

Pemodelan Sebaran Api Kebakaran Hutan Berdasarkan Jenis dan Lokasi Bahan Pembakar

Andrianus Radipta, Prima Kristalina, Ronny Susetyoko
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia
e-mail: andree_rafraxa@yahoo.com, prima@eepis-its.edu, rony@eepis-its.edu

Abstrak

Populasi hutan di dunia semakin menurun. Hal ini disebabkan semakin meningkatnya kerusakan hutan dan perubahan iklim di dunia. Sebagian besar kerusakan hutan disebabkan oleh kebakaran hutan, terutama di Indonesia. Untuk itu, dirancanglah sebuah sistem WSN (*Wireless Sensor Network*) guna memantau terjadinya kebakaran hutan secara nirkabel. Sensor-sensor disebar sesuai dengan kondisi hutan. Jika ada sumber api yang muncul maka sensor yang paling dekat dengan sumber api tersebut akan mengirimkan data secara nirkabel menuju server. Untuk efisiensi biaya dan energy, penempatan sensor sebaiknya mengikuti model sebaran api yang dihasilkan oleh pembakar berdasarkan klasifikasi bahan pembakar di hutan. Dengan asumsi bahwa kebakaran terjadi di hutan tropis Indonesia dimana parameter bahannya adalah jenis pepohonan hutan tropis dan bahan lain penyebab kebakaran, pada penelitian ini dibuat estimasi karakteristik sebaran api kebakaran hutan tropis. Estimasi meliputi penghitungan ROS dan flame length dari bahan penyebab kebakaran hutan. Pemodelan dengan regresi linier dipilih sesuai dengan karakteristik data yang didapat dari simulasi kebakaran bahan pembakar. Analisa hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan pemodelan ROS dan flame length, dihasilkan data dengan tingkat kesalahan < 15% dari nilai ROS sesungguhnya. Melalui hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi kepada instansi yang berhubungan dengan penanggulangan bencana, khususnya kebakaran untuk dapat memperkirakan dampak kebakaran dan melakukan evakuasi secepat mungkin untuk menghindari dampak yang meluas.

Kata kunci: *rate of spread*, *flame length*, WSN.

1. Pendahuluan

Seiring semakin meningkatnya kerusakan hutan di Indonesia yang sebagian besar disebabkan oleh kebakaran hutan, maka dirancanglah suatu sistem yang disebut dengan WSN (*Wireless Sensor Network*) untuk mengatasi masalah tersebut. Sistem ini digunakan untuk memantau terjadinya kebakaran hutan, dalam hal ini untuk mengantisipasi terjadinya kebakaran yang lebih besar. Sensor-sensor akan disebar sesuai dengan kondisi hutan. Jika ada sumber api yang muncul maka sensor

yang paling dekat dengan sumber api tersebut akan mengirimkan data secara nirkabel menuju server.

Namun disini terdapat permasalahan yaitu penempatan sensor tidak boleh sembarangan karena harus memperhatikan model sebaran api, maka dibuatlah estimasi karakteristik dari sebaran api berdasarkan bahan pembakarnya. Pada penelitian ini akan dibuat simulasi dan dianalisa mengenai *rate of spread* (ROS) dan *flame length* dari suatu bahan penyebab kebakaran dengan memasukkan parameter-parameter yang telah ditentukan.

Penelitian sebelumnya, [1], menjelaskan secara detail pemodelan api, mulai dari *surface fire*, *crown fire*, *fire acceleration*, dan *spotting*. Penelitian yang dibuat akan menggunakan masalah *surface fire* yang digunakan pada penelitian ini, untuk mendapatkan *rate of spread*.

Sebuah riset yang lain [2], mengaplikasikan perangkat lunak BehavePlus untuk mendapatkan tabel dan grafik *rate of spread* (ROS) dan *flame length* berdasarkan beberapa parameter input penyebab kebakaran, seperti jenis, tinggi dan berat jenis pembakar, arah angin serta kemiringan lahan. Sedangkan pada penelitian [3], diuraikan penurunan persamaan matematika dari sebaran api secara jelas, dimana *rate of spread* (ROS) adalah perbandingan antara propagasi fluks dengan panas yang dibutuhkan untuk pembakaran, kerapatan massa, dan jumlah pemanasan efektif.

