Jurnal SENOPATI

Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering
Jurnal homepage : ejurnal.itats.ac.id/senopati

Optimasi Kekuatan Tarik Kertas Tisu dengan Design Of Experiments

Welly Sugianto[1], Hendy Rinaldy[2], David Situmorang[3], Indra Situmorang[4]*
[1,2,3]Program Studi Teknik Industri, Universitas Putera Batam, Jl. Muka Kuning, Batam

INFORMASI ARTIKEL

Halaman:
95 – 106

Tanggal penyerahan:
7 Mei 2025

Tanggal diterima:
22 Februari 2026

Tanggal terbit:
30 April 2026

ABSTRACT

This study was conducted to identify factors that affect the tensile strength and tear strength of tissue paper. The variables studied for their impact on tensile strength are water concentration, amine concentration, chitosan concentration and pulp type concentration. The impact of these variables on the response was studied using the design of experiments. The design used was a full design where the design is an orthogonal design where there is no correlation between the independent variables. The experiment was replicated four times so that the degrees of freedom are sufficient to calculate the effect of a single factor and the interaction of more than three factors on the response. Significance testing is carried out using the F test and t test. The first experiments aim to identify factors that have a dominant influence on the response. Furthermore, based on these results, the optimum point is determined using the steepest ascent. Furthermore, the analysis is continued with a second-order equation to detect curvature which is a sign of the optimum position. Tensile strength and tear strength are successfully optimized at a water content of 60%, a raisabond content of 2.18%, a chitosan content of 3.29%, and a pulp content of 39.03%.

Keywords: *tissue paper, tensile strength, tear strength, design of experiments*

EMAIL

[1]welly@puterabatam.ac.id
[2]hendy.rinaldy@puterabatam.ac.id
[3]pb210410070@puterabatam.ac.id
[4]pb210410104@puterabatam.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berdampak pada *tensile strength* dan *tear strength* pada kertas tisu. Adapun variabel yang akan diteliti dampaknya pada kekuatan tarik adalah konsentrasi air, konsentrasi amina, konsentrasi chitosan dan konsentrasi jenis pulp. Dampak variabel tersebut pada response diteliti dengan menggunakan *design of experiments*. Desain yang digunakan adalah *full design* di mana desain tersebut adalah desain yang *orthogonal* di mana tidak ada korelasi antara variabel bebas. Eksperimen direplikasi sebanyak empat kali sehingga derajat bebas cukup untuk menghitung pengaruh faktor tunggal dan interaksi lebih dari tiga faktor pada response. Uji signifikansi dilakukan dengan menggunakan uji F dan uji t. Eksperimen pertama bertujuan untuk mengidentifikasi faktor yang memiliki pengaruh dominan pada *response*. Selanjutnya berdasarkan pada hasil tersebut, dilakukan penentuan titik optimum dengan menggunakan *steepest ascent*. Selanjutnya analisis dilanjutkan dengan persamaan linier orde dua untuk mendeteksi kurvatur yang merupakan tanda dari posisi optimum. *Tensile strength* dan *tear strength* berhasil dioptimumkan pada kadar air sebesar 60%, kadar *raisabond* sebesar 2.18%, kadar *chitosan* sebesar 3.29%, dan kadar *pulp* sebesar 39.03%.

Kata kunci: *Kertas tisu, tensile strength, tear strength, design of experiments*

PENDAHULUAN

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kertas tisu memiliki peran penting dalam aktivitas kebersihan modern karena digunakan untuk proses pengeringan dan pembersihan, sehingga memerlukan daya serap serta kekuatan mekanik yang tinggi. Produk tisu yang digunakan untuk mengeringkan tangan basah harus memiliki kekuatan basah dan kering yang baik agar tidak mudah robek selama penggunaan [1]. Selain itu, *wet strength* merupakan parameter penting dalam industri

kertas tisu karena menentukan kemampuan kertas mempertahankan integritas struktural saat terkena air melalui pembentukan ikatan silang antar serat [2]. Studi lain juga menjelaskan bahwa kekuatan kertas dalam kondisi basah cenderung menurun akibat melemahnya ikatan antar serat, sehingga diperlukan agen penguat untuk meningkatkan tensile strength pada produk higienis seperti tisu dan *paper towel*. Oleh karena itu, dalam aplikasi tisu modern, sifat seperti kelembutan atau tampilan visual sering dianggap kurang kritis dibandingkan kekuatan basah dan daya serap yang secara langsung menentukan kinerja pengeringan dan pembersihan [3].

Performa kertas tisu merupakan fungsi dari beberapa variabel seperti jenis teknologi yang digunakan untuk pembuatan, bahan baku, aditif dan lain sebagainya. Konfigurasi mesin produksi juga diyakini memiliki dampak pada performa kertas tisu. Beberapa konfigurasi mesin yang pernah digunakan antara lain adalah penekanan basah, *creping* dan kombinasi jaringan kertas tisu. Teknologi kovensional menggunakan mekanisme penekanan basah yang dapat memproduksi kertas tisu dengan karakteristik padat, kuat, lembut dan memiliki daya serap air yang tinggi. Saat ini teknologi manufaktur kertas tisu telah maju di mana sudah menggunakan pengering udara sehingga kualitas kertas tisu menjadi lebih baik. Salah satu teknologi terbaru yang digunakan adalah atmos yang merupakan singkatan dari *advanced tisu molding system*. Proses pengeringan dilakukan secara manual sampai konsentrasi air dalam kertas tisu mencapai 40 persen sebelum kertas tersebut dialirkan ke permukaan *yankee* [4].

