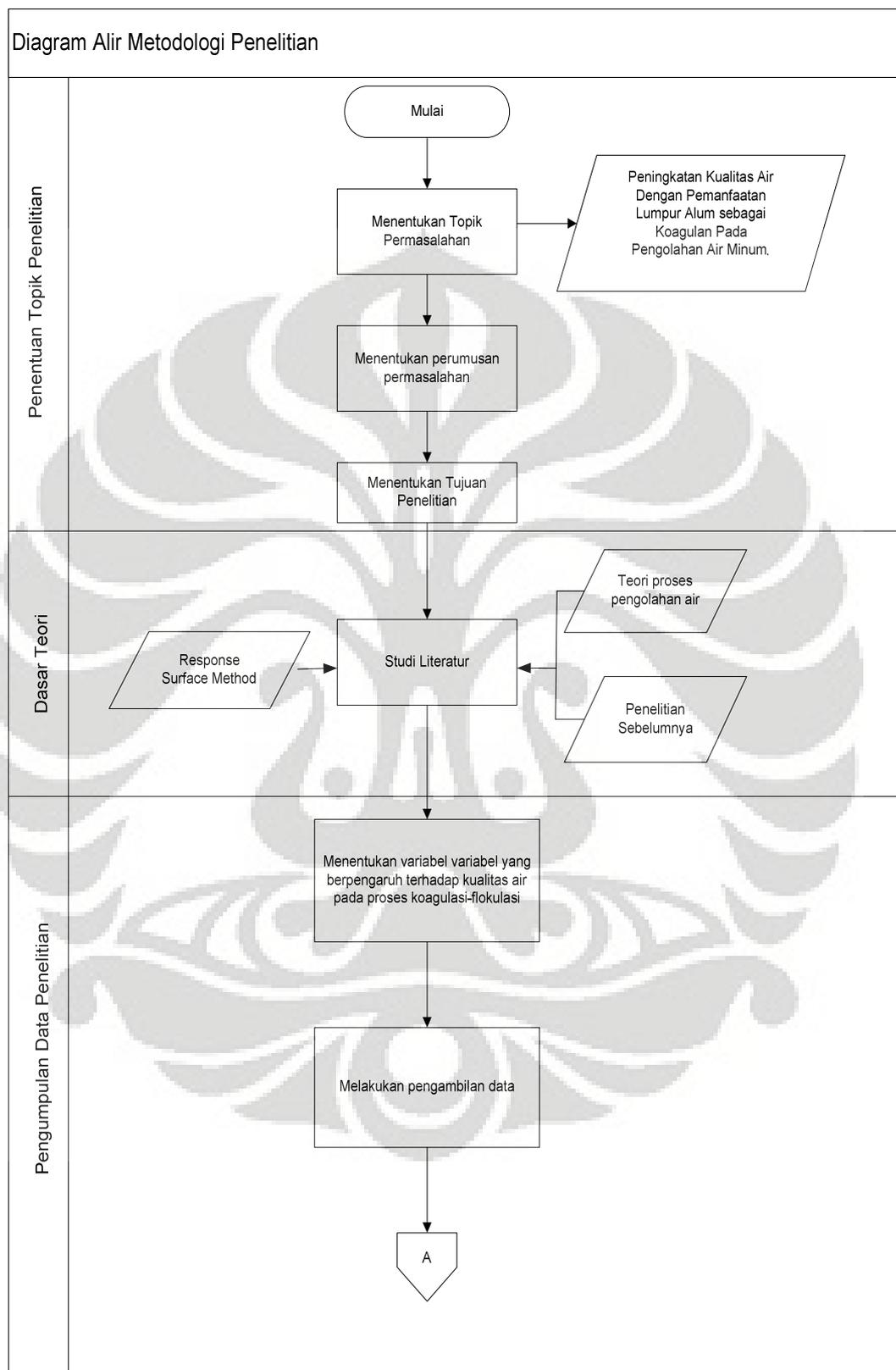
4. Pengolahan dan Analisis data

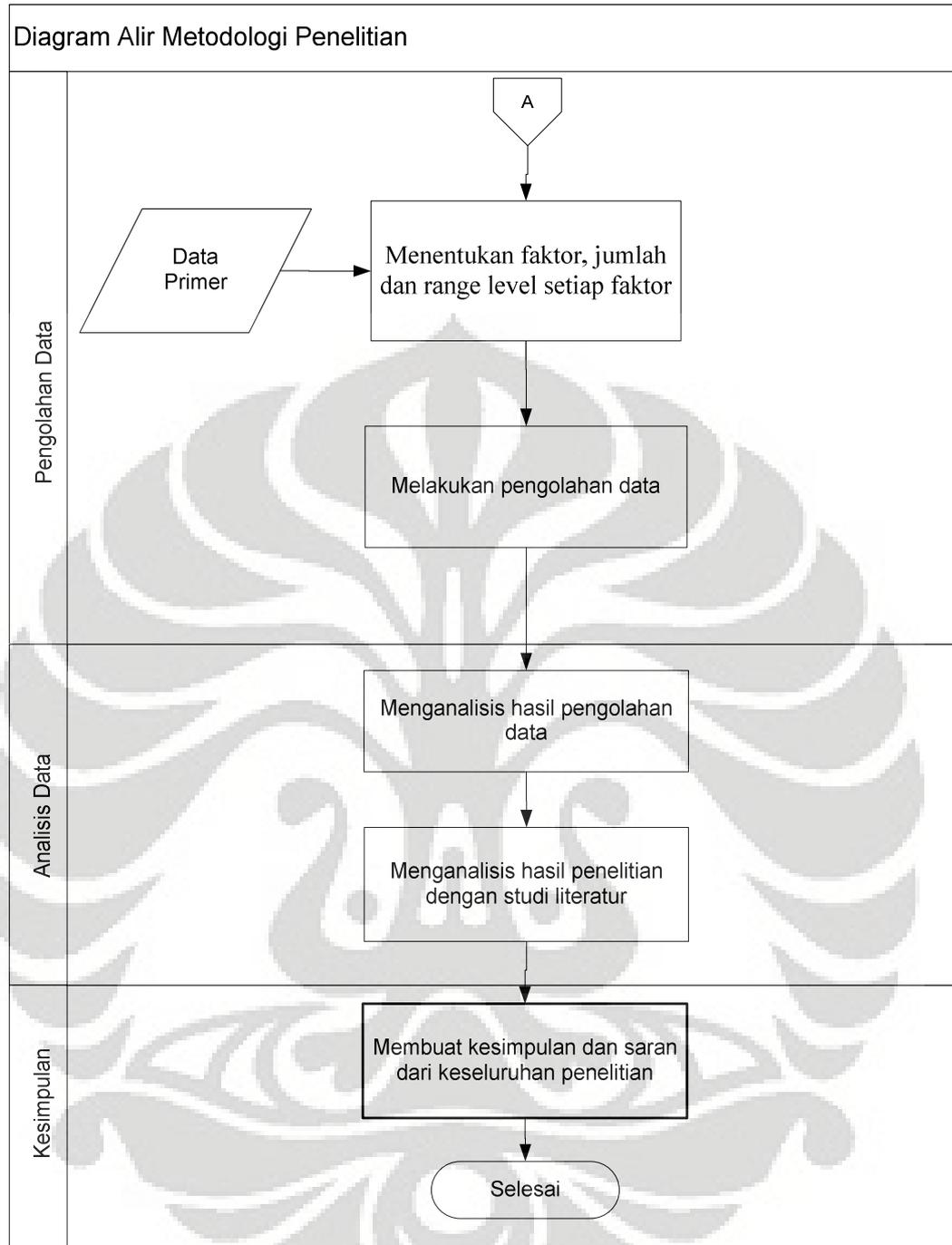
Data diolah untuk mengetahui kombinasi yang optimal antara tawas (Al_2SO_4) dan lumpur alum serta settingan kecepatan putaran dan lama pengadukan dalam mengurangi kekeruhan air dengan menggunakan *Response Surface Method*. Data yang telah diolah dianalisa untuk mencapai tujuan skripsi agar dapat memberikan usulan atau masukan terhadap kegiatan pengolahan air minum.

5. Kesimpulan dan saran

Pada bagian ini akan dihasilkan kesimpulan mengenai keseluruhan penelitian dan saran bagi perusahaan pengolahan air bersih.

Gambar 1.3. Diagram alir metodologi penelitian





Gambar 1.3. Diagram alir metodologi penelitian (sambungan)

1.7 Sistematika Penulisan

Secara umum, pembahasan penelitian ini terdiri dari beberapa bab dengan sistematika sebagai berikut:

Universitas Indonesia

- bab 1 merupakan bab pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini, diagram keterkaitan masalah, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan
- bab 2 merupakan landasan teori dan tinjauan pustaka yang berhubungan dengan penelitian ini. Landasan teori yang dibahas meliputi proses pengolahan air serta metode DOE dan RSM (*Response Surface Method*)
- bab 3 berisi tentang metode penelitian ini yaitu dimulai dari pengumpulan data dan dilanjutkan dengan pengolahan data. Metode penelitian yang dibahas pengambilan dan pengumpulan data penggunaan sinle koagulan dengan double koagulan, data 3^k *factorial design* dan data RSM (*Response Surface Method*)
- bab 4 berisi pembahasan dari pengumpulan dan pengolahan data penelitian.. Pembahasan dilakukan terhadap hasil pengolahan data.
- bab 5 merupakan kesimpulan dari keseluruhan penelitian ini. Kesimpulan yang diambil akan meliputi keseluruhan hasil pengolahan data.

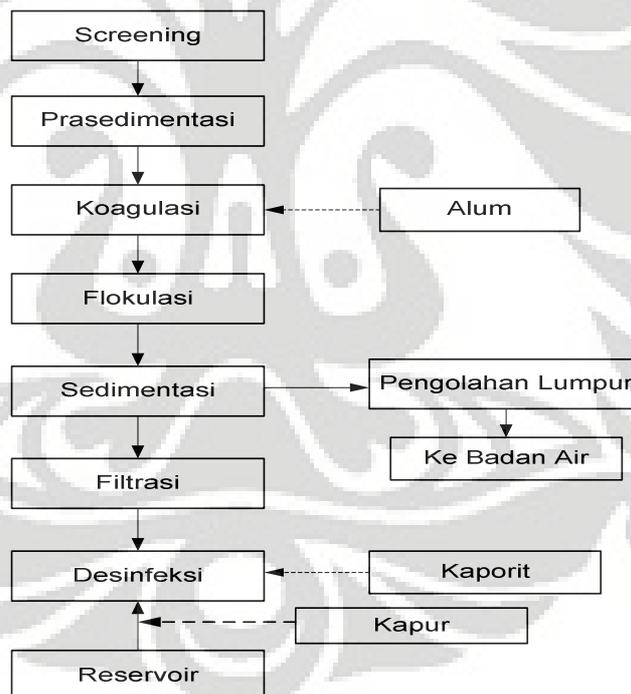
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pengolahan Air Minum

Pada umumnya Instalasi Pengolahan Air Minum merupakan suatu sistem yang mengkombinasikan proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi serta dilengkapi dengan pengontrolan proses juga instrumen pengukuran yang dibutuhkan. Instalasi ini harus didesain untuk menghasilkan air yang layak dikonsumsi masyarakat bagaimanapun kondisi cuaca dan lingkungan³

Tujuan dari sistem pengolahan air minum yaitu untuk mengolah sumber air baku menjadi air minum yang sesuai dengan standar kualitas, kuantitas, dan kontinuitas. Secara umum proses pengolahan air minum dengan sumber air baku yang berasal dari air permukaan dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1. Skema Pengolahan Air Minum

(Sumber: Kawamura, Susumu. 1991)

³ Kawamura, Susumu, “ *Integrated Design of Water Treatment Facilities*”, John Willey & Sons, Inc. New York, 1991 hal 51

2.1.1 Screening

Screening adalah unit operasi yang pertama pada sistem pengolahan air minum dan air buangan. Pada prinsipnya, alat ini bekerja dengan cara menginterupsi aliran air. Unit ini berfungsi untuk menyisihkan partikel-partikel besar yang terbawa oleh air agar alat-alat yang digunakan pada proses pengolahan selanjutnya terlindungi dari berbagai gangguan dan kerusakan sehingga proses dapat berjalan dengan lebih baik, mudah, dan cepat. Alat-alat tersebut misalnya pompa, valve, dan pipa. Alat yang digunakan pada proses screening ini disebut screen, memiliki besaran bukaan tertentu (biasanya ukurannya seragam) yang mampu menahan material kasar berukuran besar yang terdapat pada sumber air baku maupun air buangan. Material kasar yang tertahan pada *screen* disebut sebagai *screening*, dapat berupa kain, plastik, dahan kayu, logam, kardus, dll.

2.1.2 Prasedimentasi

Prasedimentasi adalah tahap penyisihan partikel diskrit dan bukan flok seperti pasir, kerikil, dan *settleable* solid lainnya dari air permukaan yang mengandung zat padat berkonsentrasi tinggi. Bak prasedimentasi menyisihkan sebagian besar materi padat dalam air baku, membuangnya sebagai lumpur yang terkonsentrasi dan menjaga kualitas air yang masuk ke proses sedimentasi. Proses ini berguna untuk mencegah deposit pada saluran dan pipa, melindungi pompa dan alat lain dari abrasi, dan mencegah terjadinya masalah proses pengolahan selanjutnya⁴.

2.1.3 Koagulasi

Partikel-partikel dalam air yang berukuran besar dalam air dapat dihilangkan dengan pengendapan atau sedimentasi. Namun partikel-partikel yang berukuran kecil dan halus tidak dapat dihilangkan dengan cara sedimentasi. Partikel yang halus ini disebut dengan koloid.

⁴ Fair, Geyer, Okun, “ *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal* “, John Wiley & Sons Inc, Toronto, 1968, Hal.251

Koloid dalam air berasal dari alam atau limbah. Koloid yang berasal dari alam, umumnya bermuatan negatif. Hal ini disebabkan alam banyak mengandung senyawa organik dan anorganik yang bermuatan negatif. Pembusukan materi organik juga menghasilkan muatan negatif. Sedangkan koloid dari limbah berupa zat organik yang bermuatan positif⁵.

Koloid dari limbah dapat dihilangkan dengan penambahan soda. Koloid sulit untuk diendapkan karena larutan koloid merupakan larutan yang stabil. Hal ini ditunjukkan dengan massa koloid yang sangat ringan sehingga sulit untuk mengendap. Selain itu partikel koloid tidak dapat menyatu antara koloid satu dengan yang lain karena muatannya yang sejenis. Muatan negatif dan sejenis ini akan menimbulkan gaya tolak menolak yang disebut dengan repulsi elektrostatik.

Agar koloid dapat mengendap, maka perlu ditambahkan suatu zat yang dapat menetralkan muatan koloid dan mendestabilisasi koloid sehingga koloid dapat menyatu dan mengendap. Zat ini disebut koagulan⁶. Koagulasi didefinisikan sebagai proses destabilisasi koloid dengan menggunakan koagulan sehingga terbentuk flok-flok yang mudah mengendap. Proses koagulasi dan flokulasi dapat mengurangi kekeruhan, mikroorganisme, warna, zat padat terlarut, logam, fosfat dan nitrat pada air baku.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses koagulasi adalah:

- Intensitas pengadukan
- Gradien kecepatan
- Karakteristik koagulan, dosis dan konsentrasi
- Karakteristik air baku, kekeruhan, alkalinitas, PH dan suhu

⁵ Droste, Ronald L, "*Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*", John Wiley and Sons Inc. New York, 1997, Hal : 76

⁶ Fair, Geyer, Okun, "*Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal*", John Wiley & Sons Inc, Toronto, 1968, Hal.266

2.1.3.1 Koagulan

Secara umum koagulan berfungsi untuk⁷:

- Mengurangi kekeruhan akibat adanya partikel koloid anorganik maupun organik
- Mengurangi warna yang diakibatkan oleh partikel koloid di dalam air
- Mengurangi bakteri-bakteri patogen, dalam partikel koloid, algae dan organisme plankton lain
- Mengurangi rasa dan bau yang diakibatkan oleh partikel koloid dalam air

Jenis koagulan yang dipakai tergantung pada kriteria desain pengadukan cepatnya. Jenis yang sering digunakan biasanya merupakan senyawa alum (misalnya aluminium sulfat) dan garam besi. Untuk mempercepat pembentukan flok dan optimasi proses koagulasi, digunakan koagulan aid yang berupa polimer⁸. Senyawa alum lebih banyak dipakai karena pertimbangan harganya yang lebih murah. Sedangkan keurggulan yang dimiliki oleh garam besi adalah karena pemakaiannya efektif pada jangkauan pH yang lebih luas dibandingkan senyawa alum. Dosis optimum koagulan yang digunakan diperoleh dari uji di laboratorirun yaitu uji jar test.

Penambahan koagulan yang tinggi belum tentu akan menghasilkan kualitas air yang lebih baik. Dosis koagulan yang dibutuhkan untuk pengolahan air tidak dapat diperkirakan berdasarkan kekeruhan, tetapi harus dilakukan percobaan di laboratorium. Tidak setiap kekeruhan yang tinggi memerlukan koagulan yang tinggi. Jika kekeruhan dalam air lebih dominan disebabkan oleh lumpur halus atau lumpur kasar maka kebutuhan akan koagulan akan sedikit, sedangkan kekeruhan yang dominan disebabkan koloid maka akan dibutuhkan dosis tawas yang tinggi⁹.

⁷ Fair, Geyer, Okun, “ *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal* “, John Wiley & Sons Inc, Toronto, 1968, Hal.279

⁸ Ibid, Hal.298

⁹ Fair, Geyer, Okun, “ *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal* “, John Wiley & Sons Inc, Toronto, 1968, Hal.300

Untuk itu dilakukan percobaan jar test dengan tujuan menentukan dosis koagulan optimum dalam pengolahan air. pH optimum untuk proses koagulasi adalah sekitar pH 6,5 s/d 7,5 oleh sebab itu jika pH air yang akan dikoagulasi tidak berada pada pH optimum, perlu dinaikkan atau diturunkan terlebih dahulu sehingga ada di daerah optimum. Pada penambahan aluminium sulfat, terjadi reaksi hidrolisa yang menyebabkan penurunan pH (larutan menjadi asam). Pada kondisi pH kurang dari 6, endapan aluminium hidroksida melarut kembali sehingga flok-flok gagal terbentuk. Untuk itu, dibutuhkan penambahan alkalinitas agar koagulasi berjalan dengan efektif.

Untuk mencapai proses koagulasi optimum, maka diperlukan pengaturan semua kondisi yang saling berkaitan yaitu :

- Temperatur air
- pH dan Alkalinitas
- Jenis koagulan
- Tingkat kekeruhan air baku
- Jumlah garam terlarut dalam air
- Kondisi pengadukan

2.1.4 Flokulasi

Unit flokulasi adalah unit operasi pengadukan lambat. Fungsi unit flokulasi adalah untuk meningkatkan frekuensi tumbukan antar partikel yang dapat menyebabkan pembentnkan flok-flok yang lebih besar sehingga mudah diendapkan. unit ini diletakkan setelah proses pengadukan cepat (koagulasi). penambahan koagulan ke dalam air baku yang akan diolah bertujuan untuk memperoleh terbentuknya flok sebagai gabungan dari koloid-koloid dalam air baku. Pembentukan flok ini akan berlangsung dengan baik apabila saat penambahan koagulan ke dalam air disertai proses pengadukan cepat (*rapid mixing*) yang dilanjutkan dengan pengadukan lambat (*slow mixing*).

Pengadukan cepat dilakukan dalam bak yang dilengkapi dengan pengaduk (agltator) yang berfungsi rurtuk mendispersikan secara seragam bahan koagulan sehingga terjadi kontak yang cukup antara koagulan dengan partikel-partikel

tersuspensi, sehingga akan terbentuk flok yang stabil dan mudah mengendap. Pengadukan lambat biasanya menggunakan lebih dari satu bak.

2.1.5 Sedimentasi

Sedimentasi atau pengendapan adalah pemisahan partikel yang terdapat di dalam air secara gravitasi. Keberadaan partikel di dalam air diukur dengan melihat kekeruhan atau dengan mengukur rangsang berat zat padat terlarut.

- Kekeruhan diukur dengan satuan mg/l SiO₂ atau dengan NTU diukur dengan *turidimeter heliege*.
- Kandungan zat padat terlarut diukur dengan satuan mg/l solid yang pengukurannya dilakukan dengan mengeringkan sample air pada suhu tertentu sehingga zat padat terpisah dan dapat diukur beratnya.

Pengendapan dari suatu partikel yang berada di dalam air dipengaruhi oleh faktor-faktor:

- Ukuran partikel
- Bentuk partikel
- Berat jenis atau kerapatan partikel
- Berat jenis cairan
- Viskositas cairan
- Konsentrasi partikel dalam suspensi
- Sifat-sifat partikel dalam suspensi

2.1.6 Filtrasi

Proses filtrasi merupakan salah satu proses dalam pengolahan air bersih yang bertujuan untuk menyisihkan *particulate matter*, dengan cara melewatkan air yang akan diolah melalui media filter dengan ukuran dan kedalaman tertentu¹⁰

Hal-hal yang perlu diperhatikan sebagai variabel perencanaan filter antara lain :

1. Ukuran media
2. Kecepatan filtrasi

¹⁰ Kawamura, Susumu, “ *Integrated Design of Water Treatment Facilities*”, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991 hal 71

3. *Underdrain*
4. Pencucian filter
5. *Headloss* yang tersedia untuk filtrasi

Variabel di atas tergantung pada:

1. Kualitas air baku
2. Tipe *filter bed*
3. Kualitas air hasil filtrasi yang diinginkan

Filtrasi adalah proses fisik sekaligus kimiawi. Penyisihan kekeruhan terjadi berdasarkan faktor-faktor sebagai berikut:

1. Karakteristik kimiawi air yang disaring
2. Karakteristik fisik dan kimiawi partikulat tersuspensi di dalam air
3. Tipe dan tahap pretreatment (koagulasi, flokulasi dan sedimentasi)
4. Tipe dan operasi filter

2.1.7 Desinfeksi

Desinfeksi adalah operasi yang melibatkan proses pembunuhan atau merusak mikroorganisme patogen. Sedangkan sterilisasi adalah pembunuhan seluruh mikroorganisme baik yang patogen maupun tidak patogen. Disinfektan yang digunakan harus bersifat toksik bagi mikroorganisme tetapi tidak toksik bagi makhluk hidup yang lebih kompleks termasuk manusia.

Faktor penghambat keefektifan desinfeksi adalah kekeruhan dan resistensi organisme terhadap disinfektan. Kekeruhan pada air disebabkan karena air mengandung partikel-partikel koloid. Partikel-partikel koloid tersebut akan membungkus mikroorganisme sehingga melindungi mereka dari disinfektan. Virus, kista dan ova adalah organisme yang lebih resisten dari bakteri, sehingga memerlukan waktu yang lebih lama dan konsentrasi disinfektan yang lebih tinggi agar dapat dibunuh¹¹.

¹¹ Droste, Ronald L, “*Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*”, John Wiley and Sons Inc. New York, 1997 , Hal : 96

Disinfektan yang digunakan termasuk bahan kimia seperti dari grup halogen dan ozon. Disinfektan dapat juga berupa fisik seperti radiasi dengan sinar gamma atau ultraviolet, sonifikasi, elektrokusi, dan pemanasan.