Bahan bakar yang digunakan dari ketiga referensi diatas adalah bahan bakar pada hutan beriklim sedang (subtropis) dan dingin (kutub). Sedangkan bahan bakar yang digunakan dalam penelitian yang dibuat adalah bahan penyebab kebakaran pada hutan tropis khususnya di Indonesia. Proses pembakaran bahan-bahan pembakar tersebut disimulasikan pada luasan tertentu, dimana suhu dan lamanya waktu pembakaran dimonitor menggunakan sensor suhu dan kamera. Hasil monitoring selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak Matlab untuk didapatkan hasil persamaan *rate of spread* dan *flame-length* masing-masing bahan. Tampilan GUI disertakan untuk memvisualisasikan proses kebakaran yang disebabkan oleh bahan-bahan pembakar tersebut.

Pembahasan dari paper ini meliputi: bab 2 menjelaskan tentang teori yang terkait dengan penelitian, bab 3 disain dan implementasi sistem, sedangkan bab 4 merupakan hasil dan pembahasan penelitian, serta bab 5 berisi kesimpulan dan kontribusi penelitian yang dibuat.

2. Teori Yang berkaitan

2.1 Sebaran Api

Penyebaran api pada suatu permukaan disebabkan oleh banyak faktor, seperti perbedaan suhu, kelembaban, angin, dan juga kemiringan lahan. Model sebaran api yang pertama adalah persamaan sebaran api Rothermel [3]. Yang menghitung laju sebaran api stabil pada bidang yang sejajar dengan permukaan tanah di setiap node. Berikut adalah persamaannya:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \tag{1}$$

Karakteristik bahan bakar dasar ditetapkan sesuai dengan format model perilaku bahan bakar. Intensitas garis api, I_b menyatakan bahwa laju energi yang dihasilkan per unit panjang api adalah:

$$I_b = hwR/60 \tag{2}$$

Tabel 1. Variabel Persamaan

Simbol	Keterangan
R	laju sebaran api (m/min)
ξ	rasio propagasi fluks
I_R	intensitas reaksi (kJ/min m ²)
ρ_b	kerapatan massa oven-dry (kg/m ³)
ϵ	konstanta pemanasan efektif
Q_{ig}	panas sebelum terjadi nyala api (kJ/kg)
ϕ_w	propagasi fluks yang dihasilkan oleh angin
ϕ_s	propagasi fluks yang dihasilkan oleh kemiringan

Dimana I_b adalah laju energi yang dihasilkan per unit panjang api (kW/m), h adalah panas yang dihasilkan bahan bakar (kJ/kg), w adalah berat bahan bakar per unit area (kg/m²) yang terbakar di depan nyala api, dan $R/60$ adalah laju sebaran api per unit (m/s). Yang dihitung dalam BEHAVE dan FARSITE sebagai:

$$I_b = \frac{I_R}{60} \frac{12.6R}{\sigma} \tag{3}$$

Dimana σ adalah luas permukaan karakteristik bahan bakar terhadap rasio volume bahan bakar dasar (m⁻¹). Karakteristik kebakaran permukaan (laju penyebaran, intensitas garis api, dan sebagainya) dihitung untuk keadaan api yang bergantung pada kondisi lingkungan seperti karakteristik bahan bakar dan kelembaban, serta arah kecepatan angin, dan kemiringan topografi. Semua parameter tersebut harus tersedia atau dapat dihitung pada setiap titik bidang setiap saat.

2.2 Regresi Linier

Dalam penelitian ini digunakan regresi linier untuk menganalisa hasil pengukuran sensor dan membuat pemodelan ROS. Dipilih regresi linier karena pola data yang dihasilkan dari pengukuran panjang api dan

kecepatan api terhadap waktu pembakaran menunjukkan pola persamaan linier. Analisis regresi adalah suatu analisis dalam ilmu statistika yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh dari suatu variabel bebas (prediktor atau independen) terhadap variabel tak bebas (respon atau dependen). Model umum persamaan regresi adalah sebagai berikut:[6]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon_i \tag{4}$$

Dari model di atas, apabila hanya terdapat satu atau tunggal variabel prediktor disebut regresi linier sederhana dan apabila terdapat lebih dari satu variabel prediktor disebut regresi linier berganda.