Salah satu dari turunan kitosan yaitu *carboxymethyl chitosan* (CMCh), yang ramah lingkungan digunakan untuk meningkatkan kekuatan kertas. CMCh disintesis melalui proses karboksimetilasi, kemudian dikarakterisasi sifat fisik dan kimianya sebelum diaplikasikan pada *pulp* kayu lunak sebagai *dry strength agent* dan *wet strength agent*. Penambahan CMCh mampu meningkatkan sifat mekanik kertas secara signifikan, terutama pada kekuatan tarik kering dan basah. Pada konsentrasi tertentu, CMCh meningkatkan *tensile index* serta memperkuat ikatan antar serat, sehingga lembaran kertas menjadi lebih kuat dan stabil. Selain itu, penggunaan CMCh juga meningkatkan retensi *filler* tanpa menurunkan kualitas mekanik kertas. Temuan ini menunjukkan bahwa turunan kitosan berpotensi menjadi alternatif aditif berbasis biopolimer yang efektif dan ramah lingkungan untuk meningkatkan performa kertas, termasuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tarik tinggi seperti kertas tisu [5].

Peningkatan kekuatan kertas tisu juga dilakukan dengan mengkombinasikan komposisi *pulp*. Campuran 20% *pulp* kayu lunak dan 80% *pulp* serat panjang mampu menngkatkan kekuatan tarik sebesar 15,0% dan kekuatan basah sebesar 12,8% [6]. Untuk meningkatkan kekuatan tarik atau daya serap air pada kertas tisu yang dihasilkan, digunakan bahan aditif yang bersifat antibakteri seperti kitosan dan kulit manggis. Dua faktor yang digunakan yaitu suhu dan konsentrasi NaOH yang ternyata mempengaruhi komposisi kimia (kandungan selulosa dan lignin) serta kualitas fisik (kekuatan tarik dan penyerapan air). Diawali dengan tahap *delignification*, penghilangan kandungan lignin dari bahan *pulp* dilakukan dengan menggunakan natrium hidroksida (NaOH) dan mengaduknya selama 1,5 jam pada berbagai konsentrasi (4–10%) dan suhu (60–90°C). Kekuatan tarik yang tinggi, daya serap air, dan komposisi kimia yang ideal dengan kandungan lignin yang rendah meningkatkan *tensile strength*. Suhu 90°C dan konsentrasi NaOH 4% merupakan kondisi ideal untuk meningkatkan kekuatan kertas tisu [7].

Peningkatan *tensile strength* kertas juga ditingkatkan melalui proses konversi *embossing* di mana permukaan lembaran kertas tisu diubah di bawah tekanan kuat untuk memungkinkan berbagai kegunaan. Ketika lembaran kertas dipadatkan, tekanan meningkatkan kekuatan mekaniknya tetapi tidak berpengaruh pada daya serap terhadap air [8]. Peningkatan kekuatan tarik kertas tisu juga dilakukan dengan menggunakan prosedur krep kunci. Prosedur ini memerlukan penekanan dan penempelan jaring basah ke silinder *yankee* berkecepatan tinggi, kemudian melepaskan lembaran krep menggunakan pisau krep stasioner untuk membuat lipatan mikro sporadis pada struktur jaringan. Elemen-elemen yang dianalisis terdiri dari kecepatan pengerutan, karakteristik bahan baku *pulp*, lapisan *Yankee*, pisau krep, dan kecepatan mesin pengering. Hasilnya menunjukkan bahwa proses *creping* meningkatkan *tensile strength* [9].

Beberapa upaya telah dilakukan untuk menambah kekuatan tisu seperti penambahan aditif, pengaturan sudut pisau creping, pengaturan konsentrasi bubur kertas dan lain sebagainya. Namun identifikasi faktor-faktor yang berpengaruh pada kekuatan tarik kertas serta optimisasi faktor-faktor tersebut masih belum dilakukan sehingga perlu dilakukan studi untuk meneliti hal ini.

METODE

1. *Factor screening*

Factor screening menggunakan *full design* dengan 2 replikasi. Pengaruh dari masing-masing faktor diestimasi dengan cara sebagai berikut.

$$\text{Kontras}_{AB.....K}=(a\pm1)(b\pm1)\ldots\ldots..(k\pm1) \quad (1)$$

$$\text{Pengaruh}_{A,B.....K}=\frac{2}{n2^k}\text{Kontras}_{AB.....K} \quad (2)$$

Uji signifikansi koefisien regresi dilakukan dengan menggunakan uji F yang ditunjukkan oleh persamaan 3 dan uji t yang ditunjukkan oleh persamaan 4 [10].

$$F_0=\frac{MS_{model}}{MS_e} \quad (3)$$

$$t_0=\frac{\text{Effect}}{\frac{2\sigma^2}{\sqrt[2]{n2^k}}} \quad (4)$$

2. *Steepest ascent*

Steepest ascent dilakukan berdasarkan pada faktor-faktor yang berdampak dominan pada respon berdasarkan pada hasil analisis *factor screening*. Variabel yang digunakan harus dalam bentuk standar. Analisis dilakukan dengan menggunakan model orde satu yang ditunjukkan oleh persamaan 5.

$$E(Y)=\widehat{\beta_0}+\sum_{i=1}^{k}\widehat{\beta_i}x_i \quad (5)$$

Penentuan kurvatur yang disebabkan karena interaksi atau faktor kuadratik dilakukan dengan menghitung *sum of square* (SS) interaksi yang ditunjukkan oleh persamaan 6. Selanjutnya SS interaksi yang diperoleh dari persamaan 6 digunakan untuk uji F yang ditunjukkan oleh persamaan 7.

$$\text{Sum of Squares}_{interaksi}=\frac{1}{n2^k}(\text{Kontras}_{interaksi})^2 \quad (6)$$

$$F=\frac{\text{Sum of square}_{Interaction}}{\sigma^2} \quad (7)$$

Keterangan:

n_f=jumlah pengamatan di sekeliling titik pusat atau kombinasi faktorial

n_c=jumlah pengamatan di titik pusat

$\overline{y_f}$=rata-rata *response* di sekeliling titik pusat

$\overline{y_c}$= rata-rata *response* di titik pusat

Penentuan kurvatur juga dapat dilakukan dengan menggunakan SS *pure quadratic* yang ditunjukkan oleh persamaan 8. Nilai SS *pure quadratic* yang diperoleh dari persamaan 8 digunakan untuk uji F sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 9.

$$\text{Sum of square}_{\text{pure quadratic}}=\frac{n_f n_c\left(\overline{y}_f-\overline{y}_c\right)^2}{n_f+n_c} \quad (8)$$

$$F=\frac{\text{Sum of square}_{\text{pure quadratic}}}{\sigma^2} \quad (9)$$

Pergerakan eksperimen dilakukan berdasarkan pada pergerakan variabel bebas yang mengacu pada pada koefisien absolut yang terbesar. Variabel absolut yang lain juga bergerak dengan kecepatan pergerakan yang dihitung dengan persamaan 10.