2.1.8. Klorinasi

Klorin yang digunakan dapat berupa gas (Cl_2) atau padat [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$, NaOCl].

Reaksinya dalam air adalah sebagai berikut :



Asam hipoklorus (HOCl) bereaksi lagi menjadi :



Senyawa HOCl & OCl^- berfungsi sebagai free available Chlorine. Sebelum membasmi mikroorganisme, free available chlorin ini terlebih dahulu mengoksidasi ion-ion logam seperti Fe, Mn, dan memecah molekul-molekul organik seperti warna juga bereaksi dengan NH_4 dan berkaitan dengan amoniak dalam bentuk monokloramin, dikloramin dan trikloramin. Ketiga senyawa ini memiliki daya desinfeksi yang efektifitasnya di bawah asal hipoklorit. Selama proses tersebut klor sendiri tereduksi menjadi klorida yang tidak mempunyai daya desinfeksi. Setelah reduktor teroksidasi, penambahan klor selanjutnya membentuk sisa klor bebas, sisa klor bebas ini berfungsi sebagai disinfektan.

Senyawa HOCl dan OCl^- sebagai disinfektan akan menembus dinding sel alga, kemudian akan bereaksi dengan inti sel alga yang sebagian besar tersusun atas protein. Protein merupakan salah satu senyawa reduktor klor. Senyawa HOCl (bermuatan netral) akan lebih mudah menembus dinding sel alga (bermuatan negatif). Senyawa OCl^- lebih sukar menembus dinding sel alga karena bermuatan sejenis.

Diperlukan waktu kontak yang cukup khlorin dapat menghancurkan berbagai tipe organisme yang pathogenic. Konsentrasi HOCl ditentukan oleh dosis Cl_2 . konsentrasi HOCl juga ditentukan oleh pH air. Konsentrasi HOCl akan lebih tinggi pada suatu harga pH yang rendah.

Manfaat klorinasi¹² :

- Mengurai atau membunuh bakteri
- Mengurangi atau menghilangkan alga pada bangunan instalasi pengolahan
- Menurunkan kadar Fe, Mn dalam air
- Menurunkan intensitas warna (oleh partikel koloid)
- Mengurangi bau (amis dan rasa air)
- Mengurangi frekuensi terjadinya clogging pada filter, sehingga back washing tidak terlalu sering dilakukan
- Berperan sebagai koagulan. Penggunaan $Al_2(SO_4)_3$ atau PAC sebagai koagulan dalam proses koagulasi menjadi berkurang.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses klorinasi adalah :

1. Tipe/jenis klorin
2. PH
3. Konsentrasi
4. Waktu kontak
5. Jenis mikroorganisme
6. Suhu

2.1.9. Ozonisasi

Ozon merupakan oksidan kuat yang beraksi dengan senyawa organik dan senyawa inorganik yang tereduksi. Produk akhirnya berupa senyawa yang tidak berbahaya bagi lingkungan, sehingga lebih menguntungkan dibandingkan klorinasi. Tetapi biaya ozonisasi dapat mencapai dua sampai tiga kali lipat dari biaya klorinasi.

¹² Fair, Geyer, Okun, “ *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal* “, John Wiley & Sons Inc, Toronto, 1968, Hal.324

2.1.10. Radiasi

Radiasi dengan sinar ultraviolet pada proses disinfeksi adalah dengan menggunakan sinar dengan panjang gelombang 2000 sampai 3000 Å. Radiasi ini merupakan metode yang efektif untuk membunuh bakteri maupun virus, selain itu radiasi juga tidak meninggalkan produk akhir.

2.1.11 Reservoir

Sistem distribusi air minum terdiri dari jaringan perpipaan dan reservoir distribusi. Reservoir secara umum berarti tempat cadangan air. Reservoir menampung air hasil pengolahan yang memenuhi standar untuk permintaan puncak, sebelum air masuk ke jaringan distribusi. Dalam sistem distribusi, reservoir memiliki tiga fungsi pokok :

1. Sebagai penyeimbang aliran
2. Sebagai penyeimbang tekanan
3. Sebagai distributor

Reservoir harus kedap air dan tahan terhadap gaya-gaya yang bekerja terhadapnya (contohnya gaya tanah dan gaya air dinding reservoir). Kebocoran harus dicegah agar dapat dihindari hilangnya air dan juga menjaga kestabilan struktur reservoir itu sendiri.

2.2. *Design Of Eksperiment (DOE)*

Berikut ini akan dibahas mengenai sejarah, definisi, fungsi, istilah dan parameter dalam design eksperimen, serta metode 3^k *factorial design* dan metode *response surface*

2.2.1. Sejarah Desain Eksperimen

Design of experiments (DOE) merupakan ilmu statistik yang paling sering digunakan di industri di dunia. Aplikasi DOE sangat variatif mulai dari manajemen, teknik sampai science. DOE meliputi perencanaan dan pendesainan suatu percobaan sehingga data tepat dapat dikumpulkan dan diolah sehingga mendapatkan data yang valid

Pertama kali DOE dikembangkan oleh Sir R. A. Fisher di Pusat Penelitian Perkebunan Rothamsted di London, Inggris di awal tahun 1920-an dan tujuan utama Fisher adalah untuk menentukan jumlah air, pupuk, sinar matahari dan keadaan tanah yang dibutuhkan untuk memproduksi panen terbaik¹³. Setelah Fisher memperkenalkan metode dan mendemonstrasikan dalam bidang pertanian, semakin banyak penelitian dan pemakaian metode DOE di bidang industri.

Metode yang digunakan Fisher ini menggantikan metode tradisional *one-factor-at-a-time* (OFAT) untuk melakukan perancangan. Dimana strategi OFAT adalah strategi melakukan percobaan dengan mengubah nilai dari suatu faktor dengan faktor-faktor lain dibiarkan tetap. Kelemahan dari metode ini adalah tidak memperhitungkan terjadinya interaksi diantara faktor-faktor. Metode ini juga memakan waktu yang cukup lama.

2.2.2. Definisi Desain Eksperimen

Suatu eksperimen dapat dikatakan sebagai sebuah atau sekumpulan tes yang dilakukan melalui perubahan-perubahan yang terencana baik terhadap variable *input* dari suatu proses atau system. Dengan demikian dapat diselidiki dan diketahui penyebab dari perubahan-perubahan *output* sebagai respon dari eksperimen tersebut. Dari suatu design eksperimen yang baik akan diperoleh pengetahuan yang objektif tentang kemungkinan yang dapat terjadi pada respon dari suatu proses apabila dilakukan perubahan pada *input* proses. Ada tiga prinsip dasar dalam design eksperimen, yaitu :

a. Randomisasi (Pengacakan eksperimen)

Randomisasi yaitu menentukan secara acak urutan percobaan yang akan dilakukn dengan tujuan untuk mencegah terjadinya kesalahan input secara kontinu. Selain itu randomisasi juga digunakan untuk menjamin validitas dari perkiraan kesalahan eksperimen. Randomisasi dilakukan agar keragaman residual respon yang dari perlakuan-perlakuan tidak tergantung pada urutan observasi. Tujuan randomisasi yang lainnya adalah

¹³ Hefin Rowland dan Jiju Anthony, “ *Application of Design of Experiment to a Spot Welding Process*”, Assembly Automation, vol 2, No.3 2003, hal 273

untuk meminimalisir timbulnya keragaman residual respon yang ditimbulkan dari faktor-faktor yang tidak diketahui dan tidak terkendali.

b. Replikasi

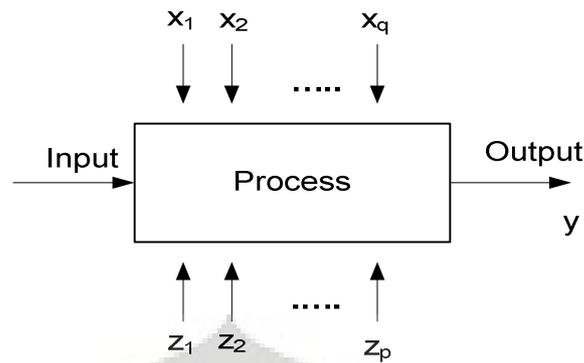
Replikasi yaitu pengulangan eksperimen dasar agar diperoleh efek faktor yang lebih presisi. Replikasi dilakukan agar diperoleh nilai estimasi kesalahan eksperimen, yang merupakan unsure penting dalam mengidentifikasi secara statistik adanya keragaman respon eksperimen. Nilai estimasi keragaman eksperimen juga berguna untuk mengestimasi secara tepat respon yang ditimbulkan dari suatu input proses. Replikasi dilakukan paling tidak sebanyak dua kali ($n \geq 2$), dengan tujuan mendeterminasikan jumlah kuadrat kesalahan apabila diketahui secara kuantitatif (dari model regresi) terdapat adanya pengaruh interaksi antar faktor. Eksperimen yang tidak menginginkan replikasi hanya digunakan pada situasi tertentu dengan asumsi-asumsi tertentu.

c. *Blocking* (Pemblokian)

Blocking merumakan teknik yang digunakan untuk meningkatkan presisi dari suatu percobaan.¹⁴ *Blocking* juga dikenal dengan *local control*, yaitu mengalokasikan unit-unit eksperimen kedalam blok-blok. Tujuannya agar unit-unit eksperimen dalam suatu blok relative bersifat homogen dan dapat dibandingkan antara blok yang satu dengan blok yang lainnya. Cara ini menyebabkan pengaruh (efek) dari *nuisance factors* (faktor-faktor terkendali diluar proses) dapat dieliminasi.

Ada dua macam faktor yang terdapat dalam design eksperimen, yaitu *controllable factor* (faktor yang dapat dikendalikan) dan *uncontrollable factor* (faktor yang tidak dapat dikendalikan). Berikut ini adalah model umum dari suatu proses.

¹⁴ Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.3



Gambar 2.2. Model Umum suatu Sistem
(Sumber: Douglas C. Montogementry, 2005, hal.2)

Proses merupakan suatu rangkaian kegiatan yang membutuhkan input serta menghasilkan output yang nilainya dipengaruhi oleh berbagai macam faktor.

Tujuan dilakukannya eksperimen adalah untuk :

- a. Menentukan variable mana yang berpengaruh.
- b. Menentukan nila X agar variabilitas dalam Y kecil.
- c. Menentukan nilai X agar Y selalu berada didekat harga nominal yang dikehendaki.
- d. Menentukan nilai X agar pengaruh $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_p$ dapat seminimal mungkin¹⁵.

Langkah penuntun untuk melalukan design eksperimen adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui dan menentukan masalah
- b. Pemilihan faktor, level, range.
- c. Pemilihan variable respon

¹⁵ Douglas C. Montegomery, Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.1

- d. Pemilihan design eksperimen yang meliputi pertimbangan akan ukuran sampel, pemilihna urutan percobaan dan penentuan penggunaan blocking (batasan pengacakan yang lain)
- e. Pelaksanaan eksperimen.
- f. Analisa statistic data.
- g. Kesimpulan.

Selain itu ada tiga macam respon, yaitu:

- a. *Higher Better* (semakin tinggi, semakin baik)
- b. *Lower Better* (semakin rendah, semakin baik)
- c. *Nominal The Best* (semakin mendekati target/standar, semakin baik).

2.2.3. Fungsi Desain Eksperimen.

Biasanya eksperimen digunakan untuk mempelajari performance proses atau system.yang umumnya divisualisasikan seperti kombinasi mesin, metode, manusia dan sumberdaya lainnya yang mempengaruhi proses perubahan input menjadi output. Oleh sebab itu perlu adanya suatu pendekatan statistik yang diaplikasikan pada proses eksperimen. Beberapa aplikasi dari metode desain eksperimen dalam hal pengembangan proses yaitu:

- a. Untuk memperbaiki hasil proses
- b. Untuk mengurangi variabilitas dan mendekati nilai target yang diinginkan.
- c. Untuk mengurangi waktu pengembangan.
- d. Untuk mengurangi biaya keseluruhan (*overall cost*)

Desain eksperimen juga digunakan sebagai metode dalam membuat suatu desain (Engineering desain) untuk suatu produk baru atau memperbaiki yang sudah ada. Beberapa aplikasi dari metode desain eksperimen dalam hal engineering design antara lain :

- a. Evaluasi dan membandingkan konfigurasi dasar desain.
- b. Evaluasi alternatif-alternatif material.
- c. Pemilihan parameter-parameter desain sehingga proses dapat berjalan baik dalam variasi kondisi yang beraneka ragam dan mutu produk tetap terjaga.
- d. Menentukan parameter desain produk yang utama yang mempengaruhi performa produk.

Universitas Indonesia

2.2.4. Istilah Dalam Desain Eksperimen

Ada beberapa istilah yang sering digunakan dalam desain eksperimen yaitu :

a. Faktor

Faktor yaitu variable bebas yang mempengaruhi hasil eksperimen (komponen yang tidak dapat diubah kondisinya). Faktor biasanya disebut juga dengan variable independen (variable kausal), yaitu variable yang secara sengaja divariasi/diubah dalam sebuah cara yang terkontrol pada sebuah percobaan. Beberapa faktor yang tidak dapat dikontrol dikenal dengan istilah faktor derau(noise)

b. Level

Level yaitu tingkatan nilai dari suatu faktor (komponen yang dapat diubah kondisinya). Biasanya level yang digunakan bervariasi ataupun sama pada setiap faktor yang dipilih. Hal ini tergantung pada penelitian yang dilakukan. Semakin banyak level maka kombinasi pada setiap faktor akan semakin kompleks pula dan mengakibatkan semakin tinggi tingkat ketelitian yang mempengaruhi setiap faktor yang diteliti.

c. Interaksi

Interaksi adalah keterkaitan suatu faktor dengan faktor lain yang dapat mempengaruhi respon.

d. Efek

Efek adalah perubahan respon dari level yang berbeda dari suatu faktor. Ada dua jenis efek, yaitu efek faktor utama dan efek interaksi.

e. Respon

Respon adalah hasil pengamatan yang diperoleh dari penelitian dan pengukuran (biasa dilambangkan dengan Y)

f. Run

Run adalah kombinasi yang harus dipenuhi dalam suatu desain eksperimen.

Perbedaan antara run dan replikasi adalah sebagai berikut :

- Run (N)
Run adalah kombinasi yang harus dipenuhi dalam suatu rancangan eksperimen.
- Replikasi (n)
Replikasi adalah jumlah percobaan/observasi yang dilakukan pada suatu kombinasi perlakuan.

2.2.5. Parameter Dalam Desain Eksperimen

Parameter dalam desain eksperimen dibedakan menjadi tiga kelas, yaitu :

a. Signal Faktors

Signal factor merupakan faktor-faktor yang hanya mempengaruhi mean performance process. Parameter ini diatur oleh user (operator) dari produk untuk memberikan nilai respon produk yang diinginkan, contohnya pengaturan kecepatan kipas untuk mendapatkan sejumlah angin tertentu.

b. Noise Factor

Noise factor merupakan faktor-faktor yang menyebabkan variasi dalam fungsional performance produk/proses. Noise faktor ini dapat dibedakan menjadi dua, yaitu outer noise factor dan inner noise factor. *Outer noise factor* berasal dari luar mesin produksi itu sendiri, contohnya debu, material yang dipakai, performa operator, dan lain sebagainya. Sedangkan *inner noise factor* berasal dari dalam mesin produksi, contohnya umur mesin, oksidasi, dan lain sebagainya. Parameter-parameter tertentu yang tidak dapat diatur atau dikontrol oleh desainer dikarenakan terlalu sulit atau terlalu mahal untuk mengatur setting dari parameter tersebut. Parameter yang tidak mempunyai level tetap ini, juga menyebabkan nilai dari repon produk menyimpang dari spesifikasi target.

c. Control Factor

Control faktor merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi respon yang dapat dikontrol dalam kondisi normal. Desainer memiliki tanggung jawab untuk menentukan nilai terbaik dari parameter ini, karena parameter ini dapat ditentukan dengan bebas oleh desainer. Setiap control factrol dapat

Universitas Indonesia

memiliki lebih dari satu level. Jika level control faktor tertentu diubah maka nilai respon atau biaya produksi akan mengalami perubahan juga. Faktor tertentu inilah yang menjadi fokus eksperimen.

2.2.6. Beberapa Metode Percobaan

Mark A. Fryman membagi jenis percobaan menjadi beberapa bagian antara lain¹⁶ :

a. *Trial and Error Experiment*

Pendekatan *trial and error* merupakan metode dimana satu faktor dimanipulasi / diubah tanpa mempedulikan faktor lainnya . Terdapat kelemahan dari metode ini adalah tidak terlalu benar kebenarannya, memakan biaya yang tinggi, waktu yang lama dan penggunaan yang tidak efisien.

b. *One Factor at a Time Experiments* (OFAT)

OFAT sering digunakan oleh ahli Teknik Industri pada industri manufaktur umumnya. Metode OFAT dikenal sebagai pendekatan tradisional . Dalam metode ini, satu faktor akan diubah sementara faktor yang lain ditetapkan pada nilai yang konstan. Percobaan ini memerlukan intuisi yang tinggi, pengalaman dari orang yang akan melakukannya. Kelemahan dari percobaan ini adalah bahwa hasil yang diharapkan terkadang tidak sesuai, memakan waktu yang lama . Akan tetapi dari sekian banyak keuntungan yang didapatkan dengan memakai pendekatan metode DOE, pendekatan OFAT masih populer dipakai di beberapa industri untuk menyetel parameter yang terbaik. Ada beberapa alasannya adalah¹⁷ :

- Banyak orang masih berprinsip bahwa untuk mengukur pengaruh dari suatu faktor adalah dengan mengubah nilai faktor tersebut sementara faktor lain dibiarkan tetap.
- Dari percobaan OFAT dapat dengan mudah dilakukan dan tidak memerlukan analisis statistika yang kuat.

¹⁶ Mark A. Op. Cit, hal 320

¹⁷ Jiju Antony, Tzu-Yao Chou dan Sid Ghosh, “*Training for design of experiment* “, Work Study, vol.53 No.7 2003, hal 243

- Kesimpulan dapat ditarik dengan melakukan beberapa percobaan dan membandingkan hasil yang terbaik dari tiap percobaan,
- Banyak organisasi yang belum siap menggunakan statistik tingkat lanjut seperti metode DOE

c. *Full Factorial*

Percobaan *full factorial* berbeda dengan dua percobaan sebelumnya dimana setiap kombinasi faktor diuji cobakan pada level yang berbeda-beda. Dengan menggunakan metode ini memiliki beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan dua metode sebelumnya. Hal ini disebabkan karena kesimpulan yang didapat lebih akurat karena setiap kombinasi faktor diuji cobakan. Namun, kelemahan dari metode ini adalah waktu serta biaya yang dikeluarkan akan besar dengan menjalankan semua kombinasi faktor . Jumlah percobaan/ treatment yang harus dicoba akan bertambah besar secara signifikan apabila jumlah faktornya bertambah.

Terdapat keunggulan metode DOE jika dibandingkan dengan metode OFAT, antara lain :

- Metode DOE bisa mempelajari pengaruh dua atau lebih faktor dari suatu percobaan secara bersamaan. Hal ini dipercayai jauh lebih efektif apabila kita hanya meneliti satu faktor setiap melakukan percobaan seperti yang dipakai dalam pendekatan OFAT.
- Metode DOE memerlukan lebih sedikit sumber daya (*resources*) seperti : jumlah percobaan yang dilakukan waktu, biaya material
- Percobaan OFAT tidak memperhitungkan adanya interaksi / hubungan antar faktor. Oleh karena itu hasil yang didapatkan tidak akan menggambarkan kondisi yang sebenarnya. Sebaliknya dengan menggunakan metode DOE dapat memperhitungkan adanya pengaruh interaksi antara faktor.
- Metode DOE dapat digunakan untuk mencari strategi terbaik dalam menetapkan nilai untuk tiap level dalam suatu faktor. Hal ini sering dikenal dengan istilah *Response Surface Method*.
- Metode DOE dapat membangun model matematis yang akurat untuk memperkirakan berapa hasil yang dapat dicapai apabila nilai dari tiap faktor diubah.

Universitas Indonesia

d. *Fractional Factorial*

Banyaknya percobaan yang dilakukan dengan *full factorial* (membuat metode tersebut tidak selalu bisa diterapkan pada semua eksperimen/percobaan). Dengan menggunakan metode *fractional factorial* untuk *screening experiments* (menyeleksi kombinasi percobaan)¹⁸

2.2.7. Langkah –langkah percobaan

Menurut Paul D. Breger dan Robert E. Murer, langkah-langkah dalam melakukan percobaan adalah sebagai berikut¹⁹ :

1. Mempersiapkan percobaan

Proses ini merupakan langkah yang penting agar percobaan tersebut dapat berjalan dengan lancar. Terdapat beberapa tahapan diantaranya :

- Mengidentifikasi variabel input dan output
- Menterjemahkan variabel output ke dalam suatu hal yang dapat diukur secara kuantitatif.
- Menentukan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil akhir.
- Menentukan jumlah level / nilai untuk setiap faktornya dan level apa saja yang diuji cobakan.

2. Merancang percobaan

Setelah selesai dengan tahap persiapan, maka tahapan selanjutnya adalah merancang/ memilih desain percobaan. Disini kita menentukan level dan jumlah replikasi yang akan dilakukan.

3. Menjalankan percobaan (*Perform the experiment*)

Setelah membuat rancangan percobaan, tahapan selanjutnya adalah menjalankan percobaan tersebut untuk mendapatkan data yang nantinya akan diolah. Yang perlu diperhatikan adalah percobaan tersebut dilakukan secara acak/ random untuk mendapatkan hasil yang akurat dan menghindari adanya bias.

4. Analisis hasil percobaan (*Analyze data from the experiment*)

Dalam menganalisis data, kita perlu melakukan analisis secara statistik, antara lain dengan melakukan pengujian hipotesis sehingga kesimpulan yang

¹⁸ Douglas C. Montgomery, Op. Cit., hal. 372

¹⁹ Paul D. Berger dan Robert E. Murer, Op.Cit., hal.3.

didapatkan akan lebih valid dan akurat. Melalui analisis statistik, kita dapat mengetahui faktor yang mempengaruhi dalam suatu proses dan mengetahui konsistensi suatu proses. Metode statistik yang biasa digunakan dalam DOE adalah ANOVA (*analysis of variance*), yang dikembangkan oleh Sir Ronald Fisher. Terdapat piranti lunak (*software*) yang dapat digunakan untuk membantu menganalisis secara statistik. Metode grafik juga dapat digunakan untuk mendapatkan interpretasi hasil yang lebih baik dan menarik.

5. Mengkonfirmasi hasil percobaan (*Confirm the result of the experiment*)

Setelah kita mendapatkan kesimpulan dari percobaan, ada baiknya apabila kita melakukan verifikasi terhadap kesimpulan tersebut. Verifikasi berarti melakukan percobaan kembali untuk pembuktian akan kesimpulan yang kita dapatkan. Apabila hasil verifikasi kita sesuai dengan kenyataan yang ada, maka dapat dikatakan bahwa percobaan serta model matematis yang kita buat adalah valid.