Selain model di atas terdapat juga model regresi linear lainnya yang diperoleh dari transformasi seperti dibawah ini:

- Tipe dari regresi model quadratic

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \epsilon \tag{5}$$

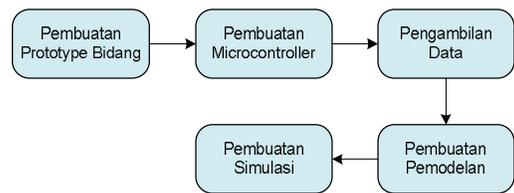
- Tipe dari regresi model cubic

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_1^3 + \epsilon \tag{6}$$

Tabel 2. Variabel Pemodelan

Simbol	Keterangan
Y	Variabel respon/tak bebas diberi simbol Y
$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$	Variabel prediktor/bebas diberi simbol X
β_0	Intercept atau koefisien konstanta
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$	Koefisien regresi variabel X
ϵ	Koefisien regresi variabel X
RSS _p	Residual atau error
CTSS	Residual of sum squares
n	Corrected total sum squares
P	Jumlah pengambilan data
	Jumlah parameter dalam model

3. Disain dan Implementasi Sistem



Gambar 1. Diagram Implementasi Sistem

Disain dan Implementasi sistem meliputi :

3.1 Pembuatan Prototype Bidang

Untuk mendisain bidang ini diberikan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Bidang mewakili kondisi hutan tropis
2. Berupa daratan yang datar, tidak ada kontur atau kemiringan lahan.
3. Pengaruh kecepatan angin diabaikan.
4. Temperatur awal adalah sekitar $\pm 28^{\circ}\text{C}$, merupakan temperatur kamar.
5. Bidang diberi lapisan pasir untuk meredam panas dan menghindari kontak langsung dengan api.
6. Bahan pembakar yang dipilih adalah kertas, daun jati dan kayu serutan, yang diasumsikan menjadi penyebab kebakaran hutan.
7. Tingkat humiditas bahan dianggap sama, yaitu 100 %.
8. Jumlah sensor yang disebar sebanyak 16 buah, diatur dalam posisi grid 4x4, dengan jarak antar masing-masing sensor adalah 20 cm.

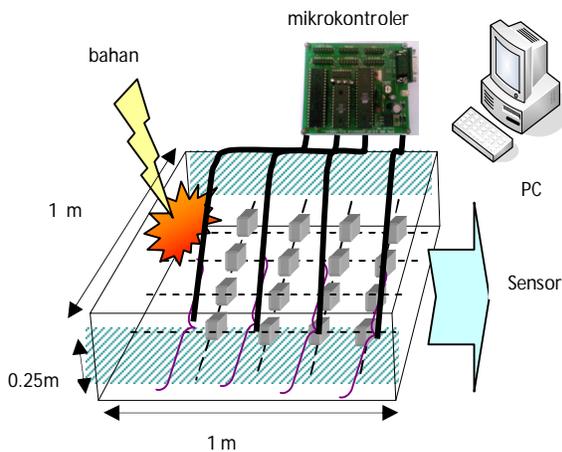
Bentuk bidang yang dibuat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Disain Bidang Pengujian

3.2 Pembuatan Microcontroller

Secara umum konfigurasi sistem bisa dilihat pada Gambar 3. Bahan pembakar diletakkan pada sebuah lokasi di bidang area $1 \times 1 \times 0,25 \text{ m}^3$. Pengambilan data dilakukan menggunakan 16 buah sensor LM 35 yang masing-masing terhubung dengan mikrokontroler. Digunakan kamera untuk merekam lamanya kebakaran dan sebaran api.