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{\beta_j} \Delta x_j \tag{10}$$

Keterangan:
Δx_i=Pergerakan variabel dengan koefisien absolut yang lebih kecil dari x_j
Δx_j=Pergerakan variabel dengan koefisien absolut yang lebih besar dari x_i
β_j=Koefisien absolut variabel yang lebih besar dari x_i
β_i=Koefisien absolut variabel yang lebih kecil dari x_j

Eksperimen dilakukan sampai kurvatur ditemukan. Hubungan antara kenaikan variabel standar dan variabel natural dihitung dengan persamaan 11.

$$\Delta x_i = \frac{\Delta \xi_i}{\Delta} \tag{11}$$

:
Δx_i=Kenaikan *coded* variabel
$\Delta \xi_i$=Kenaikan variabel natural
Δ=Selisih kenaikan yang ditetapkan untuk variabel natural

3. Penentuan titik optimum
Titik optimum terjadi karena adanya adanya pengaruh kuadratik dan interaksi. Analisisnya dilakukan dengan menggunakan persamaan orde dua yang ditunjukkan dengan persamaan 12.

$$E(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + e \tag{12}$$

Persamaan 12 dikalkulasi dengan menggunakan matriks sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 13.

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\beta_0} + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \tag{13}$$

Penentuan titik optimum dilakukan dengan persamaan 15 yang merupakan hasil penurunan dari persamaan 13.

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial(\boldsymbol{\beta_0} + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x})}{\partial \mathbf{y}} = b + 2\mathbf{B}\mathbf{x} = 0 \tag{14}$$

$$\mathbf{x_s} = -\frac{1}{2}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \tag{15}$$

4. Faktor dan respon
Terdapat 4 faktor yang dieksperimenkan adalah adalah konsentrasi air, konsentrasi *raisabond* 15, konsentrasi *chitosan* dan konsentrasi *soft pulp*. Terdapat 2 respon yang diukur *yaitu tensile strength* dan *tear strength*.
5. Desain eksperimen.
Desain eksperimen yang digunakan adalah *full model* dengan empat replikasi untuk memberikan estimasi variansi yang akurat[11].

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. *Factor screening*

Langkah pertama adalah melakukan *factor screening*. Beberapa faktor yang dieksperimenkan adalah adalah konsentrasi air, konsentrasi *raisabond* 15, konsentrasi *chitosan* dan konsentrasi *soft pulp*. Konsentrasi air terdiri atas dua level yaitu 55% dan 60%. Jika konsentrasi air sebesar 55 persen, maka konsentrasi *chitosan*, *raisabond* 15, dan konsentrasi *soft pulp* secara total adalah sebesar 45%. Jika konsentrasi air sebesar 60 persen, maka konsentrasi *chitosan*, *raisabond* 15, dan konsentrasi *soft pulp* secara total adalah sebesar 40%. Konsentrasi *chitosan* untuk *factor screening* terdiri atas dua level yakni 1 persen dan 2 persen. Konsentrasi *raisabond* 15 terdiri atas dua level yakni 1 persen dan 2 persen. Konsentrasi *soft pulp* terdiri atas dua level yakni 10 persen dan 20 persen. Konsentrasi air dieksperimenkan pada dua level yaitu 10 persen dan 20 persen. Hasil eksperimen disajikan pada table 1. Tabel 1 menunjukkan hasil eskperimen yang dilakukan dengan mengkombinasikan konsentrasi air, resin dan *soft pulp*. Kombinasi faktor tersebut dieksperimenkan untuk mengetahui dampaknya pada *response*. Terdapat dua *response* yang diukur yakni *tensile strength* dan *tear strength*.