6. Mengevaluasi kesimpulan percobaan (*Evaluate the conclusions of the experiment*)

Tahap terakhir ini adalah mengevaluasi keseluruhan percobaan yang kita lakukan. Evaluasi ini penting untuk dikembangkan apakah percobaan akan perlu terus dilakukan untuk masalah-masalah berikutnya atau untuk melihat apakah dari sisi ekonomi percobaan ini mungkin dilakukan kembali atau tidak.

2.2.8. Uji Hipotesis

Levin dan Robin mengatakan bahwa dalam pengujian hipotesis, kita perlu menentukan terlebih dahulu nilai parameter yang akan diasumsikan atau dihipotesiskan. Asumsi yang akan diuji disebut sebagai “*null hypothesis*” yang dilambangkan H_0 . Apabila sampel yang diambil tidak menerima (menolak) H_0 , berarti ada hipotesis alternatif yang akan diterima. Hipotesis alternatif yang akan diterima tersebut dilambangkan dengan H_1 ²⁰.

²⁰ Richard I. Levin dan David S. Rubin, “*Statistic for Management*”, Seventh Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1998, hal. 407

Setelah menetapkan hipotesis, langkah selanjutnya adalah menetapkan kriteria yang digunakan untuk menerima atau menolak *null hypothesis*. Kriteria ini dikenal sebagai tingkat signifikan (*significance level*). Apabila asumsi hipotesis benar, maka tingkat signifikan akan mengindikasikan persentase dari data-data sampel yang berada di luar batas. Tidak ada standar mengenai tingkat signifikan yang digunakan untuk menguji hipotesis, umumnya dalam penelitian digunakan tingkat signifikan 5 atau 1 persen. Perlu diingat bahwa, semakin tinggi tingkat signifikan yang digunakan, semakin besar pula probabilitas menolak suatu *null hypothesis* yang ternyata benar.

2.2.9. *Analysis of Variance* (ANOVA)

ANOVA adalah salah satu teknik yang memungkinkan kita menguji perbedaan variasi pengaruh satu faktor dari sampel yang diambil. Dengan menggunakan ANOVA, kita dapat menarik kesimpulan apakah sampel yang kita ambil akan memiliki kesamaan rata-rata atau tidak²¹. Ketika kita akan menggunakan ANOVA, kita harus mengasumsikan bahwa sampel yang diambil berasal dari populasi normal dan setiap populasi memiliki kesamaan variasi. Apabila dimodelkan, maka persamaan linear dari ANOVA adalah²²:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Dengan :

y_{ij} = hasil observasi yang ke $-ij$

$\mu + \tau_i$ = rata-rata hasil observasi pada pengamatan i

τ_i = banyaknya perlakuan yang mempengaruhi observasi

ε_{ij} = elemen pendukung atau sebuah eror acak yang memiliki distribusi normal, yaitu memiliki rata-rata nol dan varians yang konstan.

$i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, n$

²¹ Richard I. Levin dan David S. Rubin, "*Statistic for Management*", Seventh Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1998, hal. 536

²² Douglas C. Montgomery, Op. Cit., hal.67

ANOVA akan dibantu dengan uji hipotesis untuk melihat apakah sampel yang diuji menerima hipotesis nol atau sebaliknya. Uji hipotesis yang dipakai adalah :

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$, berarti tidak terdapat pengaruh / treatment terhadap hasil

$H_1 : \tau_1 \neq 0$, berarti ada pengaruh terhadap hasil

Selanjutnya dilakukan uji F (F-Test), yaitu :

$$F_0 = \frac{SS_{\text{treatment}}/(a-1)}{SSE/(N-a)} = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MSE}$$

Dengan terdistribusi secara F dan memiliki derajat kebebasan (a-1) dan (N-a) dimana a adalah banyaknya perlakuan, dan N adalah jumlah data observasi yang dimiliki. Aturan dalam pengambilan keputusan adalah :

Jika $F = F_{\alpha, a-1, N-a}$, menolak hipotesis nol

Jika $F < F_{\alpha, a-1, N-a}$, menerima hipotesis nol

Berdasarkan hal ini, jika ternyata F-test lebih kecil dari teori, maka akan menerima hipotesis nol, dan dapat disimpulkan bahwa tidak ada pengaruh.

Perhitungan analisis varians dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1. Perhitungan Analisis Varians

Source of Varians	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F-ratio
Treatments	a-1	$SS_{\text{treatment}}$	$MS_{\text{treatment}}$	$F = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MSE}$
Error	N-a	SS_E	MS_E	
Total	N-1	SS_v		

(Sumber : Douglas C. Montgomery, 2005)

2.2.10. Pengujian Model

Model adalah suatu representasi dari keadaan sebenarnya yang dibuat dalam suatu persamaan. Model yang digunakan dalam metode DOE ini adalah linear model, yang menunjukkan variabel respon yang di dapat dari suatu persamaan fungsi linear. Suatu model yang lengkap dari suatu percobaan harus mengikutsertakan asumsi error / kesalahan. Seperti yang telah di jelaskan sebelumnya dalam subbab ANOVA, bahwa persamaan/ model linear yang digunakan adalah :

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$$

ε_{ij} adalah saling independen (tidak bergantung) dengan $j = 1, \dots, I$: $i = 1, \dots, v$.

Untuk memeriksa model, maka pertama-tama data hasil percobaan perlu dikumpulkan. Suatu model yang baik sebaiknya memenuhi syarat bahwa error yang terjadi terdistribusi secara normal dengan rata-rata 0 dan variasi σ^2 . Pelanggaran terhadap asumsi dasar ini dapat diperiksa dengan nilai residual. Residual menunjukkan perbedaan nilai antara hasil observasi dengan hasil dari persamaan linear yang kita buat atau dengan kata lain menunjukkan berapa besar kesalahan yang terjadi.

$\hat{e} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$, dimana :

\hat{e} = besar nilai residual

y_{ij} = besar nilai pengamatan

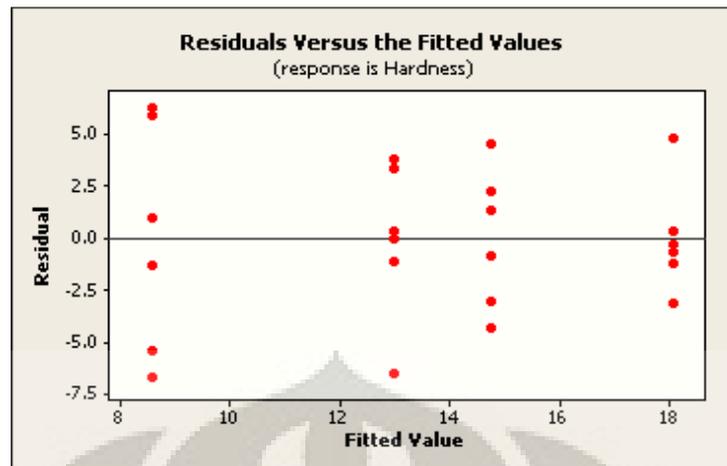
\hat{y}_{ij} = besar nilai dari estimasi *least square*

Beberapa langkah mengetahui apakah model yang kita buat baik untuk dianalisis atau tidak adalah sebagai berikut²³ :

- Memeriksa nilai outlier

Outlier adalah nilai percobaan yang jauh lebih besar atau kecil dari yang diharapkan. Outlier dapat ditunjukkan dari nilai residual yang bernilai positif atau negative yang terlalu besar. Suatu model dikatakan baik apabila 68% nilai dari standardized residuals (nilai residu yang telah distandarkan dengan standar deviasi) berbeda antara -1 dan +1 dan 95% di antara -2 dan +2 dan kira-kira 99,7% diantara -3 dan +3.

²³ Angela Dean dan Daniel Voss, Op. Cit, hal. 104.

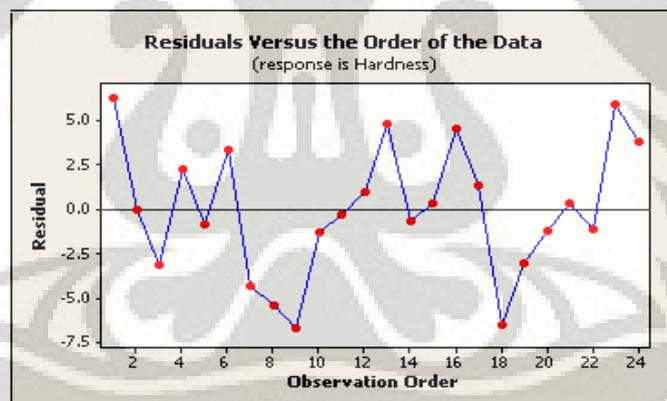


Gambar 2.3. Grafik Residual Outliers

(Sumber : *Design and Analysis of Experiment*, 2005)

- Memeriksa independence dari nilai residual

Hal ini diperlukan untuk mengetahui apakah percobaan yang dilakukan memberikan hasil yang independen satu sama lain. Asumsi ini bisa dilihat dari residual plot yang menunjukkan pola yang tersebar.

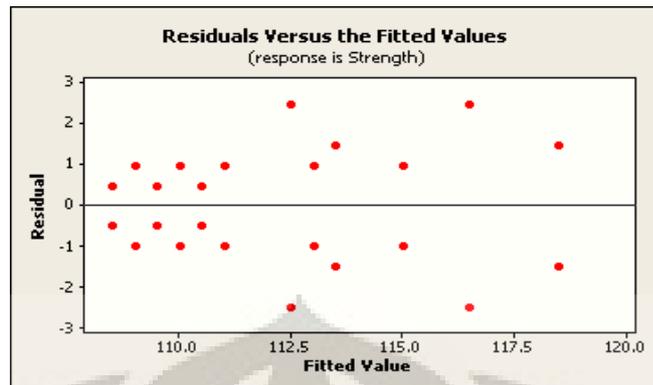


Gambar 2.4. Grafik Residual dengan Pola Tersebar

(Sumber : *Design and Analysis of Experiment* , 2005)

- Memeriksa variasi

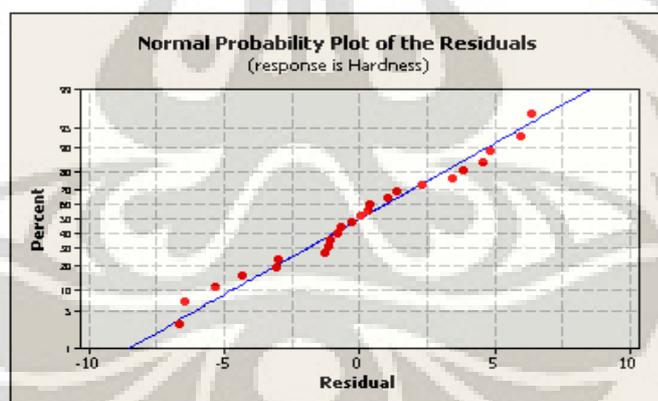
Model yang dihasilkan juga perlu diperiksa apakah memiliki variasi yang konstan dan teratur atau tidak. Apabila terdapat variasi yang terlalu besar, maka dapat dilakukan transformasi data untuk mengatasi masalah tersebut. Gambar berikut menunjukkan grafik residual yang memiliki variasi yang terlalu besar.



Gambar 2.5. Grafik Residual dengan Variasi Besar
(Sumber : *Design and Analysis of Experiment* , 2005)

- Memeriksa Normalitas

Asumsi bahwa variabel kesalahan/error terdistribusi secara normal dapat diperiksa dengan menggunakan normal probability plot. Data residual harus terdistribusi dengan normal, karena dengan demikian kita dapat mengatakan bahwa model yang kita miliki telah terverifikasi dan dapat ditarik suatu kesimpulan yang valid dari penelitian.



Gambar 2.6. Grafik Residual dari Distribusi Normal
(Sumber : *Design and Analysis of Experiment*, 2005)

Setelah dilakukan uji *null hypothesis* maka setelah itu dilakukan uji multiple comparison. Uji multiple comparison ini terdiri dari *Tukey's method*, *Fisher's least significant difference (LSD)*, dan *Hsu's multiple comparisons with the best (MCB)*.

Universitas Indonesia

- *Turkey's method*

Metode Turkey's digunakan dengan cara membandingkan mean (rata-rata) tiap faktor level dengan menggunakan family error rate untuk mengontrol rate dari type I error yang digunakan untuk dibandingkan. Metode ini menyesuaikan individual confident level berdasarkan family rate yang telah dipilih sebelumnya. Hasil yang di dapat berupa rentangan interval. Jika ternyata angka nol (0) masuk dalam interval tersebut maka mengindikasikan tidak adanya perbedaan yang signifikan. Namun, jika ternyata angka nol (0) tidak masuk dalam interval tersebut maka hasilnya mengindikasikan adanya perbedaan yang signifikan.

Contoh :

Paint = Blend 2 subtracted from:			
Paint	Lower	Center	Upper
Blend 3	-1.969	4.417	10.803
Blend 4	3.114	9.500	15.886

-16.0 -8.0 0.0 8.0

Dari perhitungan diatas dapat ditarik kesimpulan Blend 2 mempengaruhi/signifikan terhadap Blend 4 (terlihat dari intervalnya angka nol tidak masuk dalam interval tersebut).

- *Fisher's least significant difference (LSD)*

Metode Fisher's least significant difference (LSD) digunakan dengan cara membandingkan antara means (rata-rata) di tiap faktor dengan individual error rate yang dipilih. Hasil yang akan di dapatkan berupa rentangan interval. Hasil yang di dapat berupa rentangan interval. Jika ternyata angka nol (0) masuk dalam interval tersebut maka mengindikasikan tidak adanya perbedaan yang signifikan . Namun, jika ternyata angka nol (0) tidak masuk dalam interval tersebut maka hasilnya mengindikasikan adanya perbedaan yang signifikan.

Contoh :

dibandingkan dengan Blend 4 (18.067). Bandingkan antara mean yang terbesar dengan mean (rata-rata) tiap level. Ternyata dari perhitungan didapatkan adanya perbedaan yang signifikan antara Blend 4 dengan Blend2 dan Blend4 dengan Blend3.

2.2.11. Metode 3^k Factorial Design

Factorial design banyak digunakan untuk eksperimen yang mempunyai beberapa faktor. Factorial design dibutuhkan untuk mempelajari dan menguji secara statistic pengaruh dari faktor-faktor terhadap suatu respon dengan level yang berbeda-beda. Metode 3^k factorial design adalah salah satu metode yang digunakan dalam desain eksperimen untuk banyak faktor (k faktor) yang mana tiap faktor tersebut memiliki tiga level, yaitu²⁴ :

- Level *low* atau rendah (-1)
- Level *Intermediate* atau menengah (0)
- Level *High* atau Tinggi (1)

Dengan adanya tiga level faktor yang berbeda menyebabkan hubungan sebab akibat antara respon dengan faktor faktor dapat dimodelkan/digambarkan secara kuadratik (kurva). Metode 3^k factorial design biasanya digunakan untuk masalah optimasi. Metode ini cocok digunakan untuk keadaan/kondisi yang mana ada banyak faktor yang mempengaruhi respon.

Metode 3^k factorial design merupakan metode yang efisien karena tidak hanya melihat dari penyebab utama saja tetapi juga melihat dari penyebab lainnya yang berpengaruh. Caranya dengan mengkombinasikan faktor/level yang ada dan dari semua kombinasi faktor/level tersebut dipilih yang paling optimal.

²⁴ Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.347

Susunan Tabel ANOVA untuk 3^k factorial design dapat dilihat pada **Tabel 2.2**

Tabel 2.2. Tabel ANOVA untuk 3k Factorial Design

Sumber Variasi	SS	df	MS	Fo
Rata-rata		(k buah)		
A	SS_A	2	SS_A/df	MS_A/SS_E
B	SS_B	2	SS_B/df	MS_B/SS_E
:	:	:	:	:
k	SS_k	2	SS_k/df	MS_k/SS_E
Interaksi faktor		(2^k buah)		
AB	SS_{AB}	4	SS_{AB}/df	MS_{AB}/SS_E
AC	SS_{AC}	4	SS_{AC}/df	MS_{AC}/SS_E
:	:	:	:	:
jk	SS_{jk}	4	SS_{jk}/df	MS_{jk}/SS_E
Interaksi faktor		(2^k buah)		
ABC	SS_{ABC}	8	SS_{ABC}/df	MS_{ABC}/SS_E
ABD	SS_{ABD}	8	SS_{ABD}/df	MS_{ABD}/SS_E
:	:	:	:	:
ijk	SS_{ijk}	8	SS_{ijk}/df	MS_{ijk}/SS_E
Error	SS_E	$3^k (n-1)$	SS_E/df	MS_E
Total	SS_T	$(3^k \times n)-1$		

Analisa untuk 3^k factorial design dapat dilakukan dengan menggunakan pengujian statistic ANOVA. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut ²⁵:

a. Pembentukan model dasar 3^k factorial design

Pembentukan model dasar 3^k factorial design dilakukan dengan melihat tabel ANOVA, hasil pengolahan data menggunakan software Minitab. Koefisien-koefisien dari masing-masing variable baik yang signifikan maupun tidak signifikan dimasukkan ke dalam model dan disebut model dasar.

b. Pengujian 3^k factorial design

Pengujian 3^k factorial design dilakukan dengan menilai secara statistik hasil keseluruhan dari pengolahan data dengan menggunakan software

²⁵ Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.351

Minitab. Hal tersebut dilakukan dengan melihat nilai p value untuk menentukan faktor mana yang berpengaruh dan faktor mana yang tidak berpengaruh.

c. Perbaikan model 3^k factorial design

Perbaikan model 3^k factorial design dengan cara membuang faktor yang tidak signifikan dari model dasar tersebut. Setelah diperoleh model perbaikannya, dilakukan pengujian statistic dan dianalisa lagi seperti sebelumnya. Jika ada faktor daro P value mendekati atau lebih besar sedikit dari α , maka faktor ini untuk sementara tidak perlu dibuang. Setelah dilakukan perbaikan model dan ternyata nilai Pvalue nya mengalami penurunan dan lebih kecil dari α , maka faktor tesebut tetap dimasukan ke dalam model. Selain itu perbaikan model juga dapat dilihat dari nilai koefisieen determinasi (R^2_{adj}) sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan. Model dikatakan semakin baik jika nilai koefisien determinasinya meningkat.

2.2.12. Response Surface Method

Response surface adalah salah satu metode yang banyak digunakan untuk optimasi. Metode ini menggabungkan teknik matematika dengan teknik statistik untuk membuat dan menganalisa suatu respon (Y) yang dipengaruhi oleh beberapa variable bebas atau faktor (X) guna mengoptimalkan respon tersebut²⁶.

Response surface method merupakan metode dengan prosedur bertahap dalam mengidentifikasikan nilai optimal respon. Identifikasi nilai optimal respon dilakukan berdasarkan derajat polinomial dari model regresi suatu desain eksperimen. Apabila model regresinya polynomial derajat dua atau kuadratik (*second order model*) maka akan ada gambar kurva respon yang berarti telah didapati daerah respon optimal. Dari daerah respon optimal ini selanjutnya dapat ditentukan level faktor-faktor yang dapat menghasilkan suatu respon yang optimal. Apabila dari suatu desain eksperimen diperoleh model regresinya merupakan polynomial derajat satu atau linier (*first order model*) maka respon

²⁶ Tatsuyuki, Amago, “*Response Surface Methodology and Its application to automotive suspension designs*”, Toyota Central R&D Labs., Inc. 2005

belum optimal. Dengan kata lain respon diduga masih dapat dioptimalkan dengan mengubah (menaikkan/menurunkan) nilai level faktor-faktor.

Langkah-langkah penelitian dengan response surface method adalah sebagai berikut ²⁷:

- a. Studi literature response surface
- b. Menentukan faktor, jumlah dan range level.
- c. Menentukan respon dan mempelajari bagaimana mengukurnya.
- d. Menyusun rancangan eksperimen orde 1
- e. Melakukan eksperimen sesuai rancangan orde 1
- f. Mengolah hasil eksperimen orde 1
- g. Menentukan faktor signifikan.
- h. Menyusun rancangan eksperimen orde II
- i. Melakukan eksperimen sesuai rancangan orde II
- j. Mengolah hasil eksperimen orde II
- k. Menentukan titik stasioner atau titik optimum dari model orde II
- l. Menarik kesimpulan dan review secara keseluruhan.

Hubungan antara respon (Y) dan variable bebas (X) adalah :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) + \varepsilon$$

Keterangan :

Y = Variabel respon

X_j = Variabel bebas atau faktor (j=1,2,3,...,k)

ε = Error

Untuk mengetahui hubungan anatar Y dan X_j dapat dilakukan dengan menggunakan *first order model* dan *second order model*. *First order model* digunakan untuk mencari daerah optimum. *Second order model* digunakan untuk mencari titik optimum.

First order model :

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_j X_j + \varepsilon_j$$

Second order model :

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

²⁷ Ibid, hal 256

$$\varepsilon_j = \sum Y_i - Y$$

Keterangan :

β_0 = Koefisien regresi (koefisien konstan)

β_i = Koefisien regresi linier variable faktor ke-i

X_i = Variabel faktor ke-i

β_{ii} = Koefisien regresi kuadratik variable faktor ke-i

X_j = Variabel faktor ke-j

β_{ij} = Koefisien regresi interaksi antar variable faktor ke-i dan ke-j

ε = Kesalahan eksperimen

Apabila pada eksperimen awal diperoleh model regresi dengan nilai-nilai koefisien regresi dari perhitungan level faktor-faktor yang dikodekan (*coded variable factor*), maka level baru suatu faktor perlu diubah dahulu kedalam besaran level faktor yang sebenarnya (*natural variable factors*). Persamaan untuk mendapatkan besaran level faktor-faktor yang sebenarnya (*natural variable factors*) adalah sebagai berikut :

$$X_i = \frac{\text{Level eksplorasi } (\xi) - \text{Level normal}}{\text{Range level}}$$

Level eksplorasi baru dari suatu faktor digunakan dalam perlakuan-perlakuan dalam eksperimen first order model untuk mendapatkan respon yang paling optimal. Perlakuan yang dapat menghasilkan respon yang paling optimal ini selanjutnya ditetapkan sebagai perlakuan normal dalam eksperimen second order model

Eksperimen *second order* model membutuhkan augment design atau beberapa perlakuan tambahan (*axial run*). Tujuannya agar diperoleh kepastian adanya hubungan kuadratik pada model regresi eksperimen *second order* model. Penelitian ini menggunakan *Spherical Center Composite Design* (*Spherical CCD*) untuk menentukan jarak terhadap center point (α) yang akan dipakai dalam augment design. *Spherical CCD* merupakan metode yang sering digunakan karena sangat efisien dalam penyusunan *second order* model .

Rumus spherical CCD dalam penentuan α adalah sebagai berikut :

$$\alpha = \sqrt{k}$$

Keterangan :

α = jarak terhadap center point

k = Banyaknya faktor

Apabila dari eksperimen *second order* model ini diketahui adanya hubungan kuadratik (melalui model regresi atau gambar respon), maka selanjutnya dilakuakn penetapan nilai level suatu faktor (level faktor stasioner) yang dapat menghasilkan respon yang paling optimal (respon stasioner).