Tabel 1. Hasil eksperimen dengan *full design*

Run	**%Air**	**% *Raisabond* 15**	**% *Chitosan***	**% Total *pulp***	**% *Soft pulp***	***Tensile strength***	***Tear strength***
1	20% (1)	2% (1)	1% (-1)	77%	10% (-1)	4.9	2.2
2	20% (1)	1% (-1)	2% (1)	77%	10% (-1)	5.7	2.4
3	10% (-1)	2% (1)	2% (1)	86%	10% (-1)	4.3	2.1
4	10% (-1)	2% (1)	1% (-1)	87%	10% (-1)	3.7	1.7
5	20% (1)	1% (-1)	1% (-1)	78%	20% (1)	5.7	2.5
6	10% (-1)	2% (1)	2% (1)	86%	20% (1)	5.2	2.6
7	10% (-1)	1% (-1)	1% (-1)	88%	20% (1)	4.3	1.9
8	20% (1)	1% (-1)	2% (1)	77%	20% (1)	6	2.6
9	20% (1)	1% (-1)	2% (1)	77%	10% (-1)	5.6	2.2
10	20% (1)	1% (-1)	1% (-1)	78%	10% (-1)	4.9	1.9
11	20% (1)	2% (1)	2% (1)	76%	20% (1)	6.6	3
12	10% (-1)	1% (-1)	2% (1)	87%	10% (-1)	4.6	1.8
13	10% (-1)	2% (1)	1% (-1)	87%	20% (1)	5.1	2.2
14	10% (-1)	1% (-1)	1% (-1)	88%	20% (1)	4.2	1.9
15	20% (1)	2% (1)	2% (1)	76%	20% (1)	6.4	2.9
16	10% (-1)	2% (1)	1% (-1)	87%	20% (1)	4.8	2.2
17	20% (1)	2% (1)	1% (-1)	77%	20% (1)	5.8	2.5
18	10% (-1)	1% (-1)	2% (1)	87%	20% (1)	4.5	2.4
19	20% (1)	2% (1)	2% (1)	76%	10% (-1)	5.6	2.6
20	10% (-1)	2% (1)	2% (1)	86%	20% (1)	5	2.5
21	10% (-1)	1% (-1)	2% (1)	87%	20% (1)	4.8	2.4
22	20% (1)	1% (-1)	1% (-1)	78%	20% (1)	5.2	2.3
23	20% (1)	2% (1)	1% (-1)	77%	20% (1)	6.3	2.5
24	20% (1)	2% (1)	1% (-1)	77%	10% (-1)	4.8	2.1
25	10% (-1)	2% (1)	1% (-1)	87%	10% (-1)	3.8	1.9
26	10% (-1)	2% (1)	2% (1)	86%	10% (-1)	4.8	2
27	20% (1)	1% (-1)	2% (1)	77%	20% (1)	6.5	2.8
28	10% (-1)	1% (-1)	1% (-1)	88%	10% (-1)	3.5	1.6
29	20% (1)	1% (-1)	1% (-1)	78%	10% (-1)	5	2.1
30	10% (-1)	1% (-1)	2% (1)	87%	10% (-1)	3.8	2
31	10% (-1)	1% (-1)	1% (-1)	88%	10% (-1)	3.8	1.6
32	20% (1)	2% (1)	2% (1)	76%	10% (-1)	5.9	2.6

Hasil observasi yang direkapitulasi pada tabel 1 menunjukkan adanya pengaruh faktor pada kedua *response*. Langkah berikutnya adalah melakukan analisis orde satu untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berdampak signifikan pada respon. Hasil analisis disajikan pada tabel 2 dan tabel 3.

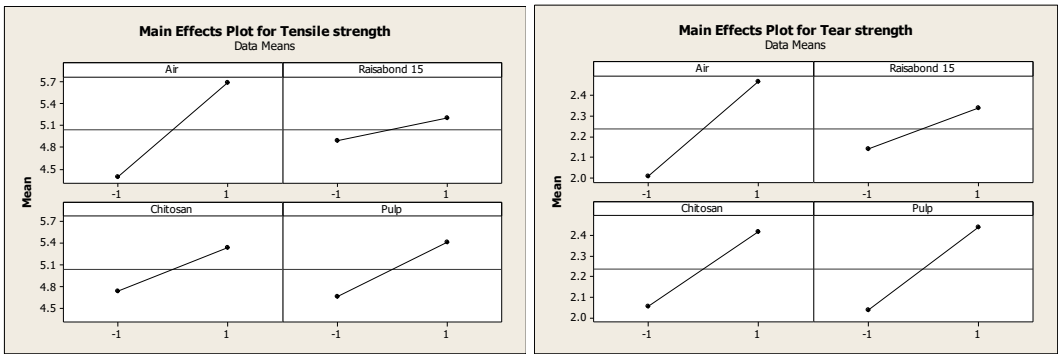
Tabel 2. Analisis *first order* untuk *tensile strength*

Tensile strength					
Term	***Effect***	***Coef***	***SE Coef***	***T***	***P***
Constant		5.0394	0.04688	107.51	0
Air	1.2937	0.6469	0.04687	13.8	0
Raisabond	0.3063	0.1531	0.04688	3.27	0.003
Chitosan	0.5937	0.2969	0.04688	6.33	0
Pulp	0.7512	0.3756	0.04687	8.01	0
R Square	91.58%				

Tabel 3. Analisis *first order* untuk *tear strength*

Tear strength					
Term	*Effect*	*Coef*	*SE Coef*	*T*	*P*
Constant		2.237	0.01554	143.92	0
Air	0	0.229	0.01554	14.73	0
Raisabond	0.2	0.1	0.01554	6.43	0
Chitosan	0.3625	0.1812	0.01554	11.66	0
Pulp	0.4	0.2	0.01554	12.87	0
R Square	95.40%				

Tabel 3 menunjukkan bahwa kadar air, kadar *raisabond*, kadar *chitosan*, dan kadar *soft pulp* memiliki pengaruh positif signifikan pada *tensile strength*. Penambahan kadar keempat bahan tersebut dapat meningkatkan *tensile strength*. Tabel 4 juga memberikan kesimpulan yang sama di mana keempat faktor berdapak positif signifikan pada *tear strength*. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kadar dari keempat faktor meningkatkan *tear strength*. Nilai R square untuk kedua *response* juga sangat tinggi dan hal ini mendukung kesimpulan bahwa keempat faktor berdampak positif signifikan pada *response*.



Gambar 1. *Main effect plot* untuk *tensile strength* dan *tear strength*

Main effect plots yang ditunjukkan oleh gambar 1 merupakan grafik yang menggambarkan posisi *response* terhadap faktor atau variabel bebasnya. Jika grafiknya datar maka faktor tidak berpengaruh signifikan pada *response*. Jika grafiknya tidak datar maka faktor memiliki pengaruh yang signifikan pada *response*. Besar pengaruh dari masing-masing faktor ditentukan oleh besar slope dari garis tersebut. Gambar 1 menunjukkan bahwa besar *slope* untuk seluruh faktor adalah positif sehingga seluruh faktor berdampak positif signifikan pada *tensile strength*. dan *tear strength*.