2.2.11.1. Metode *Steepest Ascent* dan *Steepest Descent*

Perubahan nilai level faktor-faktor dilakukan dengan menggunakan metode perubahan (kenaikan/penurunan) bertahap, yang sering disebut *steepest ascent/steepest descent*. Metode ini merupakan prosedur untuk bergerak naik (*steepest ascent*) maupun turu (*steepest descent*), tergantung dari tujuan respon. Jika respon yang diinginkan maksimum, maka dinamakan metode *steepest ascent*. Jika respon yang diinginkan minimum maka dinamakan *steepest descent*²⁸. Dasar dari metode ini adalah perbandingan koefisien regresi linear setiap faktor. Koefisien regresi linear yang mempunyai nilai absolute terbesar merupakan pembanding utama terhadap nilai koefisien regresi yang lainnya. Persamaan yang digunakan dalam *steepest ascent/steepest descent* adalah sebagai berikut :

$$\Delta X_i = \frac{\beta_i}{\beta_j / \Delta X_j} \quad ; i = 1, 2, \dots, k ; i \neq j$$

Keterangan :

β_i = Koefisien regresi faktor ke-i

β_j = Koefisien regresi dengan nilai absolute terbesar dari faktor ke-j

ΔX_j = Perubahan nilai level faktor ke-j (ditetapkan $\Delta X_j = 1$)

Nilai perubahan level suatu faktor akan dipergunakan pada eksperimen selanjutnya (eksperimen *second order* model) untuk mendapatkan level faktor-faktor yang dapat memberikan indikasi adanya kenaikan/penurunan respon.

²⁸ Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.406

Dalam penelitian ini yang diinginkan adalah respon minimum (tingkat kekeruhan minimum). Maka dari itu metode yang digunakan adalah *steepest descent*. Langkah-langkah untuk melakukan metode *steepest descent* adalah²⁹ :

- a. Menghitung delta (Δ) untuk masing-masing faktor dengan faktor pertama dijadikan sebagai dasar. Delta (Δ) dihitung berdasarkan koefisien dari masing-masing faktor first order model.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

$$\Delta X_1 = 1$$

$$\Delta X_2 = \beta_2 / \beta_1$$

$$\Delta X_3 = \beta_3 / \beta_1$$

$$\Delta X_k = \beta_k / \beta_1$$

- b. Melakukan eksperimen sesuai dengan delta (Δ) masing-masing faktor sampai tidak ada penurunan dari respon yang diinginkan.
- c. Menentukan titik optimum dari percobaan *steepest descent*.
- d. Titik optimum dari *steepest descent* dijadikan dasar untuk melakukan eksperimen second order model.
- e. Membuat second order model dari hasil pengolahan data eksperimen tersebut.

2.2.11.2. Penentuan Titik Optimum (Xs)

Dari second order model, dibuat matriks dari koefisien model tersebut.

$$b = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

Keterangan :

β_1 = Koefisien X_1

β_2 = Koefisien X_2

β_k = Koefisien X_k

²⁹ ²⁹ Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005, hal.410

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \frac{\beta_{12}}{2} & \dots & \dots & \frac{\beta_{1k}}{2} \\ \frac{\beta_{21}}{2} & \beta_{22} & \dots & \dots & \frac{\beta_{2k}}{2} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \frac{\beta_{k1}}{2} & \frac{\beta_{k2}}{2} & \dots & \dots & \beta_{kk} \end{bmatrix}$$

Keterangan :

β_{11} = Koefisien X_1^2

β_{22} = Koefisien X_2^2

β_{kk} = Koefisien X_k^2

$\beta_{12} = \beta_{21} =$ Koefisien X_1^2

$\beta_{1k} = \beta_{k1} =$ Koefisien X_{1k}

Rumus penentuan titik stasioner/titik optimum :

$$X_s = -1/2 \times B^{-1} \times b$$

Keterangan :

X_s = Titik stasioner / titik optimum

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Profil Perusahaan

Pengambilan data penelitian dilakukan di salah satu Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) di Tangerang

3.1.1. Gambaran Singkat IPAM

Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) di kota Tangerang ini bergerak di bidang pengelolaan air minum dan air kotor untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat yang mencakup aspek sosial, kesehatan, dan pelayanan umum. Dalam melaksanakan tugas pokok tersebut di atas, maka IPAM kota Tangerang bertujuan untuk :

- Mewujudkan dan meningkatkan pelayanan umum dalam memenuhi kebutuhan air minum di sebagian wilayah kota Tangerang
- Memperoleh pendapatan yang wajar agar perusahaan mampu mengembangkan diri sesuai dengan fungsinya.
- Menyelenggarakan pemanfaatan umum yang dapat dirasakan oleh masyarakat.

Untuk mencapai tujuan tersebut, perusahaan dapat melakukan hubungan kerjasama dengan pihak lain yang berkepentingan serta tidak merugikan. Sesuai dengan pihak kedudukan dan tujuan perusahaan, aktivitasnya antara lain

- Meneliti, merencanakan, membangun dan memelihara air, serta menjalankan operasi sumber-sumber air, pipa transmisi/distribusi, termasuk reservoir dan instalasi lainnya.
- Mengkoordinasi pembangunan instalasi air minum secara integral sejalan dengan pelaksanaan pembangunan di kota Tangerang.
- Penyediaan dan menyalurkan air yang cukup kepada konsumen langganan IPAM kota Tangerang serta pada tempat-tempat sistem penanggulangan kebakaran dan penyediaan air bersih untuk umum.

3.1.2. Kegiatan Usaha Perusahaan

3.1.2.1. Tugas Perusahaan

Tugas pokok IPAM tersebut adalah bergerak dalam bidang pengelolaan air bersih dan melayani sarana pembuangan air kotor (domestik) baik secara langsung maupun tidak langsung untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat mencakup aspek sosial, kesehatan dan pelayanan umum.

3.1.2.2. Fungsi Perusahaan

Dalam melaksanakan tugas pokok tersebut, IPAM menyelenggarakan fungsi-fungsi sebagai berikut :

- a. Melaksanakan pelayanan umum/jasa kepada masyarakat konsumen dan penyediaan air bersih dan sarana air kotor.
- b. Memupuk pendapatan untuk membiayai kelangsungan hidup perusahaan pembangunan daerah.

3.1.3. Visi dan Misi Perusahaan

3.1.3.1. Visi

Terpenuhinya kebutuhan masyarakat akan kuantitas, kontinuitas serta kualitas air bersih dan pelayanan air kotor dalam rangka meningkatkan derajat kesehatan masyarakat dalam wadah perusahaan yang sehat yang didukung oleh pegawai yang profesional memiliki etos kerja dan disiplin yang tinggi.

3.1.3.2. Misi

Adapun misi IPAM ini adalah:

- a. Meningkatkan pelayanan air bersih dan air kotor yang merata di seluruh wilayah pelayanan.
- b. Meningkatkan kinerja perusahaan dan kualitas SDM.
- c. Meningkatkan peran serta masyarakat dan swasta dalam pelayanan air bersih dan air kotor.

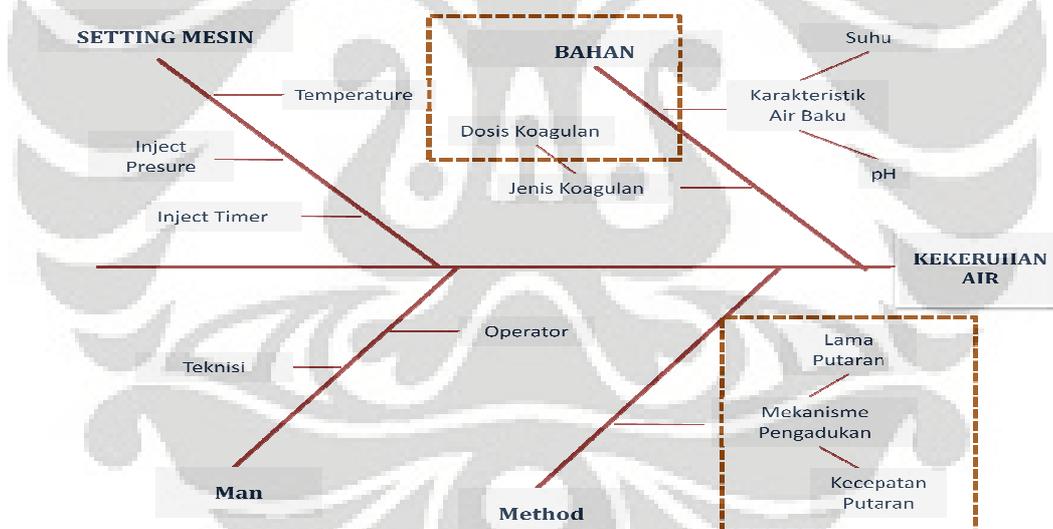
3.2. Perancangan dengan Metode *Design of Experiments* (DOE)

Topik penelitian ini seperti telah dijelaskan pada Bab pendahuluan adalah untuk :

1. Menentukan apakah penggunaan tawas dan resirkulasi lumpur alum (*double koagulan*) berbeda secara signifikan dengan hanya penggunaan tawas (*single koagulan*).
2. Menentukan parameter yang mempengaruhi kekeruhan air pada proses koagulasi-flokulasi.
3. Mencari level yang paling signifikan yang mempengaruhi kekeruhan air pada proses koagulasi-flokulasi.
4. Menentukan nilai optimum tiap faktor yang dapat mempengaruhi kekeruhan air pada proses koagulasi-flokulasi secara signifikan.

3.1.1. Penentuan Faktor Terkontrol

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekeruhan air pada proses koagulasi-flokulasi dapat dilihat pada Gambar Fish Bone dibawah ini.



Gambar 3.1. Fish Bone Diagram Penyebab Kekeruhan Air Pada Proses Koagulasi-Flokulasi

Pada tahap ini penulis melakukan diskusi dengan pihak IPAM. Dari hasil diskusi tersebut diperoleh 3 parameter yang berpengaruh dan diijinkan untuk diteliti dengan dilakukan eksperimen terhadap parameter tersebut. Parameternya adalah :

1. Dosis proporsi tawas dan resirkulasi lumpur alum (%)
2. Kecepatan pengadukan/putaran (rpm)
3. Waktu/lama putaran (menit)

3.1.2 Penentuan Level dari Faktor

Setelah didapatkan parameter yang akan diteliti, maka langkah selanjutnya adalah menentukan berapa level atau nilai dari parameter yang akan diteliti tersebut. Level level dari setiap faktor akan diperlihatkan pada Tabel 3.1 berikut

Tabel 3.1. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air

Faktor	Level
Dosis proporsi tawas dan resirkulasi lumpur alum (Dosis Koagulan)	30 % (30% tawas% & 70% resirkulasi lumpur alum)
	50 % (50% tawas% & 50% resirkulasi lumpur alum)
	70 % (70% tawas% & 30% resirkulasi lumpur alum)
Kecepatan pengadukan	60 rpm
	120 rpm
	180 rpm
Waktu/lama putaran	5 menit
	10 menit
	15 menit

(Sumber : IPAM, 2009)

Penentuan beberapa nilai untuk setiap faktor ini kembali didapatkan dari hasil diskusi dengan pihak IPAM. Pemilihan nilai-nilai tersebut didasarkan pada pengalaman bahwa selama ini *trial and error* yang dilakukan biasanya berkisar antara nilai-nilai tersebut.

3.1.3. Penentuan Variabel Respon

Variabel respon yang diteliti adalah tingkat kekeruhan air yang diukur dengan menggunakan alat turbidimeter. Satuan kekeruhan air adalah NTU (*Nephelometer*

Turbidity Unit). Variabel respon yang diinginkan adalah nilai kekeruhan air yang paling kecil.

3.1.4. Perancangan dengan Metode Design of Experiments (DOE)

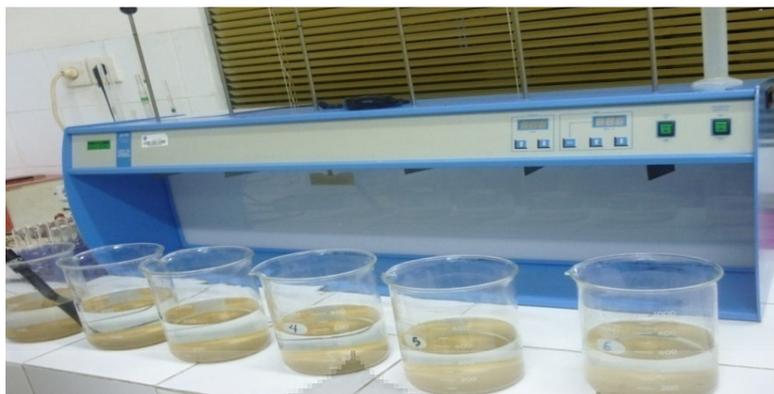
Metode yang akan digunakan untuk DOE adalah menggunakan metode 3^k *factorial design* dan untuk menentukan kondisi optimal menggunakan *Response Surface Methods* (RSM). Sebelum memulai percobaan, desain untuk eksperimen harus dibuat terlebih dahulu. Faktor-faktor dan level yang telah ditentukan harus dirancang untuk kemudian ditentukan pengacakan terhadap urutan eksperimen yang akan dilakukan. Jumlah percobaan yang akan dilakukan adalah $3^3 = 27$ kali percobaan, dengan 3 adalah jumlah faktor yang akan diuji. Replikasi percobaan dilakukan sebanyak tiga kali, sehingga total percobaan yang akan dilakukan adalah sebanyak 81 kali. Sebelum percobaan dilakukan, urutan data yang akan diambil juga harus mengalami pengacakan terlebih dahulu (*randomized*).

3.2. Pengumpulan Data Eksperimen

Urutan eksperimen yang dilakukan adalah berdasarkan urutan yang telah mengalami pengacakan (*randomized*). Pengacakan dilakukan dengan tujuan untuk menghindarkan terjadinya faktor yang tidak diinginkan muncul yang akan berpengaruh jika urutan percobaan dilakukan secara berurut.

Pengumpulan data dilakukan dengan cara penelitian langsung. Penelitian ini dilakukan di salah satu instalasi pengolahan air minum di kota Tangerang dengan menggunakan Jartest.

Jartest merupakan simulasi dari proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air minum. Gambar alat Jartes dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2. Alat Jar test

(Sumber : IPAM, 2009)

3.3. Pengolahan Data

Data-data yang diperoleh akan dimasukkan ke dalam penghitungan Minitab 15. Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap.

3.3.1. Penentuan Pengaruh Penggunaan *Single* Koagulan dan *Double* Koagulan

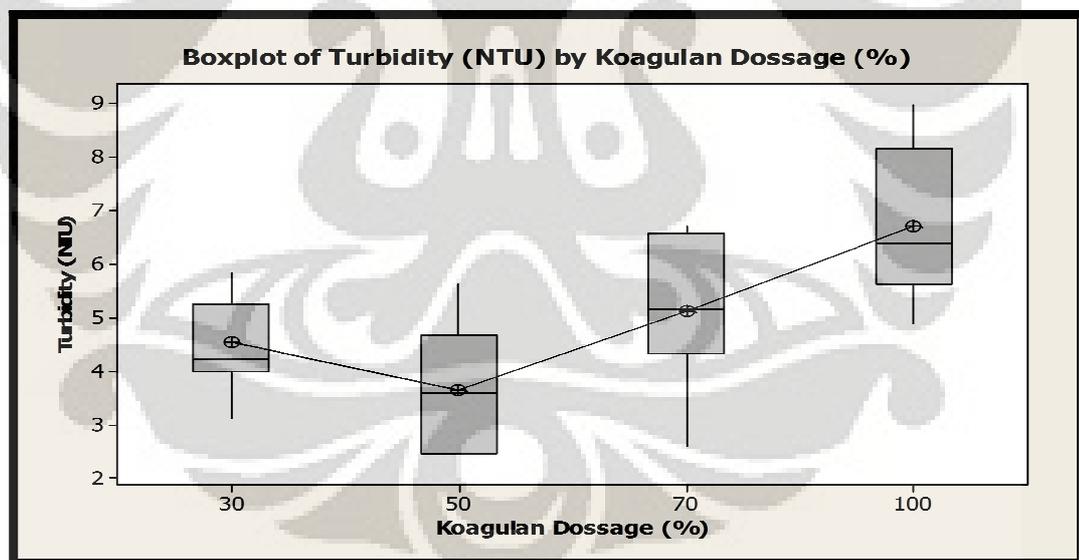
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh yang signifikan antara penggunaan koagulan tawas 100% (*single* koagulan) dengan penggunaan kombinasi koagulan tawas dan resirkulasi lumpur alum (*double* koagulan). Pengolahan data dengan bantuan piranti lunak, statistik Minitab. Data kekeruhan air dengan menggunakan koagulan tawas dan dengan menggunakan kombinasi koagulan tawas dan resirkulasi lumpur alum dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2. Data Kekeruhan Air dengan Single Koagulan dan Double Koagulan

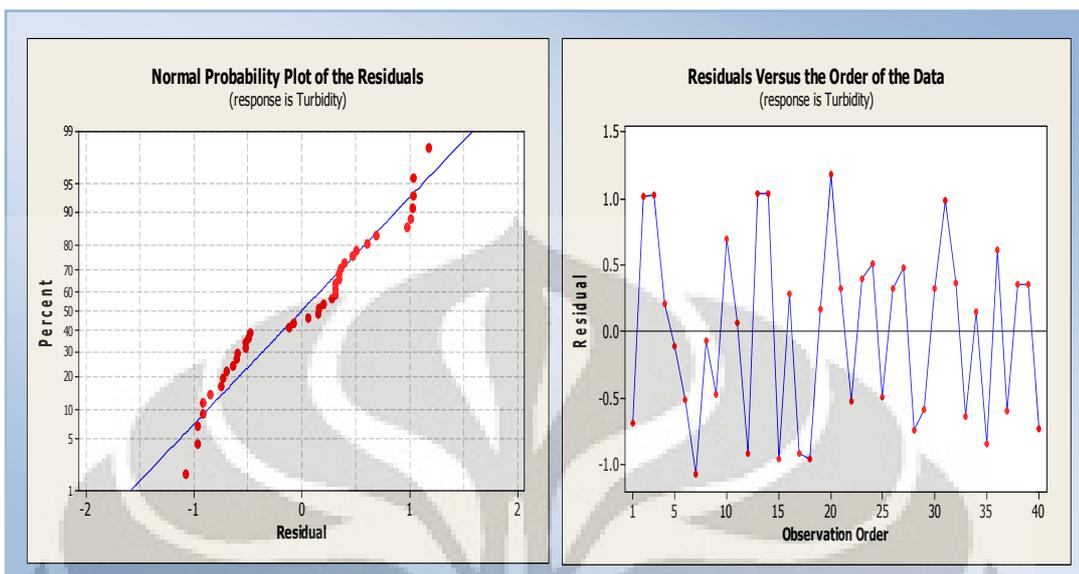
Replikasi	Kekeruhan Air dengan Koagulan Tawas 100% (NTU)	Kekeruhan Air dengan kombinasi Koagulan Tawas + Resirkulasi Lumpur Alum (NTU)		
		30%	50%	70%
1	6.27	5.82	3.45	5.59
2	7.98	5.2	2.61	4.61
3	7.99	4.2	3.53	6.56
4	7.17	4.99	3.64	6.56
5	6.85	3.99	2.64	4.56
6	6.45	5.45	3.45	5.81
7	5.89	4.24	3.61	4.61
8	6.89	5.19	2.39	4.56
9	6.49	5.19	2.54	5.69
10	7.66	4.11	3.45	6.71

(Sumber : IPAM, 2009)

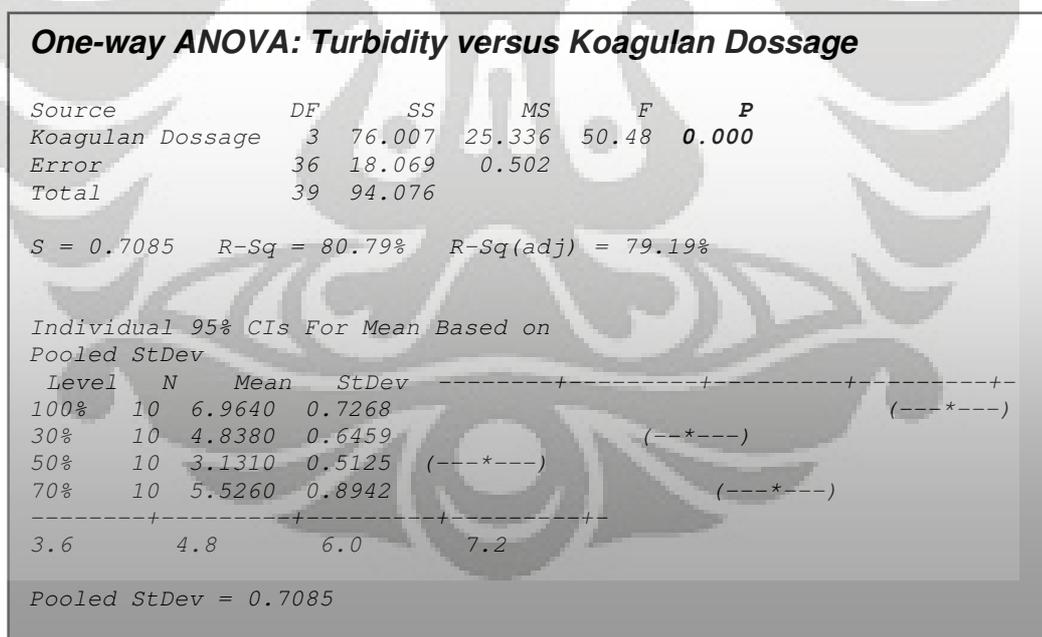
Data-data yang diperoleh diolah dengan Minitab 15, Maka hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut.

**Gambar 3.3.** Boxplot Kekeruhan Vs Dosis Koagulan

Untuk mengetahui residual eror untuk data-data diatas dapat dilihat pada grafik *probability of the residual* dan *residual versus the order of data* berikut ini



Gambar 3.4. Grafik probability of the residual dan residual versus the order of data



Gambar 3.5. Hasil Output Minitab 15 Terhadap Kekeruhan Vs Dosis Koagulan

- Uji Hipotesis

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2$$

Berarti tidak ada pengaruh yang signifikan antara penggunaan kombinasi dosis tawas dengan kekeruhan air

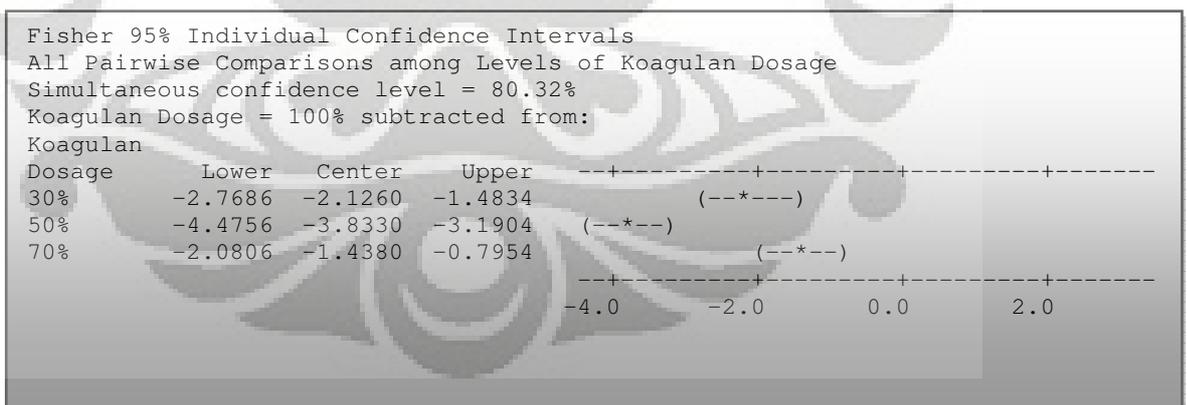
$$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2$$

Berarti ada pengaruh yang signifikan antara penggunaan kombinasi dosis tawas dengan kekeruhan air.

Untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan antara single koagulan dan double koagulan maka dilakukan analisis *Multiple Comparison* dengan menggunakan Uji Fisher, Terkey's dan Hsu's MCB (*Multiple Comparison With Best*).

- *Fisher / LSD*

Membandingkan rata-rata dari tiap faktor level dengan menggunakan *individual rate* yang dipilih. Dimana *family rate* lebih besar dibandingkan dengan *individual rate*. Dimana jika nol (0) tidak masuk dalam range maka hasilnya signifikan. Berikut Uji *Fisher* yang diperoleh berdasarkan perhitungan Minitab.



Gambar 3.6. Hasil Output Minitab 15 Uji Fisher Kekeruhan Vs Dosis Koagulan

3.3.2. Design Of Eksperimen 3^k Factorial Design

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh yang signifikan dari tiap faktor yang telah ditentukan terhadap respon, dan untuk mengetahui pula ada tidaknya interaksi dari tiap faktor. Faktor dan level dari tiap faktor dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air

Faktor	Level	Kode
Dosis Koagulan (X_1)	30%	-1
	50%	0
	70%	1
Kecepatan Pengadukan (X_2)	60 rpm	-1
	120 rpm	0
	180 rpm	1
Lama Pengadukan (X_3)	5 menit	-1
	10 menit	0
	15 menit	1

(Sumber : IPAM, 2009)

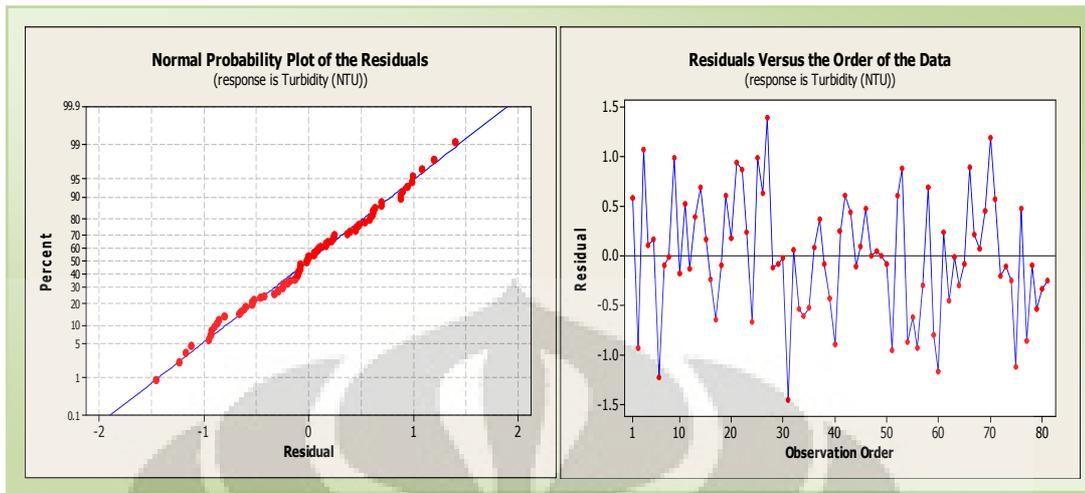
Data kekeruhan air dengan percobaan menggunakan tiga faktor dengan tiga level yang telah ditentukan dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4. Data Kekeruhan Air dengan 3^k Factorial

Dosis Tawas (%)	Kecepatan Putaran (rpm)								
	60			120			180		
	Waktu (minutes)			Waktu (minutes)			Waktu (minutes)		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
30	5.98	5.67	5.45	3.29	5.82	3.23	3.87	2.32	4.25
	5.98	5.01	4.64	5.17	4.2	2.98	3.65	3.13	3.44
	4.13	4.97	5.77	4.21	4.2	2.98	2	4.21	2.42
50	3.98	2.94	3.33	2.12	2.94	3.1	2.58	2.78	2.67
	3.71	3.12	2.45	3.03	3.64	2.98	2.55	2.98	2.91
	3.69	3.15	2.45	2.2	4.64	2.88	3.89	2.88	3.15
70	7.77	6.14	6.21	6.64	4.56	5.33	4.02	4.66	3.13
	8	5.3	5.34	5.13	5.16	4.97	5.89	5.98	5.45
	6.89	6.27	4.99	7.98	5.81	3.87	4.77	6.12	4.17

(Sumber : IPAM, 2009)

Hasil perhitungan minitab dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.9. Grafik probability of the residual dan residual versus the order of data

Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 3
 Base runs: 27 Total runs: 81
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3, 3, 3

General Linear Model: Turbidity (N versus Dossage, Rotation Spe, Time

Factor	Type	Levels	Values
Dossage	fixed	3	-1, 0, 1
Rotation Speed	fixed	3	-1, 0, 1
Time	fixed	3	-1, 0, 1

Analysis of Variance for Turbidity (NTU), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Dossage	2	85.4853	85.4853	42.7426	76.69	0.000
Rotation Speed	2	21.0422	21.0422	10.5211	18.88	0.000
Time	2	6.9547	6.9547	3.4773	6.24	0.004
Dossage*Rotation Speed	4	7.4043	7.4043	1.8511	3.32	0.077
Dossage*Time	4	5.0536	5.0536	1.2634	2.27	0.074
Rotation Speed*Time	4	4.1940	4.1940	1.0485	1.88	0.127
Dossage*Rotation Speed*Time	8	7.9567	7.9567	0.9946	1.78	0.100
Error	54	30.0948	30.0948	0.5573		
Total	80	168.1856				

Gambar 3.9. ANOVA 3^k Factorial Design

- Uji Hipotesis Untuk Faktor Dosis Koagulan

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti dosis koagulan tidak memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti dosis koagulan memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

$\alpha = 5\%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

Nilai P value = 0, maka tolak Ho

Kesimpulan : Dosis koagulan memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

- Uji Hipotesis Untuk Faktor Kecepatan Putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti kecepatan putaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti kecepatan putaran memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

$\alpha = 5\%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

Nilai P value = 0, maka tolak Ho

Kesimpulan : Kecepatan putaran memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

- Uji Hipotesis Untuk Faktor Lama Putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti lama putaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti lama putaran memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air
 $\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

Nilai P value = 0,004, maka tolak Ho

Kesimpulan : Lama putaran memberikan pengaruh yang signifikan dengan kekeruhan air

- Uji Hipotesis Untuk Interaksi Dosis Koagulan Vs Kecepatan putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti dosis koagulan dan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti dosis koagulan dan kecepatan putaran berinteraksi secara signifikan
 $\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika P value > 0.05

Nilai P value = 0,077, maka tolak Ho

Kesimpulan : Dosis koagulan dan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan.

- Uji Hipotesis Untuk Interaksi Dosis Koagulan Vs Lama putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti dosis koagulan dan lama putaran tidak berinteraksi secara signifikan

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti dosis koagulan dan lama putaran berinteraksi secara signifikan
 $\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

Nilai P value = 0,074, maka tolak H1

Kesimpulan : Dosis koagulan dan lama putaran tidak berinteraksi secara signifikan

- Uji Hipotesis Untuk Lama putaran Vs Kecepatan putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti lama putaran dan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti lama putaran dan kecepatan putaran berinteraksi secara signifikan

$\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

Nilai P value = 0,127, maka tolak H1

Kesimpulan : Lama putaran dan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan

- Uji Hipotesis Untuk Interaksi Dosis Koagulan Vs Kecepatan putaran vs Lama Putaran

Ho : $\tau_1 = \tau_2$

Berarti dosis koagulan ,kecepatan putaran dan lama putaran tidak berinteraksi secara signifikan

H1 : $\tau_1 \neq \tau_2$

Berarti dosis koagulan ,kecepatan putaran dan lama putaran berinteraksi secara signifikan

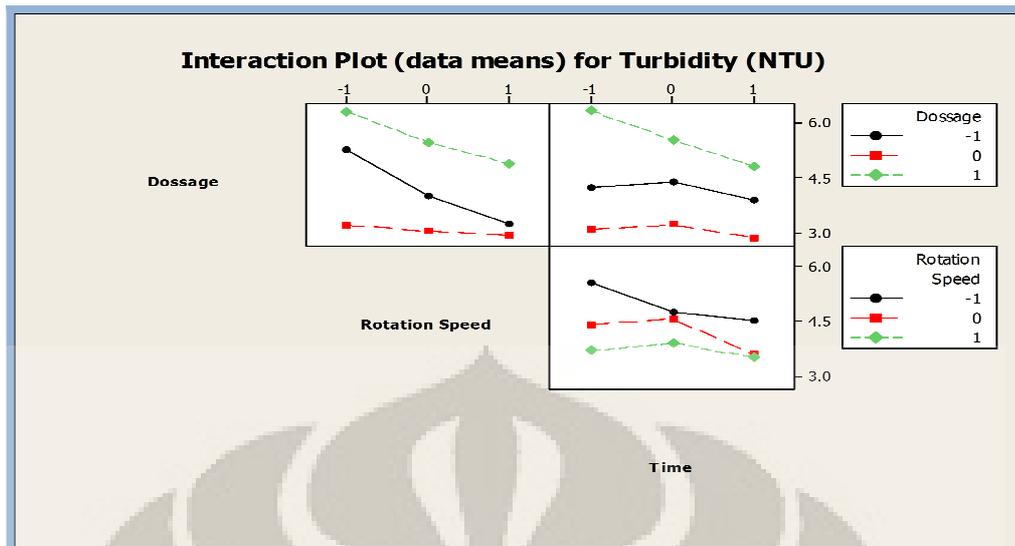
$\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika P value < 0.05

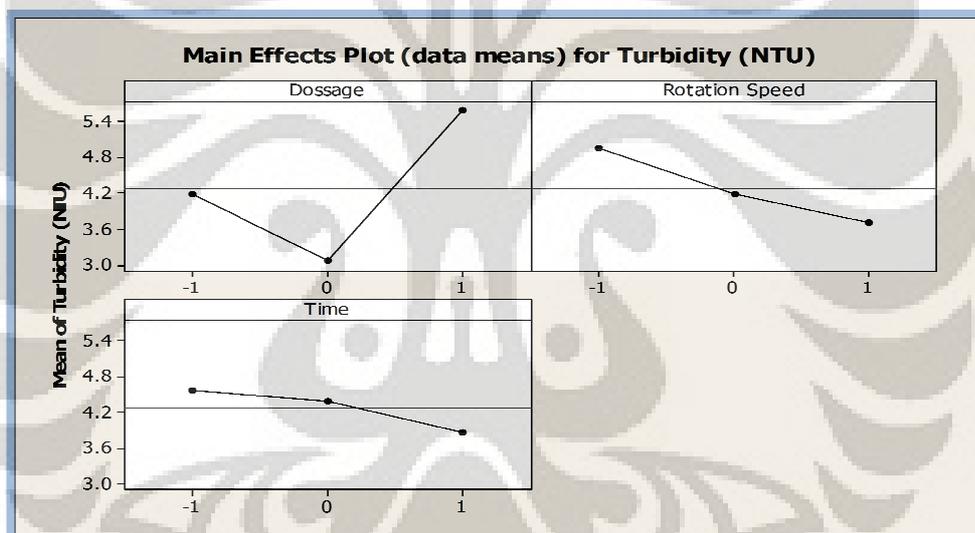
Nilai P value = 0,100, maka tolak H1

Kesimpulan : Dosis koagulan ,kecepatan putaran dan lama putaran tidak berinteraksi secara signifikan.

Interaksi dari ke tiga faktor dapat dilihat dari gambar dibawah ini.



Gambar 3.10. Grafik *Interaction Plot* untuk 3k factorial design



Gambar 3.11. Main Effect untuk 3k Factorial Design

3.3.3. Response Surface Method

Langkah pertama yang dilakukan adalah menyusun *first order model* dengan tujuan untuk mengetahui daerah optimum. Setelah daerah optimum diketahui, langkah kedua yaitu menyusun *second order model* dengan tujuan untuk mengetahui titik optimum.

3.3.3.1. First Order Model

Langkah pertama yang dilakukan pada *first order model* adalah menentukan faktor dan level dari tiap faktor. Level-level untuk percobaan ini ditentukan berdasarkan percobaan sebelumnya bahwa kekeruhan terendah terdapat pada level-level berikut. Tabel 3.5 berikut memperlihatkan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekeruhan air serta level dari tiap faktor.

Tabel 3.5. Faktor dan Level Tiap Faktor yang Berpengaruh terhadap Kekeruhan Air (RSM)

Faktor	Level	Kode
Dosis Koagulan (X_1)	35%	-1
	45%	0
	55%	1
Kecepatan Pengadukan (X_2)	60 rpm	-1
	120 rpm	0
	180 rpm	1
Lama Pengadukan (X_3)	5 menit	-1
	10 menit	0
	15 menit	1

(Sumber : IPAM, 2009)

Langkah selanjutnya adalah menentukan natural variables untuk dosis koagulan dilambangkan dengan ξ_1 , untuk faktor kecepatan pengadukan dilambangkan dengan ξ_2 , sedangkan untuk lama pengadukan dilambangkan dengan ξ_3 . *Coded variables* untuk masing masing faktor tersebut adalah sebagai berikut :

$$x_1 = \frac{\xi_1 - 45}{20} \quad x_2 = \frac{\xi_2 - 120}{60} \quad x_3 = \frac{\xi_3 - 10}{5}$$

Desain eksperimen untuk menyusun *first order model* dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel.3.6 . Data First Order Model (Box-Behnken Design)

<i>Natural variables</i>			<i>Coded Variables</i>			<i>Kekeruhan</i>
ξ_1	ξ_2	ξ_3	X1	X2	X3	Y
35%	60 rpm	10 menit	-1	-1	0	3.97
35%	180 rpm	10 menit	-1	1	0	2.14
55%	60 rpm	10 menit	1	-1	0	8.32
55%	180 rpm	10 menit	1	1	0	7.66
35%	120 rpm	5 menit	-1	0	-1	2.29
35%	120 rpm	15 menit	-1	0	1	3.29
55%	120 rpm	5 menit	1	0	-1	7.23
55%	120 rpm	15 menit	1	0	1	8.33
45%	60 rpm	5 menit	0	-1	-1	1.98
45%	60 rpm	15 menit	0	-1	1	2.58
45%	180 rpm	5 menit	0	1	-1	6.33
45%	180 rpm	15 menit	0	1	1	2.91
45%	120 rpm	10 menit	0	0	0	5.94
45%	120 rpm	10 menit	0	0	0	4.74
45%	120 rpm	10 menit	0	0	0	5.66

(Sumber : IPAM, 2009)

Untuk menjaga agar keragaman residual respon dari perlakuan-perlakuan tidak tergantung pada urutan observasi, maka dilakukan randomisasi. Tabel 3.7 dibawah ini memperlihatkan randomisasi yang dilakukan.

Tabel.3.7 . Randomisasi First Order Model (Box-Behnken Design)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Dosis	Kecepatan	Lama	Response
5	1	2	1	-1	0	-1	2.29
13	2	0	1	0	0	0	5.94
15	3	0	1	0	0	0	4.74
9	4	2	1	0	-1	-1	1.98
11	5	2	1	0	-1	1	2.58
12	6	2	1	0	1	1	2.91
4	7	2	1	1	1	0	7.66
1	8	2	1	-1	-1	0	3.97
6	9	2	1	1	0	-1	7.23
2	10	2	1	1	-1	0	8.32
7	11	2	1	-1	0	1	3.29
14	12	0	1	0	0	0	5.66
10	13	2	1	0	1	-1	6.33
3	14	2	1	-1	1	0	2.14
8	15	2	1	1	0	1	8.33

(Sumber : IPAM, 2009)

Response Surface Regression: (First Order Model)

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Turbidity Unit (Y)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5.44667	0.8263	6.592	0.001
Koagulan Dossage	2.48125	0.5060	4.904	0.004
Rotation Speed	0.27375	0.5060	0.541	0.612
Rotation Time	-0.09000	0.5060	-0.178	0.866
Koagulan Dossage*Koagulan Dossage	0.95542	0.7448	1.283	0.256
Rotation Speed*Rotation Speed	-0.87958	0.7448	-1.181	0.291
Rotation Time*Rotation Time	-1.11708	0.7448	-1.500	0.194
Koagulan Dossage*Rotation Speed	0.29250	0.7156	0.409	0.700
Koagulan Dossage*Rotation Time	0.02500	0.7156	0.035	0.973
Rotation Speed*Rotation Time	-1.00500	0.7156	-1.404	0.219

S = 1.431 R-Sq = 86.5% R-Sq(adj) = 62.3%

Analysis of Variance for Turbidity Unit (Y)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	65.7503	65.7503	7.3056	3.57	0.088
Linear	3	49.9171	49.9171	16.6390	8.12	0.023
Square	3	11.4483	11.4483	3.8161	1.86	0.253
Interaction	3	4.3848	4.3848	1.4616	0.71	0.585
Residual Error	5	10.2417	10.2417	2.0483		
Lack-of-Fit	3	9.4534	9.4534	3.1511	8.00	0.113
Pure Error	2	0.7883	0.7883	0.3941		
Total	14	75.9920				

Gambar 3.12. ANOVA First Order Model

Penyusunan *first order model* dibuat berdasarkan koefisien dari hasil pengolahan data diatas. *First order model* dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y = 5,44667 + 2,48125 X_1 + 0,27375 X_2 - 0,09000 X_3 + \varepsilon$$

Uji Lack of Fit (analisa dengan Pvalue)

Ho : *First order model* belum optimum

H1 : *First order model* optimum

$\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika Pvalue < 0,05

Nilai Pvalue = 0,133 > 0.05, Maka terima Ho

Kesimpulan : *First order model* belum optimum

First order model diatas belum optimum, maka langkah selanjutnya adalah mencari daerah optimumnya dengan menggunakan *steepest descent*. Alasan digunakan *steepest descent* karena respon yang diinginkan minimum

3.3.3.2. Steepest Descent

Berdasarkan koefisien dari masing-masing faktor pada first order model, Maka dihitung delta (Δ) untuk melakukan *steepest descent*. Dengan menjadikan Δ X1 sebagai dasar, maka didapatkan :

$$\Delta X1 = 1$$

$$\Delta X2 = \frac{0,27375}{2,48125} = 0.110 = 0,11$$

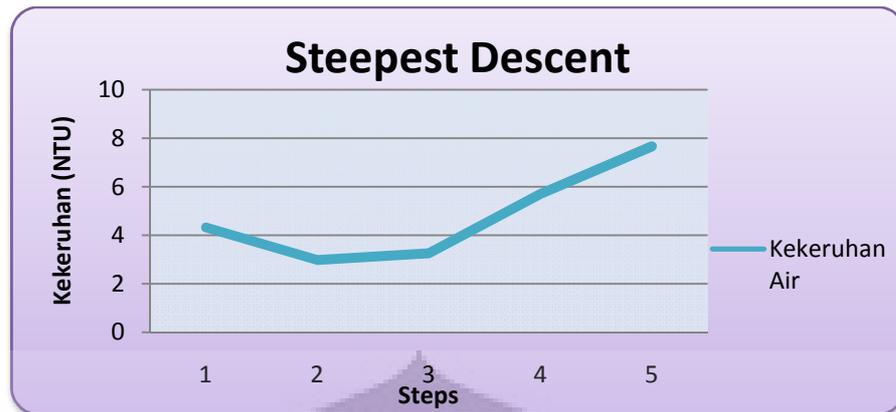
$$\Delta X3 = \frac{0,09000}{0,27375} = 0.328 = 0.33$$

Langkah selanjutnya adalah melakukan percobaan berdasarkan Δ dari masing masing faktor. Prosedur percobaan dilakukan seperti percobaan sebelumnya. Hasil percobaan dapat dilihat pada Tabel 3.8. dan grafiknya dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.

Tabel 3.8 Hasil Percobaan Steepest Descent Kekeruhan Air.

<i>Steps</i>	<i>Coded Variables</i>			<i>Natural variables</i>			Response Kekeruhan (NTU)
	X1	X2	X3	ξ_1	ξ_2	ξ_3	Y
Origin	0	0	0	45	120	10	
Δ	1	0.11	0.33	10	7	2	
Origin + 0.5 Δ	0.5	0.055	0.165	50	123	11	4.32
Origin + 1 Δ	1	0.11	0.33	55	127	12	2.98
Origin + 1.5 Δ	1.5	0.165	0.495	60	130	12	3.25
Origin + 2 Δ	2	0.22	0.66	65	133	13	5.7
Origin + 2.5 Δ	2.5	0.275	0.825	70	137	14	7.67

(Sumber : IPAM, 2009, telah diolah kembali)



Gambar 3.13 . Grafik Steepest Descent Kekeruhan Air
(Sumber : IPAM, 2009, telah diolah kembali)

Dari gambar diatas terlihat bahwa kekeruhan air terendah diperoleh pada saat :

$$\xi_1 = 55 \%$$

$$\xi_2 = 127 \text{ rpm}$$

$$\xi_3 = 12 \text{ menit}$$

Setelah diperoleh titik dengan kekeruhan air terendah, maka dilakukan rancangan percobaan lagi dengan dasar titik tersebut. Kode level nilai X_1 , X_2 dan X_3 setelah *steepest descent* dapat dilihat pada Tabel 3.9

Tabel 3.9. Kode Level Nilai X_1 , X_2 dan X_3 Setelah Steepest Descent

Faktor	Level	Kode
Dosis Koagulan (X_1)	45%	-1
	55%	0
	65%	1
Kecepatan Pengadukan (X_2)	77 rpm	-1
	127 rpm	0
	177 rpm	1
Lama Pengadukan (X_3)	7 menit	-1
	12 menit	0
	17 menit	1

(Sumber : IPAM, 2009, telah diolah kembali)

Natural variables untuk dosis koagulan dilambangkan dengan ξ_1 , untuk faktor kecepatan pengadukan dilambangkan dengan ξ_2 , sedangkan untuk lama pengadukan dilambangkan dengan ξ_3 . *Coded variables* untuk masing masing faktor tersebut adalah sebagai berikut :

$$x_1 = \frac{\xi_1 - 55}{10} \quad x_2 = \frac{\xi_2 - 127}{50} \quad x_3 = \frac{\xi_3 - 12}{5}$$

Replikasi pada data kekeruhan air dilakukan sebanyak lima kali. Desain eksperimen untuk menyusun *second first-order model* dapat dilihat pada Tabel 3.10

Tabel 3.10. Data *Second First-Order Model* untuk Kekeruhan Air.