2. *Steepest ascent*

Berdasarkan pada tabel 2, koefisien kadar air memiliki nilai absolut yang terbesar dibandingkan dengan nilai absolut dari koefisien regresi yang lain. Arah *steepest ascent* mengacu pada nilai koefisien absolut kadar air dan disajikan sebagai berikut.

$$\Delta_{coded\,\%\,\text{air}} = \frac{\text{Koefisien regresi \% air}}{\text{Koefisien regresi \%air}} = \frac{0.65}{0.65} = 1$$

$$\Delta_{coded\%\ raisabond}=\frac{\text{Koefisien regresi \% } raisabond}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.15}{0.65}=0.237$$
$$\Delta_{coded\%\ chitosan}=\frac{\text{Koefisien regresi \% } chitosan}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.29}{0.65}=0.459$$
$$\Delta_{coded\%\ pulp}=\frac{\text{Koefisien regresi \% } soft\ pulp}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.38}{0.65}=0.581$$

Kenaikan yang dihitung merupakan kenaikan faktor dalam bentuk *coded*, kenaikan faktor dalam bentuk natural ditentukan berdasarkan pada standar deviasi pada saat mengubah faktor natural ke dalam bentuk *coded* sebagaimana mengacu pada eksperimen *factor screening*. *Steepest ascent* untuk *tensile strength* dilakukan secara bertahap dimulai pada posisi kadar air sebesar 10%, kadar *raisabond* sebesar 1%, kadar *chitosan* sebesar 1% dan kadar *pulp* sebesar 10% dan bertambah sesuai dengan arah dari kenaikan berdasarkan koefisien absolut terbesar dan hasilnya disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. *Steepest ascent* untuk *tensile strength*

Faktor	***Coded* Faktor**				**Natural faktor**				***Tensile strength***
	% air	**% *Raisabond***	**% *Chitosan***	**% *Pulp***	**% air**	**% *Raisabond***	**% *Chitosan***	**% *Pulp***	
Koefisien	0.647	0.153	0.297	0.376					
Kenaikan	1.000	0.237	0.459	0.581	5.00%	0.12%	0.23%	2.90%	
Nilai awal	0.000	0.000	0.000	0.000	10.00%	1.00%	1.00%	10.00%	
1	1.000	0.237	0.459	0.581	15.00%	1.12%	1.23%	12.90%	4.8
2	2.000	0.473	0.918	1.161	20.00%	1.24%	1.46%	15.81%	5.1
3	3.000	0.710	1.377	1.742	25.00%	1.36%	1.69%	18.71%	6.8
4	4.000	0.947	1.836	2.322	30.00%	1.47%	1.92%	21.61%	7.5
5	5.000	1.183	2.295	2.903	35.00%	1.59%	2.15%	24.52%	8.8
6	6.000	1.420	2.754	3.484	40.00%	1.71%	2.38%	27.42%	9.5
7	7.000	1.657	3.213	4.064	45.00%	1.83%	2.61%	30.32%	10.3
8	8.000	1.893	3.672	4.645	50.00%	1.95%	2.84%	33.22%	11.7
9	9.000	2.130	4.131	5.226	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	12.3
10	10.000	2.367	4.590	5.806	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	12.8
11	11.000	2.603	5.049	6.387	65.00%	2.30%	3.52%	41.93%	12.1
12	12.000	2.840	5.507	6.967	70.00%	2.42%	3.75%	44.84%	11.2

Tabel 4 menunjukkan bahwa titik optimum untuk nilai *tensile strength* adalah 12.8 yang berada pada eksperimen ke-10.

Berdasarkan pada tabel 3, koefisien kadar air juga memiliki nilai *absolute* yang terbesar dibandingkan dengan nilai absolute dari koefisien regresi yang lain sebagaimana untuk persamaan regresi *tensile strength*. Arah *steepest ascent* mengacu pada nilai koefisien absolut kadar air dan disajikan sebagai berikut.

$$\Delta_{\text{coded \% air}}=\frac{\text{Koefisien regresi \% air}}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.23}{0.23}=1$$
$$\Delta_{\text{coded \% raisabond}}=\frac{\text{Koefisien regresi \% raisabond}}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.1}{0.23}=0.437$$
$$\Delta_{\text{coded \% chitosan}}=\frac{\text{Koefisien regresi \% chitosan}}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.18}{0.23}=0.791$$
$$\Delta_{\text{coded \% pulp}}=\frac{\text{Koefisien regresi \% soft pulp}}{\text{Koefisien regresi \%air}}=\frac{0.2}{0.23}=0.873$$

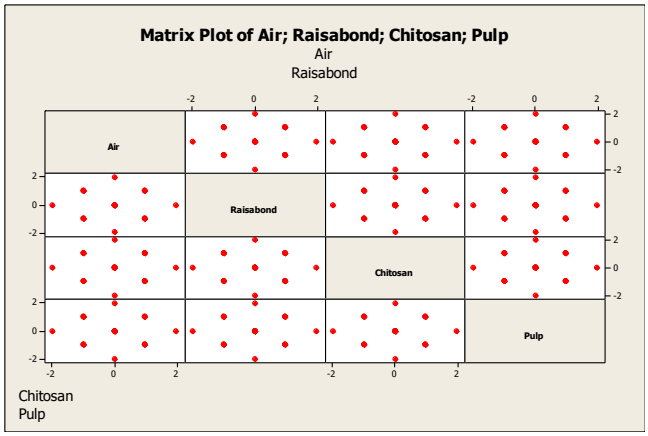
Kenaikan faktor dalam bentuk natural ditentukan berdasarkan pada standar deviasi pada saat mengubah faktor natural ke dalam bentuk *coded* sebagaimana mengacu pada eksperimen *factor screening*. *Steepest ascent* untuk *tear strength* dilakukan secara bertahap dimulai pada posisi kadar air sebesar 10%, kadar *raisabond* sebesar 1%, kadar *chitosan* sebesar 1% dan kadar *soft pulp* sebesar 10% dan bertambah sesuai dengan arah dari kenaikan berdasarkan koefisien absolut terbesar dan hasinya disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. *Steepest ascent* untuk *tear strength*