Natural variables			Coded Variables			Kekeruhan
ξ_1	ξ_2	ξ_3	X_1	X_2	X_3	Y
45%	177 rpm	12 menit	-1	-1	0	4.25
45%	77 rpm	12 menit	-1	1	0	3.24
65%	177 rpm	12 menit	1	-1	0	6.42
65%	77 rpm	12 menit	1	1	0	5.12
45%	127 rpm	7 menit	-1	0	-1	4.11
45%	127 rpm	17 menit	-1	0	1	4.53
65%	127 rpm	7 menit	1	0	-1	5.95
65%	127 rpm	17 menit	1	0	1	6.12
55%	177 rpm	7 menit	0	-1	-1	3.23
55%	177 rpm	17 menit	0	-1	1	3.54
55%	77 rpm	7 menit	0	1	-1	2.4
55%	77 rpm	17 menit	0	1	1	2.56
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	3.33
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	2.98
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	3.2

(Sumber : IPAM, 2009, telah diolah kembali)

Untuk menjaga agar keragaman residual respon dari perlakuan-perlakuan tidak tergantung pada urutan observasi, maka dilakukan randomisasi. Tabel 3.11 dibawah ini memperlihatkan randomisasi yang dilakukan.

Tabel.3.11 . Randomisasi Second First Order Model (Box-Behnken Design)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Koagulan	Rotation	Rotation	Response
3	1	2	1	-1	1	0	3.24
14	2	0	1	0	0	0	3.33
6	3	2	1	1	0	-1	5.95
10	4	2	1	0	1	-1	2.4
2	5	2	1	1	-1	0	6.42
15	6	0	1	0	0	0	2.98
5	7	2	1	-1	0	-1	4.11
11	8	2	1	0	-1	1	3.54
13	9	0	1	0	0	0	3.2
7	10	2	1	-1	0	1	4.53
1	11	2	1	-1	-1	0	4.25
12	12	2	1	0	1	1	2.56
8	13	2	1	1	0	1	6.12
9	14	2	1	0	-1	-1	2.4
4	15	2	1	1	1	0	5.12

(Sumber : IPAM, 2009, telah diolah kembali)

Hasil pengolahan data menggunakan Minitab dapat dilihat pada Gambar 3.14 berikut ini

Response Surface Regression: (Second First-Order Model)						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Y						
Term		Coef	SE Coef	T	P	
Constant		3.17000	0.6150	5.154	0.004	
Koagulan Dosage		-2.19000	0.3766	-5.815	0.002	
Rotation Speed		-0.89000	0.3766	-2.363	0.065	
Rotation Time		-0.11750	0.3766	-0.312	0.768	
Koagulan Dosage*Koagulan Dosage		1.16625	0.5544	2.104	0.089	
Rotation Speed*Rotation Speed		0.42125	0.5544	0.760	0.482	
Rotation Time*Rotation Time		0.09125	0.5544	0.165	0.876	
Koagulan Dosage*Rotation Speed		0.42750	0.5326	0.803	0.459	
Koagulan Dosage*Rotation Time		0.18750	0.5326	-0.352	0.739	
Rotation Speed*Rotation Time		-0.28750	0.5326	-0.540	0.613	
S = 1.065 R-Sq = 90.1% R-Sq(adj) = 72.2%						
Analysis of Variance for Y						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	51.4505	51.4505	5.7167	5.04	0.045
Linear	3	44.8161	44.8161	14.9387	13.16	0.008
Square	3	5.4321	5.4321	1.8107	1.60	0.302
Interaction	3	1.2023	1.2023	0.4008	0.35	0.790
Residual Error	5	5.6737	5.6737	1.1347		
Lack-of-Fit	3	5.6111	5.6111	1.8704	59.76	0.017
Pure Error	2	0.0626	0.0626	0.0313		
Total	14	57.1242				

Gambar 3.14. ANOVA Second First Order Model

Dari Koefisien diatas, dapat ditulis *second-first order model* sebagai berikut :

$$Y = 3,17000 - 2,19000 X_1 + 0,89000 X_2 - 0,11750 X_3 + \varepsilon$$

Uji Lack of Fit (analisa dengan Pvalue)

Ho : *First order model* belum optimum

H1 : *First order model* optimum

$\alpha = 5 \%$

Tolak Ho jika Pvalue < 0,05

Nilai Pvalue = 0,017 < 0.05, Maka tolak Ho

Kesimpulan : *Second First-order model* optimum

3.3.3.3. *Second Order Model*

Data untuk menyusun *second order model* beserta *augment* designnya dapat dilihat pada Tabel 3.12 berikut ini.

Tabel 3.12 . Data Second Order Model

<i>Natural variables</i>			<i>Coded Variables</i>			Kekeruhan
ξ_1	ξ_2	ξ_3	X ₁	X ₂	X ₃	Y
45%	77 rpm	12 menit	-1	-1	0	4.25
45%	177 rpm	12 menit	-1	1	0	3.24
65%	77 rpm	12 menit	1	-1	0	6.42
65%	177 rpm	12 menit	1	1	0	5.12
45%	127 rpm	7 menit	-1	0	-1	4.11
45%	127 rpm	17 menit	-1	0	1	4.53
65%	127 rpm	7 menit	1	0	-1	5.95
65%	127 rpm	17 menit	1	0	1	6.12
55%	77 rpm	7 menit	0	-1	-1	3.23
55%	77 rpm	17 menit	0	-1	1	3.54
55%	177 rpm	7 menit	0	1	-1	2.4
55%	177 rpm	17 menit	0	1	1	2.56
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	3.33
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	2.98
55%	127 rpm	12 menit	0	0	0	3.2
72.32 \approx 72%	127 rpm	12 menit	1.732*	0	0	7.56
37.68 \approx 38%	127 rpm	12 menit	-1.732*	0	0	4.12
55%	213.6 \approx 213	12 menit	0	1.732*	0	2.98
55%	40.4 \approx 40	12 menit	0	-1.732*	0	3.09
55%	127 rpm	13.66 \approx 14	0	0	1.732*	4.27
55%	127 rpm	3.34 \approx 3	0	0	-1.732*	5.78

$$*\alpha = \sqrt{k} = \sqrt{3} = 1.732$$

Hasil pengolahan data menggunakan Minitab dapat dilihat pada Gambar 3.15 berikut ini

Response Surface Regression: Second Order Model

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Y

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.2520	0.4066	7.999	0.000
X1	1.6625	0.3623	4.589	0.001
X2	-0.5333	0.3623	-1.472	0.169
X3	-0.1924	0.3623	-0.531	0.606
X1*X1	3.1906	0.6880	4.638	0.001
X2*X2	-0.3289	0.6880	-0.478	0.642
X3*X3	1.5283	0.6880	2.221	0.048
X1*X2	-0.2175	1.1739	-0.185	0.856
X1*X3	-0.1875	1.1739	-0.160	0.876
X2*X3	-0.1125	1.1739	-0.096	0.925

S = 0.7827 R-Sq = 83.4% R-Sq(adj) = 69.8%

Analysis of Variance for Y

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	33.8798	33.8798	3.76442	6.15	0.003
Linear	3	14.3990	14.3990	4.79968	7.84	0.004
Square	3	19.4385	19.4385	6.47949	10.58	0.001
Interaction	3	0.0423	0.0423	0.01409	0.02	0.995
Residual Error	11	6.7382	6.7382	0.61256		
Lack-of-Fit	9	6.6756	6.6756	0.74173	23.70	0.041
Pure Error	2	0.0626	0.0626	0.03130		
Total	20	40.6180				

Gambar 3.15. ANOVA Second Order Model

Penyusunan *Second order model* dibuat berdasarkan koefisien dari hasil pengolahan data diatas. Second order model dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y = 3.2520 + 1.6625 X_1 - 0.5333 X_2 - 0.1924 X_3 + 3.1906 X_1^2 - 0.3289 X_2^2 + 1.5283 X_3^2 - 0.2175 X_1 X_2 - 0.1875 X_1 X_3 - 0.1125 X_2 X_3$$

3.3.3.4. Penentuan Titik Optimum

Dari koefisien pada *second order model* dapat dibuat matriks untuk penentuan titik optimumnya.

$$b = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

Keterangan : β_1 = Koefisien X_1 ;

β_2 = Koefisien X_2 ;

β_k = Koefisien X_k

Maka,
$$b = \begin{bmatrix} 1.6625 \\ -0.5333 \\ -0.1924 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \frac{\beta_{12}}{2} & \dots & \frac{\beta_{1k}}{2} \\ \frac{\beta_{21}}{2} & \beta_{22} & \dots & \frac{\beta_{2k}}{2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\beta_{k1}}{2} & \frac{\beta_{k2}}{2} & \dots & \beta_{kk} \end{bmatrix}$$

Maka,
$$B = \begin{bmatrix} 3.1906 & -0.10875 & -0.09375 \\ -0.10875 & -0.3289 & -0.05625 \\ -0.09375 & -0.05625 & 1.5283 \end{bmatrix}$$

Rumus penentuan titik stasioner atau titik optimum :

$$X_s = -1/2 \times B^{-1} \times b$$

$$= -1/2 \times \begin{bmatrix} 3.1906 & -0.10875 & -0.09375 \\ -0.10875 & -0.3289 & -0.05625 \\ -0.09375 & -0.05625 & 1.5283 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 1.6625 \\ -0.5333 \\ -0.1924 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.2845 \\ -0.7199 \\ 0.0190 \end{bmatrix}$$

Dari matriks diatas dapat diperoleh ξ_1 , ξ_2 dan ξ_3

$$x_1 = \frac{\xi_1 - 55}{10} \quad x_2 = \frac{\xi_2 - 127}{50} \quad x_3 = \frac{\xi_1 - 12}{5}$$

$$-0.2845 = \frac{\xi_1 - 55}{10} \quad -0.7199 = \frac{\xi_2 - 127}{50} \quad 0.0190 = \frac{\xi_1 - 12}{5}$$

$$\xi_1 = 52.155 \quad \xi_2 = 91.005 \quad \xi_3 = 12.23$$

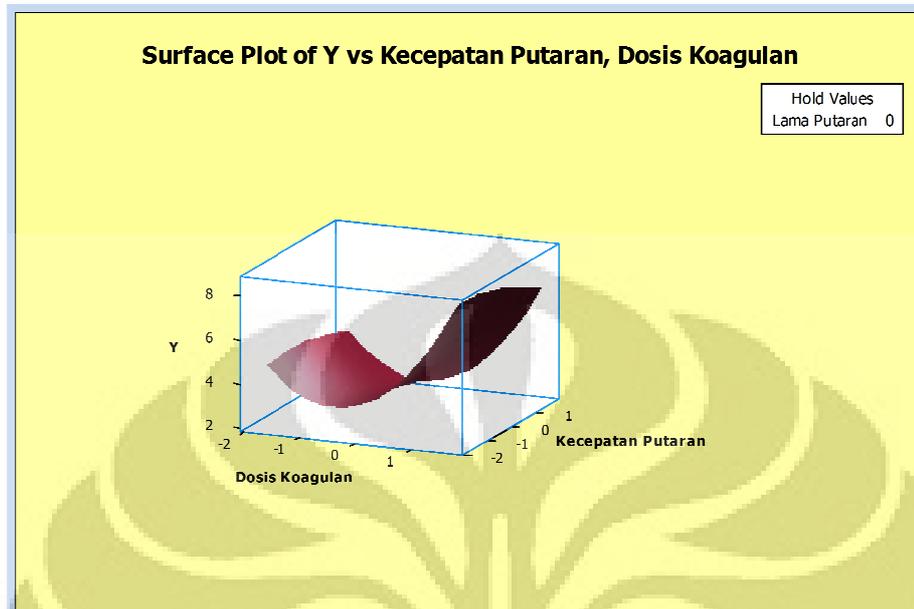
Titik optimum diperoleh pada saat

$$\xi_1 = 52 \%$$

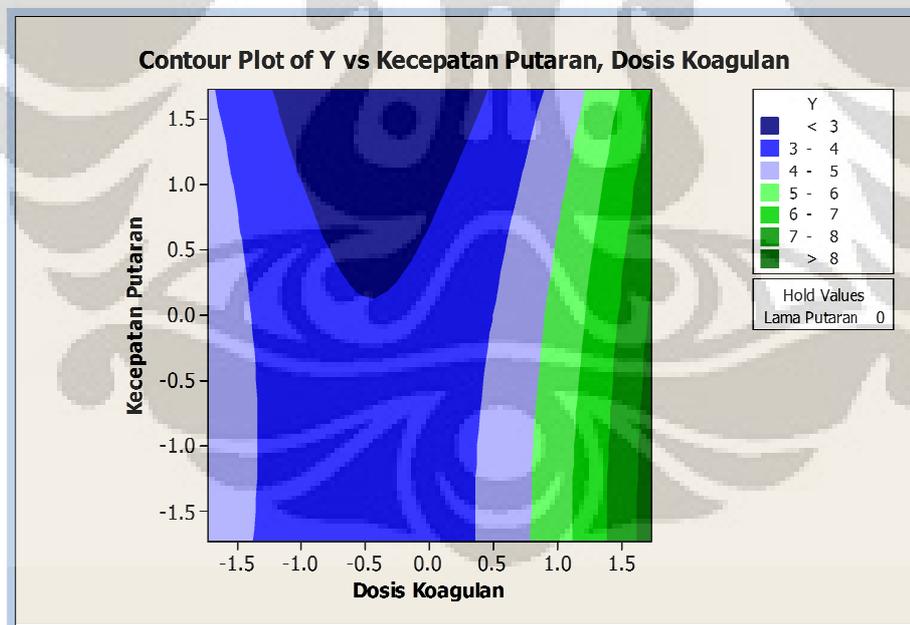
$$\xi_2 = 91 \text{ rpm}$$

$$\xi_3 = 12 \text{ menit}$$

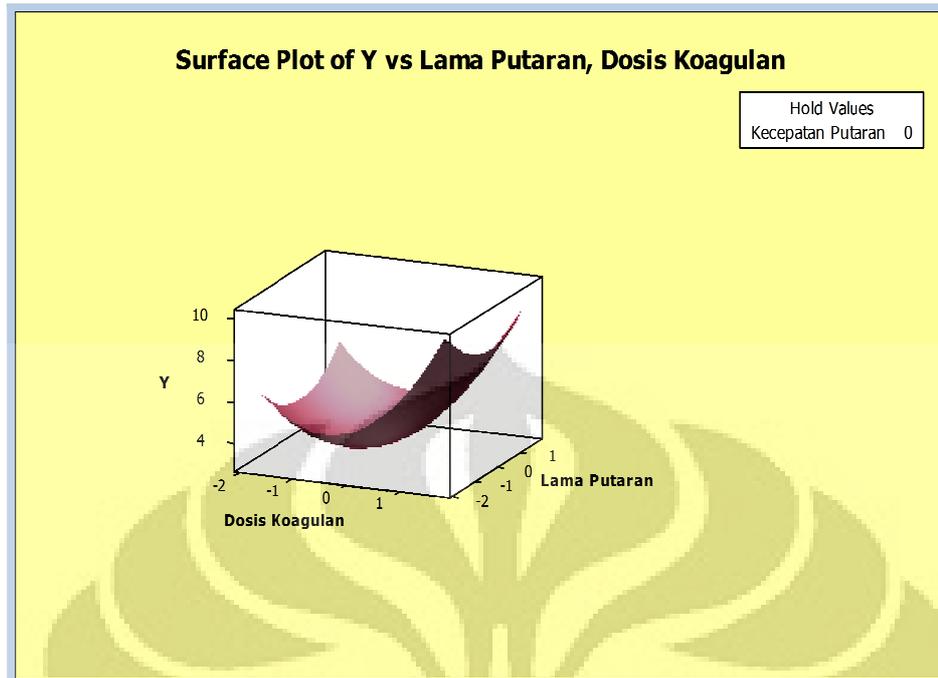
Surface Plot dan Countor Plot tiap tiap faktor dapat dilihat pada Gambar 3.16-3.22 dibawah ini.



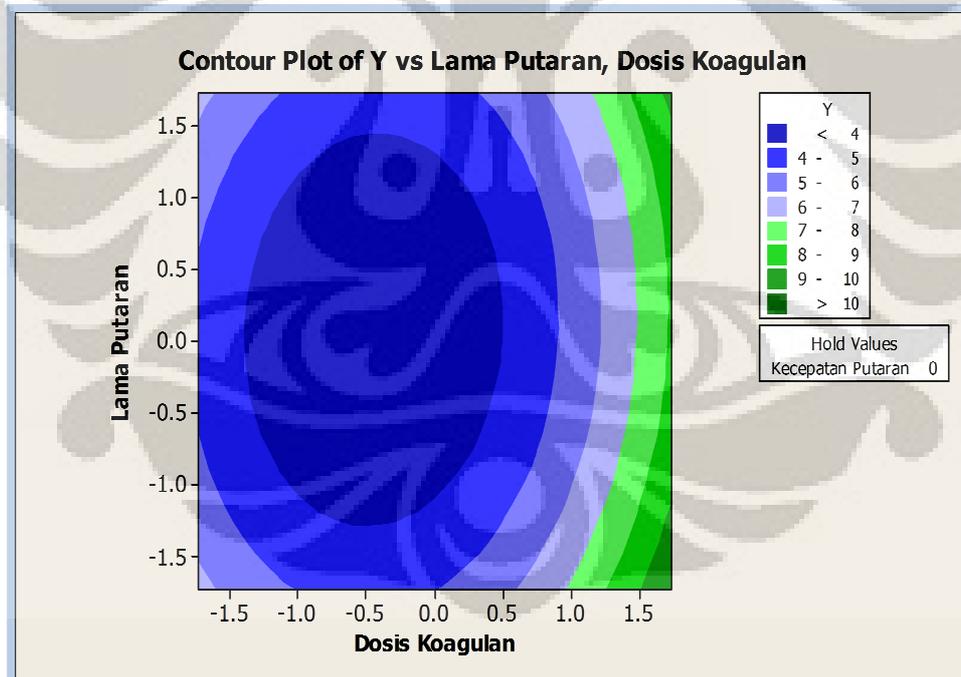
Gambar 3.16. *Surface Plot* Kekeruhan vs Kecepatan Putaran, Dosis Koagulan



Gambar 3.17. *Countour Plot* Kekeruhan vs Kecepatan Putaran, Dosis Koagulan



Gambar 3.18. *Surface Plot* Kekeruhan vs Lama Putaran, Dosis Koagulan



Gambar 3.19. *Countour Plot* Kekeruhan vs Lama Putaran, Dosis Koagulan

BAB 4 PEMBAHASAN

4.1 Analisa ANOVA *Single Koagulan vs Double Koagulan*

4.1.1. Analisa Grafik Residual

Untuk melihat apakah suatu eksperimen valid untuk diuji atau tidak, maka dilakukan uji normality probability plot of residual. Data yang baik adalah data yang memenuhi kriteria yang diminta oleh uji tersebut. Uji normalitas diperlukan untuk mengetahui apakah model eksperimen yang kita buat telah mengikuti asumsi normalitas. Data residual harus terdistribusi secara normal, karena dengan demikian kita dapat mengatakan bahwa model yang kita miliki telah terverifikasi dan dapat ditarik suatu kesimpulan yang valid dari penelitian. Data yang ada pada plot normal probability sebaiknya mendekati sepanjang garis yang ada, karena hal itu berarti data residual terdistribusi dengan normal.

Selain memeriksa normalitas diharuskan pula memeriksa independence dari nilai residual berdasarkan grafik residual vs the order of data. Hal ini diperlukan untuk mengetahui apakah percobaan yang dilakukan memberikan hasil yang independen satu sama lain. Grafik residual vs the order of data juga menunjukkan seberapa acak dan terdistribusinya data residual yang ada. Grafik tersebut menunjukkan apakah urutan observasi yang ada mempengaruhi eksperimen atau tidak. Asumsi ini bisa dilihat dari residual plot yang menunjukkan pola yang tersebar.

Berdasarkan **Gambar 3.4.** dapat disimpulkan bahwa residual atau error berdistribusi normal. Hal tersebut dapat dilihat dari plot gambar yang mendekati bentuk garis lurus, maka asumsi kenormalan terpenuhi. Berdasarkan grafik residual versus the order of data dapat diketahui bahwa asumsi independen terpenuhi. Hal tersebut dapat diketahui dari nilai residual respon tidak tergantung pada urutan perolehan respon (urutan observasi). Dapat dilihat pula bahwa plot urutan data tidak cenderung naik atau turun maka dapat dikatakan asumsi independen terpenuhi.

4.1.2 Analisa Faktor dan Interaksinya

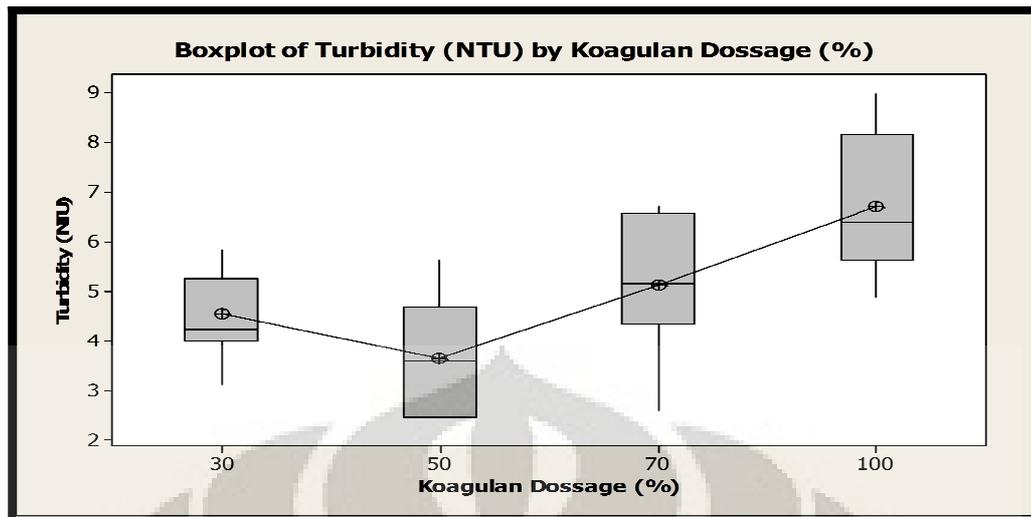
Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan rancangan One Way ANOVA dan replikasi dilakukan sebanyak 10 kali. Sehingga total percobaan adalah 40 kali, dapat dilihat pada **Tabel 3.2**.

ANOVA adalah salah satu teknik yang memungkinkan kita menguji pengaruh faktor dari sampel yang diambil. Dari tabel ANOVA, dapat diketahui faktor yang berpengaruh dari model yang dibuat melalui indikator p-value. Dengan menggunakan $\alpha = 5\%$ maka apabila p-value ≤ 0.05 , maka faktor tersebut signifikan berpengaruh secara statistik atau menolak hipotesis nol. Sedangkan jika p-value > 0.05 , maka faktor tersebut tidak signifikan berpengaruh (menerima hipotesis nol).

Dari percobaan antara *single* koagulan (100 % tawas) dengan *double* koagulan (30%,50% dan 70% tawas dan lumpur alum) didapatkan nilai F sebesar 50.48 dan P sebesar 0.000. Sementara perhitungan tabel didapatkan F sebesar 2.80 dan P sebesar 0.05. Berarti nilai F minitab lebih besar di bandingkan dengan nilai tabel sementara p value minitab lebih kecil dari p value tabel. Sehingga dapat disimpulkan adanya dosis koagulan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekeruhan air.

Untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan antara *single* koagulan dan *double* koagulan maka dilakukan 3 uji perbandingan antara lain : Fisher, Turkey's, dan HSU's MCB (multiple comparison with the best). Dari ketiga uji perbandingan didapatkan bahwa dosis koagulan 100% (*single* koagulan) signifikan dengan dosis koagulan 30% , 50% dan 70 % (*double* koagulan). Hal tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.6 dan 3.7** yang menunjukkan angka nol (0) yang tidak masuk dalam interval pada semua kombinasi dosis. Untuk uji HSU's MCB pada **Gambar 3.8** menunjukkan perbedaan yang signifikan pula antara *single* koagulan dan *double* koagulan, terlihat dari angka nol (0) yang masuk dalam rentang interval pada semua kombinasi dosis.

Untuk mengetahui apakah pemberian *double* koagulan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan *single* koagulan dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1. Boxplot Kekeruhan Air antara single koagulan dan double koagulan

Berdasarkan boxplot diatas dapat diketahui bahwa penggunaan *double* koagulan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan *single* koagulan. Hasil yang lebih baik dilihat dari nilai kekeruhan air yang semakin kecil. Dapat dilihat pula bahwa penggunaan dosis 50% tawas dan 50% resirkulasi lumpur alum bemberikan nilai kekeruhan air paling kecil.

4.2 Analisa 3^k Factorial Design

4.2.1. Analisa Grafik Residual

Berdasarkan **Gambar 3.9.** dapat disimpulkan bahwa residual atau error berdistribusi normal. Hal tersebut dapat dilihat dari plot gambar yang mendekati bentuk garis lurus, maka asumsi kenormalan terpenuhi. Berdasarkan grafik *residual versus the order of data* dapat diketahui pula bahwa asumsi independen terpenuhi. Hal tersebut dapat diketahui dari nilai residual respon tidak tergantung pada urutan perolehan respon (urutan observasi). Dapat dilihat pula bahwa plot urutan data tidak cenderung naik atau turun maka dapat dikatakan asumsi independen terpenuhi

4.2.2 Analisa Faktor dan Interaksinya

Rancangan percobaan menggunakan 3^k factorial design bertujuan untuk mengetahui apakah faktor-faktor dengan 3 level yang ditentukan berpengaruh

secara signifikan terhadap kekeruhan air atau tidak. Melalui percobaan ini dapat diketahui pula ada tidaknya interaksi tiap faktor.

Berdasarkan hasil pengolahan Minitab didapat beberapa kesimpulan berdasarkan nilai p-value. Nilai p-value dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1. Nilai P-Value 3^k Factorial Design

Sumber	P-Value
Dosis Koagulan	0.000
Kecepatan Putaran	0.000
Lama Putaran	0.004
Dosis Koagulan Vs Kecepatan Putaran	0.077
Dosis Koagulan Vs Lama Putaran	0.074
Kecepatan Putaran Vs Lama Putaran	0.127
Dosis Koagulan Vs Kecepatan Putaran Vs Lama Putaran	0.100

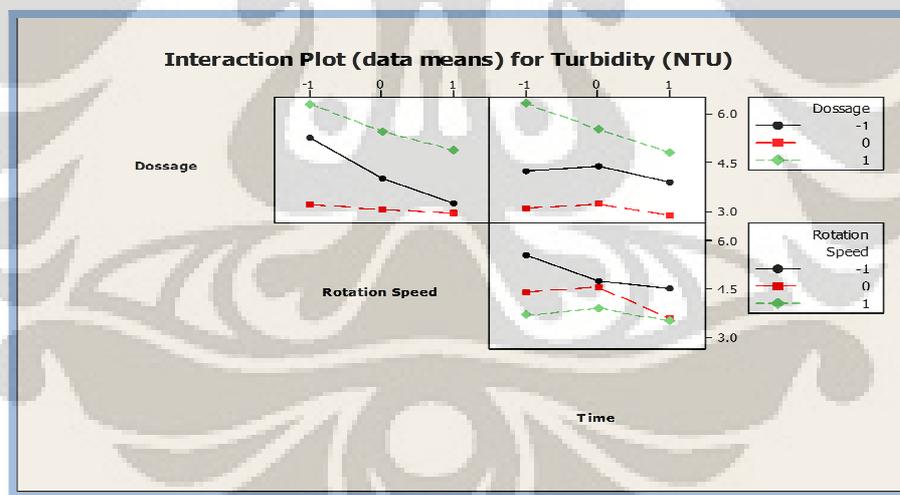
Berdasarkan hasil diatas maka didapat beberapa kesimpulan yaitu :

- Faktor dosis koagulan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekeruhan air, terlihat pada nilai p-value hasil minitab lebih kecil dari nilai α ($0.000 < 0.05$). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan dosis koagulan (100%) akan menghasilkan perbedaan nilai kekeruhan air.
- Faktor kecepatan putaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekeruhan air, terlihat pada nilai p-value hasil minitab lebih kecil dari nilai α ($0.000 < 0.05$). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan kecepatan putaran pada settingan alat jartest akan menghasilkan perbedaan nilai kekeruhan air.
- Faktor lama putaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekeruhan air, terlihat pada nilai p-value hasil minitab lebih kecil dari nilai α ($0.004 < 0.05$). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan settingan lama putaran pada alat jartest akan menghasilkan perbedaan nilai kekeruhan air.
- Faktor dosis koagulan dengan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan, terlihat dari nilai p-value hasil minitab lebih besar dari nilai α

(0.077 > 0.05). Hal ini menunjukkan adanya perubahan dosis koagulan tidak berpengaruh terhadap settingan kecepatan putaran.

- Faktor dosis koagulan dengan lama putaran tidak berinteraksi secara signifikan, terlihat dari nilai p-value hasil minitab lebih besar dari nilai α (0.074 > 0.05). Hal ini menunjukkan adanya perubahan dosis koagulan tidak berpengaruh terhadap settingan lama putaran.
- Faktor lama putaran dengan kecepatan putaran tidak berinteraksi secara signifikan, terlihat dari nilai p-value hasil minitab lebih besar dari nilai α (0.127 > 0.05). Hal ini menunjukkan adanya perubahan settingan kecepatan putaran tidak berpengaruh terhadap settingan lama putaran.
- Ketiga faktor tidak berinteraksi secara signifikan, terlihat dari nilai p-value hasil minitab lebih besar dari nilai α (0.100 > 0.05). Hal ini menunjukkan adanya perubahan settingan satu faktor tidak berpengaruh terhadap faktor lainnya.

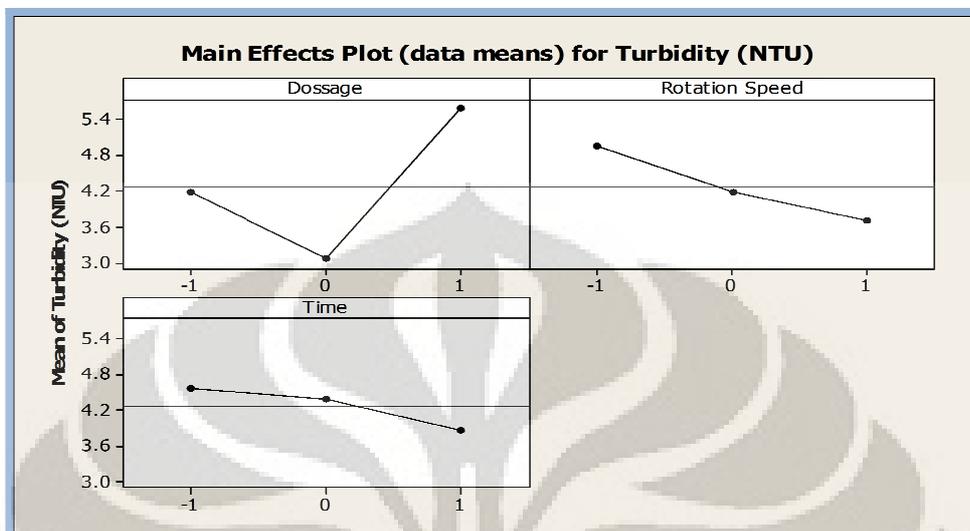
Grafik Interaction Plot masing-masing faktor dapat dilihat pada **Gambar 4.2** berikut ini.



Gambar 4.2. Grafik Interaction Plot untuk 3k factorial design

Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa tidak ada interaksi antar level yang berbeda dari ketiga faktor. Hal tersebut terlihat karena tidak adanya garis yang bersilangan/bersinggungan ditiap level. Kondisi tersebut dapat dairtikan bahwa efek dari perubahan satu faktor tidak akan berbeda untuk setiap setting faktor lainnya.

Untuk melihat level mana dari setiap faktor yang memberikan nilai kekeruhan air terendah dapat dilihat pada *Main Effect Plot* Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3. Main Effect untuk 3k Factorial Design

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kekeruhan air minimal, maka dari itu respon yang dipakai adalah *lower the better*. Dilihat dari hasil main effect plot diatas, maka dapat dikatakan bahwa level untuk dosis koagulan yang paling baik adalah pada dosis 50% karena memberikan nilai respon paling kecil. Untuk level kecepatan putaran level paling baik adalah pada kecepatan putaran 180 rpm dan dapat dilihat pula bahwa semakin besar kecepatan putaran memberikan hasil yang semakin baik. Sedangkan level untuk lama putaran level paling baik adalah pada level 15 menit.

4.3 Analisa *Response Surface Method*

4.3.1. Analisa First Order Model

Langkah pertama yang dilakukan pada *first order* model adalah menentukan faktor dan level dari tiap faktor. Level-level untuk percobaan ini ditentukan berdasarkan percobaan sebelumnya bahwa kekeruhan terendah terdapat pada level-level yang diperlihatkan pada **Tabel 3.5**. Langkah selanjutnya dalam first order model adalah menentukan *coded variable* dimana fungsinya

adalah untuk mengkodekan level-level dari faktor. *Coded variable* -1 merupakan nilai level terendah sedangkan *coded variable* 1 merupakan nilai level tertinggi.

Desain *first order* model menggunakan Box-Behnken desain, dimana dasar pemilihan desain penelitian ini karena Box-Behnken desain dapat digunakan untuk penelitian dengan lebih dari 3 variabel. Untuk menjaga agar keragaman residual respon dari perlakuan-perlakuan tidak tergantung pada urutan observasi, maka dilakukan randomisasi yang ditunjukkan pada **Tabel 3.7**. Berdasarkan pengolahan Minitab maka diperoleh ANOVA dari first order yang ditunjukkan pada **Gambar 3.12**. Penyusunan *first order model* dibuat berdasarkan koefisien dari hasil ANOVA. *First order model* yang diperoleh adalah $Y = 5,44667 + 2,48125 X_1 + 0,27375 X_2 - 0,09000 X_3 + \varepsilon$

Langkah selanjutnya adalah menentukan keoptimuman model dengan uji *Lack of fit*. Pengujian *Lack of fit* ini berdasarkan nilai p-value. Jika nilai p-value yang dihasilkan kurang dari 0.05 maka model yang didapatkan optimum. Pada penelitian ini di peroleh nilai p-value untuk *Lack of fit* sebesar 0.113 yang menunjukkan bahwa first order model yang diperoleh belum optimum. Dengan kata lain respon masih dapat dioptimalkan dengan mengubah (menaikkan atau menurunkan) nilai level faktor-faktor.

4.3.2. Analisa Steepest Descent

Jika *first order* model yang diperoleh belum optimum, maka dilanjutkan pada penelitian selanjutnya yaitu analisa *steepest descent*. Metode ini merupakan prosedur untuk bergerak turun secara bertahap. Dasar pemilihan *steepest descent* ini adalah karena respon yang diinginkan minimum. Dasar dari metode ini adalah perbandingan koefisien regresi linear setiap faktor. Koefisien regresi linear yang mempunyai nilai absolute terbesar merupakan pembanding utama terhadap nilai koefisien regresi yang lainnya.

Berdasarkan koefisien dari masing-masing faktor pada first order model, Maka dihitung delta (Δ) setiap faktor yang akan dijadikan acuan untuk melakukan *steepest descent*. Hasil percobaan *steepest descent* dapat dilihat pada **Tabel 3.8**. dan grafik percobaan dapat dilihat pada **Gambar 3.13**. Berdasarkan grafik tersebut terlihat nilai kekeruhan yang cenderung turun lalu terus naik. Perlakuan

dengan nilai kekeruhan terendah pada steepest descent ini akan dijadikan acuan untuk melakukan penelitian selanjutnya. Pada penelitian ini diperoleh kombinasi dengan nilai kekeruhan terendah adalah pada dosis koagulan 55%, kecepatan putaran 127 rpm dan lama putaran 12 menit.

Langkah selanjutnya adalah dilakukan analisa *second first order* model. Setelah diperoleh nilai kekeruhan air terendah pada *steepest descent* maka dilakukan penelitian berdasarkan nilai tersebut, dimana nilai tersebut akan dijadikan *middle level* (0) pada penelitian selanjutnya. Hasil pengolahan data ditunjukkan pada **Gambar 3.14**. Langkah selanjutnya adalah dilakukan kembali pengujian keoptimuman model yang diperoleh dengan uji *lack of fit*. Berdasarkan ANOVA dapat dilihat bahwa nilai p-value yang diperoleh lebih kecil dari 0.05 yaitu sebesar 0.017. Hal ini menunjukkan bahwa model yang diperoleh optimum.

4.3.3. Analisa Second Order Model

Setelah ditentukan daerah optimal melalui first order model, maka dilakukan pencarian titik optimal melalui second order model. Eksperimen second order model membutuhkan augmented design atau beberapa perlakuan tambahan (axial run). Tujuannya agar diperoleh kepastian adanya hubungan kuadratik pada model regresi eksperimen second order model. Penelitian ini menggunakan Spherical Center Composite Design (Spherical CCD) untuk menentukan jarak terhadap center point (α) yang akan dipakai dalam augmented design. Spherical CCD merupakan metode yang sering digunakan karena sangat efisien dalam penyusunan second order model. Center point pada penelitian ini diperoleh sebesar 1.732 yang merupakan akar dari jumlah faktor yang digunakan.

Setelah diperoleh α maka dilakukan percobaan dengan perlakuan tambahan tersebut. Data hasil pengolahan dapat dilihat pada **Tabel 3.12** dan hasil pengolahan data dapat dilihat pada **Gambar 3.15**. Penyusunan *Second order model* dibuat berdasarkan koefisien dari hasil pengolahan data. Second order model yang diperoleh adalah $Y = 3.2520 + 1.6625 X_1 - 0.5333X_2 - 0.1924 X_3 + 3.1906 X_1^2 - 0.3289 X_2^2 + 1.5283 X_3^2 - 0.2175 X_1X_2 - 0.1875 X_1X_3 - 0.1125 X_2X_3$. Pengujian model menggunakan uji *Lack of fit* menunjukkan model telah optimum ditunjukkan perolehan p-value sebesar 0.041 lebih kecil dari 0.05.

Dari koefisien pada *second order* model, maka dibuat matriks untuk menentukan titik optimum. Berdasarkan pengolahan data maka diperoleh kombinasi optimum untuk menghasilkan nilai kekeruhan air terendah adalah pada dosis koagulan tawas 52%, dosis koagulan lumpur alum 48% dengan settingan kecepatan putaran pada alat jartest 91 rpm dengan lama pengadukan 12 menit.

4.3.4. Analisa Surface Plot dan Countour Plot

Countour plot dan *surface plot* menjelaskan adanya interaksi antar faktor terkontrol maupun antar faktor terkontrol dan noise. Kedua plot ini merupakan pendukung pada model regresi yang dihasilkan. Dalam *countour plot* ditampilkan kurva-kurva yang menunjukkan besar respon yang dihasilkan dari interaksi faktor yang terlibat.

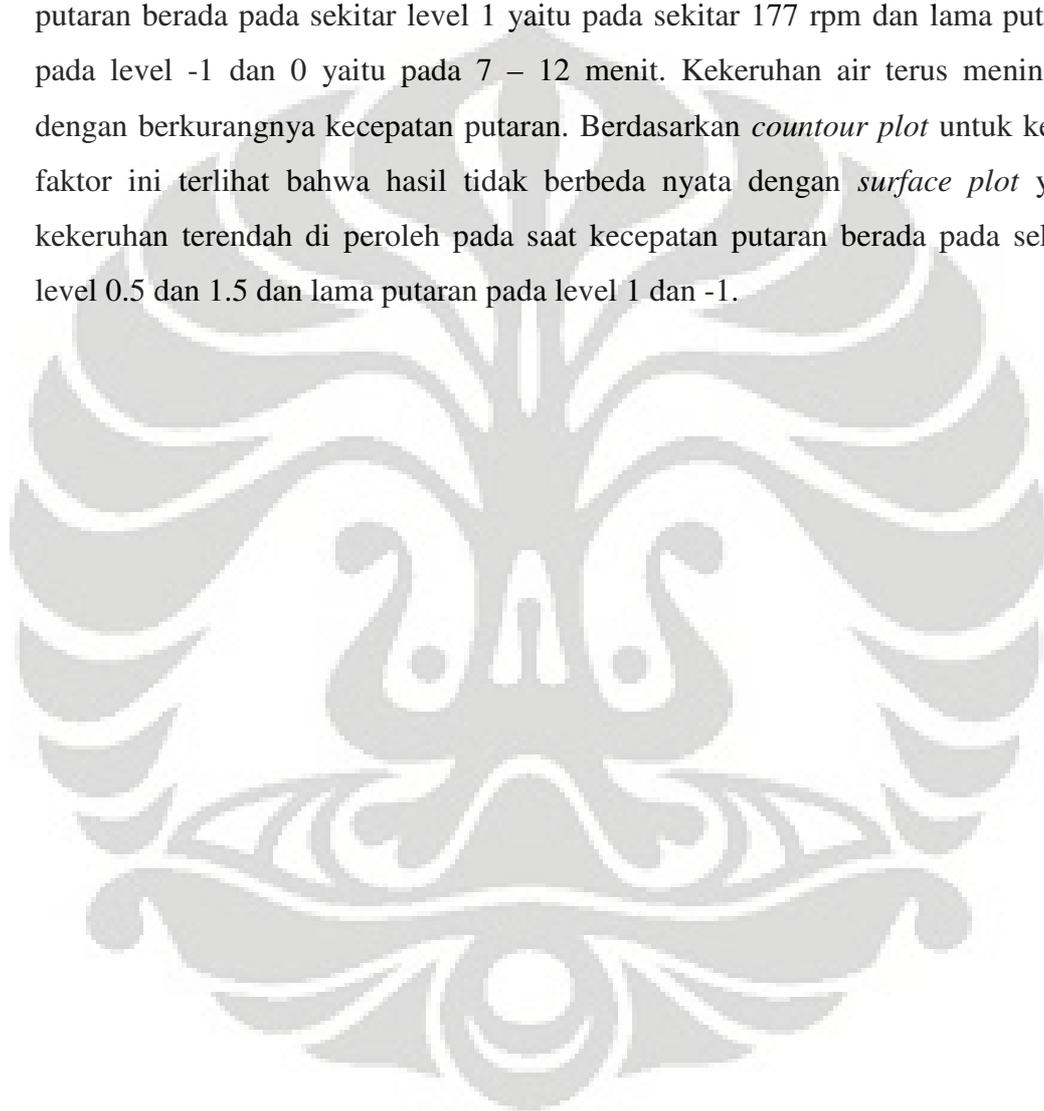
Surface plot juga sama dengan *countour plot*. Perbedaannya dalam *surface plot* respon yang dihasilkan berupa bidang permukaan yang menjelaskan nilai respon yang dihasilkan. Dari perhitungan yang dilakukan, besarnya respon yang ditampilkan menunjukkan hasil yang sama, baik *countour plot* maupun *surface plot*.

Dari hasil *countour plot* dan *surface plot* untuk kecepatan putaran vs dosis koagulan yang terlihat pada **Gambar 3.16** dan **Gambar 3.17**. Berdasarkan *surface plot* untuk kedua faktor ini terlihat bahwa kekeruhan terendah di peroleh pada saat dosis koagulan berada pada sekitar level -1 dan 0, yaitu pada sekitar 45 % dan 55% dan kecepatan putaran pada level -1 (77 rpm) kemudian kekeruhan air terus meningkat pada dosis koagulan level 1 (65%). Berdasarkan *countour plot* untuk kedua faktor ini terlihat bahwa hasil tidak berbeda dengan *surface plot* yaitu kekeruhan terendah di peroleh pada saat dosis koagulan berada pada sekitar level -1 dan 0, yaitu pada sekitar 45 % dan 55%.

Untuk dosis koagulan vs lama putaran *countour plot* dan *surface plot* terlihat pada **Gambar 3.18** dan **Gambar 3.19**. Berdasarkan *surface plot* untuk kedua faktor ini terlihat bahwa kekeruhan terendah di peroleh pada saat dosis koagulan berada pada sekitar level -1 dan 0 yaitu pada sekitar 45% dan 55 % kemudian terus meningkat dengan penambahan dosis koagulan, sedangkan perbedaan lama putaran tidak berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan

countour plot untuk kedua faktor ini terlihat bahwa hasil tidak berbeda nyata dengan *surface plot* yaitu kekeruhan terendah di peroleh pada saat dosis koagulan berada pada sekitar level 0 dan -1 dan lama putaran pada level 0.

Untuk kecepatan putaran vs lama putaran *countor plot* dan *surface plot* terlihat pada **Gambar 3.20** dan **Gambar 3.21**. Berdasarkan *surface plot* untuk kedua faktor ini terlihat bahwa kekeruhan terendah di peroleh pada saat kecepatan putaran berada pada sekitar level 1 yaitu pada sekitar 177 rpm dan lama putaran pada level -1 dan 0 yaitu pada 7 – 12 menit. Kekeruhan air terus meningkat dengan berkurangnya kecepatan putaran. Berdasarkan *countour plot* untuk kedua faktor ini terlihat bahwa hasil tidak berbeda nyata dengan *surface plot* yaitu kekeruhan terendah di peroleh pada saat kecepatan putaran berada pada sekitar level 0.5 dan 1.5 dan lama putaran pada level 1 dan -1.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, yaitu untuk memperoleh kombinasi optimal dari faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekeruhan air pada proses koagulasi–flokulasi di instalasi pengolahan air minum. Ditentukan tiga faktor yang berpengaruh yaitu dosis koagulan, kecepatan putaran dan lama pengadukan. Berdasarkan hasil penelitian kesimpulan yang didapatkan adalah:

1. Tingkat kekeruhan air terendah diperoleh dengan dosis 52% tawas, 48% resirkulasi lumpur alum dengan settingan kecepatan putaran 91 rpm dengan lama pengadukan 12 menit.
2. Model polinomial yang diperoleh adalah :

$$Y = 3.2520 + 1.6625 X_1 - 0.5333X_2 - 0.1924 X_3 + 3.1906 X_1^2 - 0.3289 X_2^2 + 1.5283 X_3^2 - 0.2175 X_1X_2 - 0.1875 X_1X_3 - 0.1125 X_2X_3$$

dimana :

X_1 = Faktor 1 = Dosis Koagulan

X_2 = Faktor 2 = Kecepatan Putaran

X_3 = Faktor 3 = Lama pengadukan

5.2 Saran

Eksperimen yang telah dilakukan masih memiliki beberapa kekurangan. Kekurangan yang diharapkan bisa diantisipasi terhadap penelitian selanjutnya agar memiliki hasil yang lebih akurat dan berkembang antara lain :

1. Sebaiknya jika memungkinkan, perbanyaklah replikasi terhadap data eksperimen. Akan lebih baik jika tidak memilih replikasi sebanyak minimal yang disyaratkan oleh metode *Design of Experiments* (DOE).
2. Menambah jumlah faktor yang bisa diatur, seperti pengaruh operator, pH air dan lain-lain. Hal ini dipertimbangkan mengingat kekeruhan air mungkin dipengaruhi oleh faktor tersebut.
3. Melakukan penelitian kembali dengan berbagai tingkat kekeruhan air baku, hal ini dipertimbangkan mengingat bahwa fluktuasi kekeruhan air baku tidak menentu

DAFTAR REFERENSI

- Montgomery, DC. (2005). *Design And Analysis of Eksperiment*. 6th edition. Wiley Inc. New York
- Whitcomb PJ and Anderson (2005). *RSM Simplified*. Minneapolis. State-Ease Inc. San Francisco.
- S Raissi. (2009). *Developing New Processes and Optimizing Performance Using Response Surface Methodology*. Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology 49
- Eun-Sang Lee, Sung-Chul Hwang, Jung-Taik Lee and Jong-Koo Won. (2009). *A Study on the Characteristic of Parameters by the Response Surface Method in Final Wafer Polishing*. International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 10, No. 3, pp. 25-30
- Jiju Antony. (2006) *Improving the Manufactur Process Quality Using design of Eksperiment*. International jurnal of Operation and production Management. Vol.21. no.5/6. pp:812-822
- Rahardjo J and Rosalinawati (2006). *Optimasi Produksi dengan Metode Response Surface*. Jurnal Teknik Industri Vol.4 no.1 PP :36-44.
- M. Balasubramanian. Jayabalan, and. Balasubramanian(2007). *Response Surface Approach to Optimize the Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding Parameters of Ti-6Al-4V Titanium Alloy*. Metal and Material International, Vol. 13, No. 4 (2007), pp. 335~344
- Arnold E Greenberg, Lenores Clesceri, Andrew Deaton. (1992). *Standard Method for the Examination of Water and Waste water*. 18th edition. Germany

Rui A.R. Boaventura, António A.S. Duarte.(2007). *Aluminium recovery for Water Treatment Sludges*. International Conference Water Sulpy and Water Quality. Polandia.

Seiichi Ishikawa · Naoko Ueda · Yuji Okumura (2007). *Recovery of coagulant from water supply plant sludge and its effect on clarification*. J Mater Cycles Waste Manag pg:167–172

Oramahi. H.A. (2008). *Teori dan Aplikasi Penggunaan RSM*. Ardana melati. Yogyakarta

Iriawan Nur (2006). *Mengolah data statistik menggunakan Minitab 14*. Andi Offset. Yogyakarta

Degremont. (1979). *Water Treatment Handbook*. Halsted press. New york

Kawamura, Susumu (1991), “*Integrated Design of Water Treatment Facilities*”, John Willey & Sons, Inc. New York, hal 51

Fair, Geyer, Okun (1968), “ *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal* “, John Wiley & Sons Inc, Toronto, Hal.251

Droste, Ronald L,(1997) “*Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*”, John Willey and Sons Inc. New York, , Hal : 76, 96

Jiju Antony, Tzu-Yao Chou dan Sid Ghosh (2003), “*Training for design of experiment* “, Work Study, vol.53 No.7, hal 243

Richard I. Levin dan David S. Rubin, “*Statistic for Management*”, Seventh Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1998, hal. 407

LAMPIRAN 1

Persyaratan Kualitas Air Minum

1. BAKTERIOLOGIS

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
a. Air Minum			
E. Coli atau fecal coli	Jumlah per 100 ml sampel	0	
b. Air yang masuk sistem distribusi			
E. Coli atau fecal coli	Jumlah per 100 ml sampel	0	
Total Bakteri Coliforma	Jumlah per 100 ml sampel	0	
c. Air pada sistem distribusi			
E. Coli atau fecal coli	Jumlah per 100 ml sampel	0	
Total Bakteri Coliforma	Jumlah per 100 ml sampel	0	

2. KIMIA

A. Bahan-bahan inorganik (yang memiliki pengaruh langsung pada kesehatan)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Antimony	(mg/liter)	0.005	
Air raksa	(mg/liter)	0.001	
Arsenic	(mg/liter)	0.01	
Barium	(mg/liter)	0.7	
Boron	(mg/liter)	0.3	
Cadmium	(mg/liter)	0.003	
Kromium	(mg/liter)	0.05	
Tembaga	(mg/liter)	2	
Sianida	(mg/liter)	0.07	
Fluorida	(mg/liter)	1.5	
Timah	(mg/liter)	0.01	
Molybdenum	(mg/liter)	0.07	
Nikel	(mg/liter)	0.02	
Nitrat (sebagai NO ₃)	(mg/liter)	50	

(lanjutan)

Nitrit (sebagai NO ₂)	(mg/liter)	3	
Selenium	(mg/liter)	0.01	

B. Bahan-bahan inorganik (yang kemungkinan dapat menimbulkan keluhan pada konsumen)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Ammonia	mg/l	1.5	
Aluminium	mg/l	0.2	
Chloride	mg/l	250	
Copper	mg/l	1	
Kesadahan	mg/l	500	
Hidrogen Sulfide	mg/l	0.05	
Besi	mg/l	0.3	
Mangan	mg/l	0.1	
pH	-	6.5 - 8.5	
Sodium	mg/l	200	
Sulfate	mg/l	250	
Padatan terlarut	mg/l	1000	
Seng	mg/l	3	
	mg/l		

C. Bahan-bahan organik (yang memiliki pengaruh langsung pada kesehatan)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Chlorinated alkanes			
carbon tetrachloride	(µg/liter)	2	
dichloromethane	(µg/liter)	20	
1,2 -dichloroethane	(µg/liter)	30	
1,1,1 -trichloroethane	(µg/liter)	2000	
Chlorinated ethenes			
vinyl chloride	(µg/liter)	5	
1,1 -dichloroethene	(µg/liter)	30	
1,2 -dichloroethene	(µg/liter)	50	
Trichloroethene	(µg/liter)	70	
Tetrachloroethene	(µg/liter)	40	
Benzene	(µg/liter)	10	
Toluene	(µg/liter)	700	
Xylenes	(µg/liter)	500	
benzo[a]pyrene	(µg/liter)	0.7	
Chlorinated benzenes			
Monochlorobenzene	(µg/liter)	300	

(lanjutan)

1,2 -dichlorobenzene	(ug/liter)	1000	
1,4 -dichlorobenzene	(ug/liter)	300	
Trichlorobenzenes (total)	(ug/liter)	20	
Lain-lain			
di(2-ethylhexy)adipate	(ug/liter)	80	
di(2-ethylhexy)phthalate	(ug/liter)	8	
Acrylamide	(ug/liter)	0.5	
Epichlorohydrin	(ug/liter)	0.4	
Hexachlorobutadiene	(ug/liter)	0.6	
edetic acid (EDTA)	(ug/liter)	200	
Nitroloacetic acid	(ug/liter)	200	
Tributylin oxide	(ug/liter)	2	

D. Bahan-bahan organik (yang kemungkinan dapat menimbulkan kekhutan pada konsumen)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Toluene	ug/l	14-170	
Xylene	ug/l	20-1800	
Ethylbenzene	ug/l	2-200	
Styrene	ug/l	4-2600	
Monochlorobenzene	ug/l	10-12	
1,2 -dichlorobenzene	ug/l	1-10	
1,4 -dichlorobenzene	ug/l	0.3-30	
Trichlorobenzenes (total)	ug/l	5-50	
2 -chlorophenol	ug/l	600-1000	
2,4 -dichlorophenol	ug/l	0.3-40	
2,4,6 -trichlorophenol	ug/l	2-300	

E. Pestisida

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Alachlor	(ug/liter)	20	
Aldicarb	(ug/liter)	10	
aldrin/dieldrin	(ug/liter)	0.03	
Atrazine	(ug/liter)	2	
Bentazone	(ug/liter)	30	
Carbofuran	(ug/liter)	5	
Chlordane	(ug/liter)	0.2	
Chlorotoluron	(ug/liter)	30	
DDT	(ug/liter)	2	

(lanjutan)

1,3 -dibromo-3-chloropropane	(ug/liter)	1	
2,4 -D	(ug/liter)	30	
1,3 -dichloropropane	(ug/liter)	20	
1,3 -dichloropropane	(ug/liter)	20	
Heptachlor acid	(ug/liter)	0.03	
Heptachlor epoxide			
Hexachlorobenzene	(ug/liter)	1	
Isoproturon	(ug/liter)	9	
Lindane	(ug/liter)	2	
MCPA	(ug/liter)	2	
Molinate	(ug/liter)	6	
Pendimethalin	(ug/liter)	20	
Pentachlorophenol	(ug/liter)	9	
Permethrin	(ug/liter)	20	
Propamyl	(ug/liter)	20	
Pyridate	(ug/liter)	100	
Simazine	(ug/liter)	2	
Trifluralin	(ug/liter)	20	
Chlorophenoxy herbicides selain 2,4-D dan MCPA			
2,4 -DB	(ug/liter)	90	
Dichloroprop	(ug/liter)	100	
Fenoprop	(ug/liter)	9	
Mecoprop	(ug/liter)	10	
2,4,5 -T	(ug/liter)	9	

F. Desinfektan dan hasil sampingannya

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Monochloramine	Mg/l	3	
di- and trichloramine			
Chlorine	Mg/l	5	
Bromate	(ug/liter)	25	
Chlorite	(ug/liter)	200	
2,4,6 -trichlorophenol	(ug/liter)	200	
Formaldehyde	(ug/liter)	900	
Bromoform	(ug/liter)	100	
Dibromochloromethane	(ug/liter)	100	
Bromodichloro- methane	(ug/liter)	60	
Chloroform	(ug/liter)	200	
Chlorinated acetic acids			
Dichloroacetic acid	(ug/liter)	50	
Trichloroacetic acid	(ug/liter)	100	
Chloral hydrate			
(Trichloroacetal-dehyde)	(ug/liter)	10	
Dichloroacetonitrile	(ug/liter)	90	

(lanjutan)

Dibromoacetonitrile	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Trichloroacetonitrile	($\mu\text{g/liter}$)	1	
Cyanogen chloride	($\mu\text{g/liter}$)	70	
(sebagai CN)	($\mu\text{g/liter}$)	25	

3. RADIOAKTIFITAS

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Gross alpha activity	(Bq/liter)	0.1	
Gross beta activity	(Bq/liter)	1	

4. FISIK

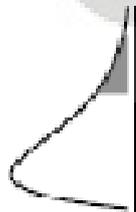
Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Ket.
1	2	3	4
Parameter Fisik			
Warna	TCU	15	
Rasa dan bau	-	-	Tidak berbau dan berasa
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	Suhu udara $\pm 3^{\circ}\text{C}$	
Kekeruhan	NTU	5	

MENTERI KESEHATAN RI
ttd.
Dr. ACHMAD SUJUDI



Tabel Distribusi F

$\alpha = 0,01$



df1	df2	derajat kebebasan penyebut (k2)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	1	21,20	16,25	14,75	13,75	13,00	12,50	12,10	11,80	11,55	11,35	11,20	11,05	10,95	10,85	10,78	10,72	10,67	10,62	10,58	10,54	10,50	10,47	10,44	10,41	10,38	10,35	10,32	10,29	10,26	10,23	10,20	10,17	10,14	10,11	10,08	10,05	10,02	10,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
2	1	18,00	13,25	11,92	11,02	10,50	10,10	9,75	9,45	9,20	8,95	8,75	8,58	8,45	8,35	8,28	8,22	8,17	8,12	8,08	8,04	8,00	7,97	7,94	7,91	7,88	7,85	7,82	7,79	7,76	7,73	7,70	7,67	7,64	7,61	7,58	7,55	7,52	7,50	7,47	7,44	7,41	7,38	7,35	7,32	7,29	7,26	7,23	7,20	7,17	7,14	7,11	7,08	7,05	7,02	7,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
3	1	16,69	12,16	10,95	10,05	9,55	9,15	8,80	8,50	8,25	8,00	7,75	7,55	7,40	7,30	7,22	7,15	7,10	7,05	7,01	6,97	6,93	6,90	6,87	6,84	6,81	6,78	6,75	6,72	6,69	6,66	6,63	6,60	6,57	6,54	6,51	6,48	6,45	6,42	6,39	6,36	6,33	6,30	6,27	6,24	6,21	6,18	6,15	6,12	6,09	6,06	6,03	6,00	5,97	5,94	5,91	5,88	5,85	5,82	5,80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4	1	15,98	11,35	10,15	9,25	8,75	8,35	8,00	7,70	7,45	7,20	6,95	6,75	6,60	6,50	6,42	6,35	6,30	6,25	6,21	6,17	6,13	6,10	6,07	6,04	6,01	5,98	5,95	5,92	5,89	5,86	5,83	5,80	5,77	5,74	5,71	5,68	5,65	5,62	5,59	5,56	5,53	5,50	5,47	5,44	5,41	5,38	5,35	5,32	5,29	5,26	5,23	5,20	5,17	5,14	5,11	5,08	5,05	5,02	5,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
5	1	15,52	10,91	9,75	8,85	8,35	7,95	7,60	7,30	7,05	6,80	6,55	6,35	6,20	6,10	6,02	5,95	5,90	5,85	5,81	5,77	5,73	5,70	5,67	5,64	5,61	5,58	5,55	5,52	5,49	5,46	5,43	5,40	5,37	5,34	5,31	5,28	5,25	5,22	5,19	5,16	5,13	5,10	5,07	5,04	5,01	4,98	4,95	4,92	4,89	4,86	4,83	4,80	4,77	4,74	4,71	4,68	4,65	4,62	4,60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
6	1	15,21	10,61	9,45	8,55	8,05	7,65	7,30	7,00	6,75	6,50	6,25	6,05	5,90	5,80	5,72	5,65	5,60	5,55	5,51	5,47	5,43	5,40	5,37	5,34	5,31	5,28	5,25	5,22	5,19	5,16	5,13	5,10	5,07	5,04	5,01	4,98	4,95	4,92	4,89	4,86	4,83	4,80	4,77	4,74	4,71	4,68	4,65	4,62	4,59	4,56	4,53	4,50	4,47	4,44	4,41	4,38	4,35	4,32	4,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
7	1	14,98	10,41	9,25	8,35	7,85	7,45	7,10	6,80	6,55	6,30	6,05	5,85	5,70	5,60	5,52	5,45	5,40	5,35	5,31	5,27	5,23	5,20	5,17	5,14	5,11	5,08	5,05	5,02	4,99	4,96	4,93	4,90	4,87	4,84	4,81	4,78	4,75	4,72	4,69	4,66	4,63	4,60	4,57	4,54	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,33	4,30	4,27	4,24	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
8	1	14,80	10,25	9,10	8,20	7,70	7,30	6,95	6,65	6,40	6,15	5,95	5,80	5,70	5,62	5,55	5,50	5,45	5,40	5,35	5,31	5,27	5,23	5,20	5,17	5,14	5,11	5,08	5,05	5,02	4,99	4,96	4,93	4,90	4,87	4,84	4,81	4,78	4,75	4,72	4,69	4,66	4,63	4,60	4,57	4,54	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,33	4,30	4,27	4,24	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
9	1	14,66	10,10	8,95	8,05	7,55	7,15	6,80	6,50	6,25	6,00	5,80	5,65	5,55	5,47	5,40	5,35	5,30	5,25	5,20	5,16	5,12	5,08	5,05	5,02	4,99	4,96	4,93	4,90	4,87	4,84	4,81	4,78	4,75	4,72	4,69	4,66	4,63	4,60	4,57	4,54	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,33	4,30	4,27	4,24	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
10	1	14,55	10,00	8,85	7,95	7,45	7,05	6,70	6,40	6,15	5,90	5,70	5,55	5,45	5,37	5,30	5,25	5,20	5,15	5,10	5,06	5,02	4,98	4,95	4,92	4,89	4,86	4,83	4,80	4,77	4,74	4,71	4,68	4,65	4,62	4,59	4,56	4,53	4,50	4,47	4,44	4,41	4,38	4,35	4,32	4,29	4,26	4,23	4,20	4,17	4,14	4,11	4,08	4,05	4,02	3,99	3,96	3,93	3,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
11	1	14,45	9,90	8,75	7,85	7,35	6,95	6,60	6,30	6,05	5,80	5,60	5,45	5,35	5,27	5,20	5,15	5,10	5,05	5,00	4,96	4,92	4,88	4,85	4,82	4,79	4,76	4,73	4,70	4,67	4,64	4,61	4,58	4,55	4,52	4,49	4,46	4,43	4,40	4,37	4,34	4,31	4,28	4,25	4,22	4,19	4,16	4,13	4,10	4,07	4,04	4,01	3,98	3,95	3,92	3,89	3,86	3,83	3,80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
12	1	14,37	9,85	8,70	7,80	7,30	6,90	6,55	6,25	6,00	5,75	5,55	5,40	5,30	5,22	5,15	5,10	5,05	5,00	4,95	4,91	4,87	4,83	4,80	4,77	4,74	4,71	4,68	4,65	4,62	4,59	4,56	4,53	4,50	4,47	4,44	4,41	4,38	4,35	4,32	4,29	4,26	4,23	4,20	4,17	4,14	4,11	4,08	4,05	4,02	3,99	3,96	3,93	3,90	3,87	3,84	3,81	3,78	3,75	3,72	3,69	3,66	3,63	3,60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
13	1	14,31	9,80	8,65	7,75	7,25	6,85	6,50	6,20	5,95	5,70	5,50	5,35	5,25	5,17	5,10	5,05	5,00	4,95	4,90	4,86	4,82	4,78	4,75	4,72	4,69	4,66	4,63	4,60	4,57	4,54	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,33	4,30	4,27	4,24	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00	3,97	3,94	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70	3,67	3,64	3,61	3,58	3,55	3,52	3,49	3,46	3,43	3,40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
14	1	14,25	9,75	8,60	7,70	7,20	6,80	6,45	6,15	5,90	5,65	5,45	5,30	5,20	5,12	5,05	5,00	4,95	4,90	4,85	4,81	4,77	4,73	4,70	4,67	4,64	4,61	4,58	4,55	4,52	4,49	4,46	4,43	4,40	4,37	4,34	4,31	4,28	4,25	4,22	4,19	4,16	4,13	4,10	4,07	4,04	4,01	3,98	3,95	3,92	3,89	3,86	3,83	3,80	3,77	3,74	3,71	3,68	3,65	3,62	3,59	3,56	3,53	3,50	3,47	3,44	3,41	3,38	3,35	3,32	3,29	3,26	3,23	3,20	3,17	3,14	3,11	3,08	3,05	3,02	2,99	2,96	2,93	2,90	2,87	2,84	2,81	2,78	2,75	2,72	2,69	2,66	2,63	2,60	2,57	2,54	2,51	2,48	2,45	2,42	2,39	2,36	2,33	2,30	2,27	2,24	2,21	2,18	2,15	2,12	2,09	2,06	2,03	2,00	1,97	1,94	1,91	1,88	1,85	1,82	1,79	1,76	1,73	1,70	1,67	1,64	1,61	1,58	1,55	1,52	1,49	1,46	1,43	1,40	1,37	1,34	1,31	1,28	1,25	1,22	1,19	1,16	1,13	1,10	1,07	1,04	1,01	9,98	9,95	9,92	9,89	9,86	9,83	9,80	9,77	9,74	9,71	9,68	9,65	9,62	9,59	9,56	9,53	9,50	9,47	9,44	9,41	9,38	9,35	9,32	9,29	9,26	9,23	9,20	9,17	9,14	9,11	9,08	9,05	9,02	8,99	8,96	8,93	8,90	8,87	8,84	8,81	8,78	8,75	8,72	8,69	8,66	8,63	8,60	8,57	8,54	8,51	8,48	8,45	8,42	8,39	8,36	8,33	8,30	8,27	8,24	8,21	8,18	8,15	8,12	8,09	8,06	8,03	7,99	7,96	7,93	7,90	7,87	7,84	7,81	7,78	7,75	7,72	7,69	7,66	7,63	7,60	7,57	7,54	7,51	7,48	7,45	7,42	7,39	7,36	7,33	7,30	7,27	7,24	7,21	7,18	7,15	7,12	7,09	7,06	7,03	7,00	6,97	6,94	6,91	6,88	6,85	6,82	6,79	6,76	6,73	6,70	6,67	6,64	6,61	6,58	6,55	6,52	6,49	6,46	6,43	6,40	6,37	6,34	6,31	6,28	6,25	6,22	6,19	6,16	6,13	6,10	6,07	6,04	6,01	5,98	5,95	5,92	5,89	5,86	5,83	5,80	5,77	5,74	5,71	5,68	5,65	5,62	5,59	5,56	5,53	5,50	5,47	5,44	5,41	5,38	5,35	5,32	5,29	5,26	5,23	5,20	5,17	5,14	5,11	5,08	5,05	5,02	4,99	4,96	4,93	4,90	4,87	4,84	4,81	4,78	4,75	4,72	4,69	4,66	4,63	4,60	4,57	4,54	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,33	4,30	4,27	4,24	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00	3,97	3,94	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70	3,67	3,64	3,61	3,58	3,55	3,52	3,49	3,46	3,43	3,40	3,37	3,34	3,31	3,28	3,25	3,22	3,19	3,16	3,13	3,10	3,07	3,04	3,01	2,98	2,95	2,92	2,89	2,86	2,83	2,80	2,77	2,74	2,71	2,68	2,65	2,62	2,59	2,56	2,53	2,50	2,47	2,44	2,41	2,38	2,35	2,32	2,29	2,26	2,23	2,20	2,17	2,14	2,11	2,08	2,05	2,02	1,99	1,96	1,93	1,90	1,87	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66	1,63	1,60	1,57	1,54	1,51	1,48	1,45	1,42	1,39	1,36	1,33	1,30	1,27	1,24	1,21	1,18	1,15	1,12	1,09	1,06	1,03	1,00	9,97	9,94	9,91	9,88	9,85	9,82	9,79	9,76	9,73	9,70	9,67	9,64	9,61	9,58	9,55	9,52	9,49	9,46	9,43	9,40	9,37	9,34	9,31	9,28	9,25	9,22	9,19	9,16	9,13	9,10	9,07	9,04	9,01	8,98	8,95	8,92	8,89	8,86	8,83	8,80	8,77	8,74	8,71	8,68	8,65	8,62	8,59	8,56	8,53	8,50	8,47	8,44	8,41	8,38	8,35	8,32	8,29	8,26	8,23	8,20	8,17	8,14	8,11	8,08	8,05	8,02	7,99	7,96	7,93	7,90	7,87	7,84	7,81	7,78	7,75	7,72	7,69	7,66	7,63	7,60	7,57	7,54	7