Faktor	*Coded Factor*				*Natural Factor*				*Tear strength*
	% air	% *Raisabond*	% *Chitosan*	% *Pulp*	% air	% *Raisabond*	% *Chitosan*	% *Soft Pulp*	
Koefisien	0.229	0.1	0.1812	0.2					
Kenaikan	1.000	0.437	0.791	0.873	5.00%	0.22%	0.40%	4.37%	
Nilai awal	0.000	0.000	0.000	0.000	10.00%	1.00%	1.00%	10.00%	
1	1.000	0.437	0.791	0.873	15.00%	1.12%	1.23%	12.90%	2.0
2	2.000	0.873	1.583	1.747	20.00%	1.24%	1.46%	15.81%	2.5
3	3.000	1.310	2.374	2.620	25.00%	1.36%	1.69%	18.71%	2.9
4	4.000	1.747	3.165	3.493	30.00%	1.47%	1.92%	21.61%	3.3
5	5.000	2.183	3.956	4.367	35.00%	1.59%	2.15%	24.52%	3.6
6	6.000	2.620	4.748	5.240	40.00%	1.71%	2.38%	27.42%	4.1
7	7.000	3.057	5.539	6.114	45.00%	1.83%	2.61%	30.32%	4.5
8	8.000	3.493	6.330	6.987	50.00%	1.95%	2.84%	33.22%	5.0
9	9.000	3.930	7.121	7.860	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	5.6
10	10.000	4.367	7.913	8.734	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	5.1
11	11.000	4.803	8.704	9.607	65.00%	2.30%	3.52%	41.93%	4.8
12	12.000	5.240	9.495	10.480	70.00%	2.42%	3.75%	44.84%	4.3

Tabel 5 menunjukkan bahwa *tear strength* bernilai optimum sebesar 5,6 pada eksperimen ke-9. Berdasarkan pada hasil ini, penentuan titik optimum dilakukan.

3. Penentuan titik optimum



Gambar 2. *Central composite design*

Desain yang digunakan adalah *full central composite design* dengan 4 faktor dan satu replikasi dan ditunjukkan pada gambar 2. Terdapat 31 eksperimen yang harus dilakukan dan 16 titik pengamatan di setiap ujung kubus. Terdapat 8 titik pengamatan aksial dan 7 titik pengamatan di daerah pusat. Pengamatan di titik aksial dan titik pusat dilakukan untuk mendeteksi adanya pengaruh interaksi dan pengaruh kuadrat. Nilai *tensile strength* mencapai optimum pada saat kadar air sebesar 60%, kadar *raisabond* sebesar 2.18%, kadar *chitosan* sebesar 3.29%, dan kadar *soft pulp* sebesar 39.03%. Nilai *tear strength* mencapai optimum pada saat kadar air sebesar 55%, kadar *raisabond* sebesar 2.07%, kadar *chitosan* sebesar 3.07%, dan kadar *soft pulp* sebesar 36.13%. Berdasarkan pada temuan tersebut, optimasi dilakukan pada titik optimum *tensile strength* dan *tear strength*. Hasil eksperimen pada titik optimum *tensile strength* disajikan pada tabel 6. Hasil eksperimen pada titik optimum *tear strength* disajikan pada tabel 7.

Tabel 6. Hasil eksperimen *central composite design* untuk *tensile strength*

RunOrder	*Coded factor*				*Natural factor*				*Tensile strenth*
	Air	*Raisabond*	*Chitosan*	*Pulp*	Air	*Raisabond*	*Chitosan*	*Soft Pulp*	
1	1	1	1	-1	65.00%	2.68%	3.79%	34.03%	9.29
2	1	-1	1	1	65.00%	1.68%	3.79%	44.03%	9.20
3	-2	0	0	0	50.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.20

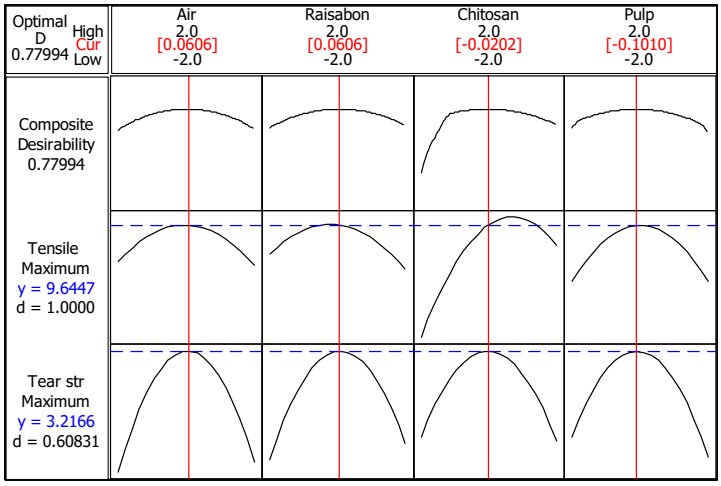
RunOrder	*Coded factor*				*Natural factor*				*Tensile strenth*
	Air	***Raisabond***	***Chitosan***	***Pulp***	**Air**	***Raisabond***	***Chitosan***	***Soft Pulp***	
4	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.60
5	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.70
6	0	2	0	0	60.00%	3.18%	3.29%	39.03%	9.03
7	1	-1	1	-1	65.00%	1.68%	3.79%	34.03%	9.28
8	-1	1	1	1	55.00%	2.68%	3.79%	44.03%	9.20
9	-1	-1	-1	1	55.00%	1.68%	2.79%	44.03%	8.51
10	0	0	0	2	60.00%	2.18%	3.29%	49.03%	8.97
11	1	-1	-1	1	65.00%	1.68%	2.79%	44.03%	8.91
12	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.60
13	-1	1	1	-1	55.00%	2.68%	3.79%	34.03%	9.29
14	-1	1	-1	-1	55.00%	2.68%	2.79%	34.03%	8.81
15	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.70
16	-1	-1	1	-1	55.00%	1.68%	3.79%	34.03%	9.38
17	-1	-1	-1	-1	55.00%	1.68%	2.79%	34.03%	8.60
18	0	-2	0	0	60.00%	1.18%	3.29%	39.03%	9.31
19	1	-1	-1	-1	65.00%	1.68%	2.79%	34.03%	8.90
20	-1	1	-1	1	55.00%	2.68%	2.79%	44.03%	8.72
21	1	1	1	1	65.00%	2.68%	3.79%	44.03%	9.30
22	0	0	2	0	60.00%	2.18%	4.29%	39.03%	9.41
23	-1	-1	1	1	55.00%	1.68%	3.79%	44.03%	9.40
24	1	1	-1	-1	65.00%	2.68%	2.79%	34.03%	8.51
25	1	1	-1	1	65.00%	2.68%	2.79%	44.03%	8.52
26	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.60
27	2	0	0	0	70.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.10
28	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.70
29	0	0	-2	0	60.00%	2.18%	2.29%	39.03%	8.14
30	0	0	0	0	60.00%	2.18%	3.29%	39.03%	9.70
31	0	0	0	-2	60.00%	2.18%	3.29%	29.03%	8.85

Tabel 7. Hasil eksperimen *central composite design* untuk *tear strength*

RunOrder	*Coded factor*				*Natural factor*				*Tear strength*
	Air	***Raisabond***	***Chitosan***	***Pulp***	**Air**	***Raisabond***	***Chitosan***	***Soft Pulp***	
1	1	1	1	-1	60.00%	2.57%	3.57%	31.13%	2.86
2	1	-1	1	1	60.00%	1.57%	3.57%	41.13%	2.69
3	-2	0	0	0	45.00%	2.07%	3.07%	36.13%	2.71
4	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.20
5	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.20
6	0	2	0	0	55.00%	3.07%	3.07%	36.13%	2.83
7	1	-1	1	-1	60.00%	1.57%	3.57%	31.13%	2.95
8	-1	1	1	1	50.00%	2.57%	3.57%	41.13%	2.68
9	-1	-1	-1	1	50.00%	1.57%	2.57%	41.13%	2.68
10	0	0	0	2	55.00%	2.07%	3.07%	46.13%	2.83
11	1	-1	-1	1	60.00%	1.57%	2.57%	41.13%	2.89
12	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.20
13	-1	1	1	-1	50.00%	2.57%	3.57%	31.13%	2.85
14	-1	1	-1	-1	50.00%	2.57%	2.57%	31.13%	2.85
15	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.30
16	-1	-1	1	-1	50.00%	1.57%	3.57%	31.13%	2.94
17	-1	-1	-1	-1	50.00%	1.57%	2.57%	31.13%	2.95
18	0	-2	0	0	55.00%	1.07%	3.07%	36.13%	2.72
19	1	-1	-1	-1	60.00%	1.57%	2.57%	31.13%	2.76
20	-1	1	-1	1	50.00%	2.57%	2.57%	41.13%	2.88
21	1	1	1	1	60.00%	2.57%	3.57%	41.13%	2.89
22	0	0	2	0	55.00%	2.07%	4.07%	36.13%	2.83
23	-1	-1	1	1	50.00%	1.57%	3.57%	41.13%	2.68
24	1	1	-1	-1	60.00%	2.57%	2.57%	31.13%	2.86
25	1	1	-1	1	60.00%	2.57%	2.57%	41.13%	2.89
26	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.10
27	2	0	0	0	65.00%	2.07%	3.07%	36.13%	2.73
28	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.30
29	0	0	-2	0	55.00%	2.07%	2.07%	36.13%	2.83

RunOrder	*Coded factor*				*Natural factor*				*Tear strength*
	Air	***Raisabond***	***Chitosan***	***Pulp***	**Air**	***Raisabond***	***Chitosan***	***Soft Pulp***	
30	0	0	0	0	55.00%	2.07%	3.07%	36.13%	3.20
31	0	0	0	-2	55.00%	2.07%	3.07%	26.13%	2.77

Hasil eksperimen yang ditunjukkan pada tabel 6 dan tabel 7 dilakukan pada kondisi optimum *tensile strength* yaitu pada saat kadar air sebesar 60%, kadar *raisabond* sebesar 2.18%, kadar *chitosan* sebesar 3.29%, dan kadar *pulp* sebesar 39.03%. Selanjutnya optimasi dilakukan secara simultan dengan menggunakan *desirability value* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3. Hasil optimasi yang ditunjukkan pada gambar 3 menunjukkan bahwa kadar air sebesar 0.0606, kadar *raisabond* sebesar 0.0606, kadar *chitosan* sebesar -0.0202, dan kadar *pulp* sebesar -0.1010 mampu mencapai titik optimum. Nilai faktor dalam *coded* tersebut mendekati nol sehingga eksperimen tersebut berada pada titik optimum. Nilai optimum untuk *tensile strength* dan *tear strength* dicapai pada kadar air sebesar 60%, kadar *raisabond* sebesar 2.18%, kadar *chitosan* sebesar 3.29%, dan kadar *pulp* sebesar 39.03%. Pada kondisi optimum tersebut, nilai *tensile strength* adalah sebesar 9.64 N/m dan nilai *tear strength* sebesar 3.22 N/m.



Gambar 3. Optimasi

4. Pembahasan

Desain eksperimen yang digunakan untuk analisis *screening* merupakan *full design* dengan 3 faktor. Desain tersebut tidak mengandung alias atau korelasi antara faktor serta antara interaksi sehingga desain tersebut adalah desain yang orthogonal. Desain yang orthogonal menjamin ketiadaan multikorelasi sehingga meningkatkan akurasi estimasi koefisien regresi. Hasil analisis *factor screening* menunjukkan bahwa kadar air, kadar *raisabond*, kadar *chitosan*, dan kadar soft *pulp* memiliki pengaruh yang signifikan pada *tensile strength* dan *tear strength*. Penambahan kadar zat-zat ini menambah kekuatan kertas tisu. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *coded* faktor agar koefisien regresi hasil estimasi tidak dipengaruhi oleh magnitudo faktor.

Arah *steepest ascent* mengikuti arah dari faktor yang memiliki koefisien absolut terbesar. Hal ini dilakukan agar pencarian titik optimum lebih efisien. Standar deviasi yang digunakan adalah standar deviasi sampel agar arah steepest ascent lebih akurat. *Steepest ascent* membawa ke titik optimum *tensile strength* dan *tear strength*. Analisis *second order* menunjukkan bahwa seluruh faktor memiliki pengaruh kuadratik yang signifikan pada *tensile strength* dan *tear strength*. Hal ini menunjukkan bahwa pengamatan berada pada titik yang mendekati area optimum. Optimasi dilakukan pada daerah ini.

Optimasi dilakukan dengan menggunakan *central composite design* yang merupakan desain yang menggabungkan antara pengamatan di daerah pusat, aksial dan tepi kubus eksperimen. Pengamatan di daerah pusat dan aksial dilakukan untuk mendeteksi adanya pengaruh kuadratik dan interaksi yang signifikan. Pengamatan di daerah kubus dilakukan untuk mendeteksi adanya pengaruh linier. Hasil pengamatan dengan *central composite design* menunjukkan adanya pengaruh kuadratik yang signifikan, Pengaruh interaksi tidak memiliki dampak yang signifikan pada *tensile*

strength dan *tear strength*. Hal ini terlihat jelas pada hasil analisis *second order*. Hasil analisis *second order* menunjukkan hanya pengaruh kuadratik tiap faktor yang signifikan pada *tensile strength* dan *tear strength*. Penambahan nilai faktor akan meningkatkan kedua *response* pada suatu titik dan kemudian nilai kedua *response* akan menurun. Hal ini menunjukkan bahwa *tensile strength* dan *tear strength* memiliki nilai yang optimum. Penentuan titik optimum kedua *response* dilakukan secara simultan dengan nilai *desirability* sebesar 0.78. Hal ini menandakan bahwa nilai optimum memiliki kesesuaian yang baik dan bisa diandalkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Universitas Putera Batam yang sudah memberikan dukungan dalam berbagai hal termasuk dalam penggunaan laboratorium. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan sejawat dosen yang sudah memberikan masukan untuk meningkatkan riset ini.

KESIMPULAN

Studi ini berhasil menemukan nilai-nilai kadar air, kadar *raisabond*, kadar *chitosan* dan kadat soft *pulp* yang mampu mengoptimumkan *tensile strength* dan *tear strength* sebagai berikut:

1. Nilai optimum untuk *tensile strength* dan *tear strength* dicapai pada kadar air sebesar 60%, kadar *raisabond* sebesar 2.18%, kadar *chitosan* sebesar 3.29%, dan kadar *pulp* sebesar 39.03%.
2. Nilai *tensile strength* pada kondisi optimum adalah sebesar 9.64 N/m dan nilai *tear strength* pada kondisi optimum adalah sebesar 3.22 N/m.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Kumar Jain and R. K Jain, "Development of High Strength Towel Paper," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 10, no. 5, pp. 1159–1163, May 2021, doi: 10.21275/sr21525170011.

[2] I. Francolini, L. Galantini, F. Rea, C. Di Cosimo, and P. Di Cosimo, "Polymeric Wet-Strength Agents in the Paper Industry: An Overview of Mechanisms and Current Challenges," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 11, pp. 1–24, Jun. 2023, doi: 10.3390/ijms24119268.

[3] E. Husić and Š. Botonjić, "Effect of Addition of Wet-Strength Agent on Tensile Strength of Paper," *Journal of Sustainable Technologies and Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 30–35, Jun. 2023, doi: 10.57131/jstm.2023.4.5.

[4] M. Prinz, H. Zollner-croll, and C. Wölfle, "Hygiene Paper Softness – New insight into the manufacturing process with an optimised tissue softness analyser," *16th Minisymposium Verfahrenstechnik and 7th Partikelforum*, no. March 2021, pp. 1–5, 2020, doi: 10.34726/627.

[5] S. Roy, M. M. Rahman, T. Ferdous, M. N. A. Likhon, and M. S. Jahan, "Preparation of chitosan derivative and its application in papermaking," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 256, p. 128371, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128371.

[6] S. K. Jain and R. K. Jain, "Development of High Strength Towel Paper," *International Journal of Science and Research*, vol. 10, no. 5, pp. 1159–1163, 2021, doi: 10.21275/SR21525170011.

[7] N. Suseno, M. E. Gondokesumo, and P. R. Permatasari, "Utilization of Corn Husk for Tissue Papermaking," in *AIP Conference Proceedings*, 2021, pp. 1–7.

[8] J. C. Vieira *et al.*, "Embossing Pressure Effect on Mechanical and Softness Properties of Industrial Base Tissue Papers with Finite Element Method Validation," *Materials*, vol. 15, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15124324.

[9] T. Qin *et al.*, "Creping technology and its factors for tissue paper production: a review," Oct. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s00107-023-01947-2.

[10] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 10th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2021.

[11] Patrick, I. Wayan Sukania, and Adianto, "Analisa Parameter Optimal untuk Kualitas Hasil Cetak 3d Printer dengan Metode Taguchi," *Jurnal Mitra Teknik Industri*, vol. 1, no. 2, pp. 135–145, 2022, doi: https://doi.org/10.24912/jmti.v1i2.21250.