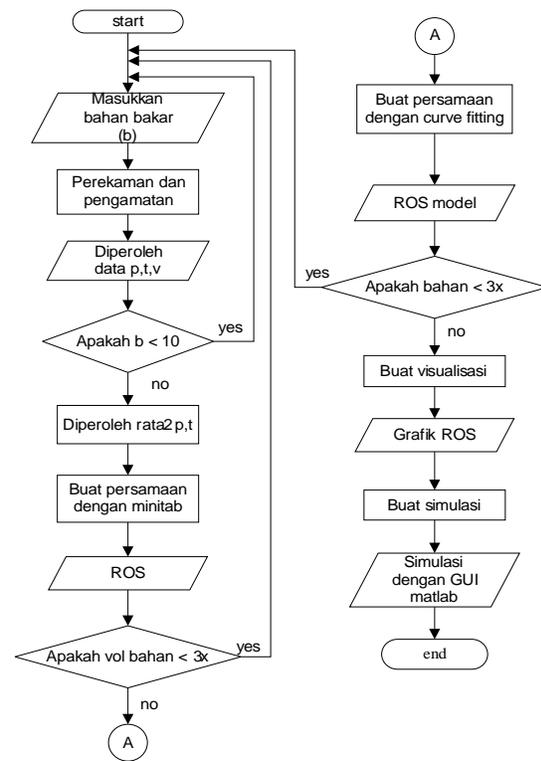


Gambar 3. Prototype Sistem

Masing-masing sensor akan mengirim data hasil pengukuran dalam bentuk tegangan ke PC, melalui *microcontroller*. Pengukuran dilakukan saat penyalaan dimulai sampai nyala api merambat ke tempat-tempat tertentu, dan diamati dalam periode waktu tertentu. Pengambilan data dilakukan di satu lokasi, dengan berbagai jenis bahan pembakar dan volume yang berbeda. Tegangan yang dihasilkan dari sensor dikonversikan menjadi nilai temperatur. Ketika api mulai menyala, dilakukan perekaman terhadap objek yang dibakar untuk mengetahui panjang api pada periode waktu tertentu. Dari hasil pengambilan data, dibuat grafik pengukuran periode waktu pengambilan data terhadap nilai temperatur, panjang api, dan kecepatan (laju) serta ROS-nya. Berdasarkan semua data yang didapat, dilakukan pemodelan matematika yang akan menghasilkan sebuah persamaan untuk masing-masing bahan pembakar.

3.3 Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data ROS pada kasus kebakaran hutan, dengan beberapa jenis bahan pembakar, yaitu kayu serutan, kertas dan daun jati. Bahan pembakar tersebut diletakkan pada sebuah lokasi disamping sensor 1,2,3 dan 4 (lihat Gambar 2). Pengambilan data dilakukan menggunakan 16 buah sensor LM 35 yang diletakkan secara grid pada bidang tersebut.



Gambar 4. Flowchart Sistem

Pengambilan data dimulai dengan meletakkan bahan pembakar pada bidang prototype. Kemudian dilakukan pembakaran pada ujung bahan. Sesaat sebelum pembakaran dilakukan perekaman dengan menggunakan kamera dan pengambilan data suhu dari tiap sensor menggunakan program visual basic.

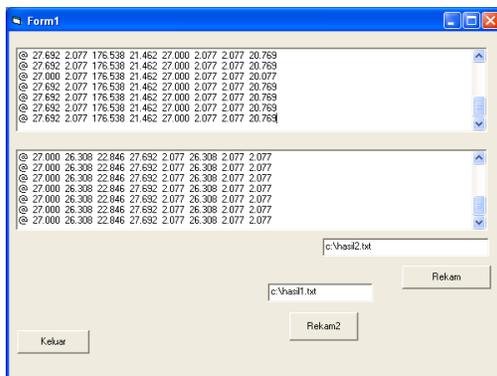
Gambar 5 menunjukkan listing program untuk konversi data dari tegangan menjadi suhu:

```
// Global enable interrupts
#asm("sei")
delay_ms(500);

while (1)
{
    putchar(13);putchar(10);    /// char
    untuk baris baru
    putchar('@');
    for(i=0;i<8;i++)
    {
        suhu=(adc_data[i]*176.5384)/255;
        // dianggap suhu normal 28 derajat dengan
        data maks 40
        sprintf(data," %.3f",suhu);
        printf("%s",data);
        //send(adc_data[i]);
    }
    delay_ms(100);
};
```

Gambar 5. Listing program konversi data suhu

Setelah dilakukan perekaman, data akan disimpan dalam format *.txt. Gambar 6 menunjukkan tampilan vb setelah dijalankan:



Gambar 6. Tampilan vb setelah dijalankan

Baris pertama dari Gambar 6 menunjukkan tampilan suhu terekam untuk sensor 1 s/d 8, sedangkan baris kedua untuk sensor 9 s/d 16. Selain data suhu, pengukuran juga menghasilkan data perekaman panjang api dan waktu kebakaran. Masing-masing data diambil sebanyak sepuluh kali pengamatan. Selanjutnya diambil nilai rata-ratanya. Hasil pengukuran dilakukan dengan cara yang sama, untuk 3 jenis bahan pembakar : kertas, daun jati dan kayu serutan dengan 3 jenis volume.

Data-data selanjutnya digabungkan dan dianalisa menggunakan Regresi Linier dengan Minitab rel.13.20 untuk mendapatkan persamaan ROS masing-masing bahan.

3.4 Pembuatan Pemodelan

Sebelum dibuat pemodelan matematika, terlebih dahulu, siapkan data yang akan dimodelkan. Data tersebut bisa dalam format *.txt atau *.xls. Kemudian masukkan data ke minitab dan pilih metode regresi untuk mendapatkan model matematikanya.

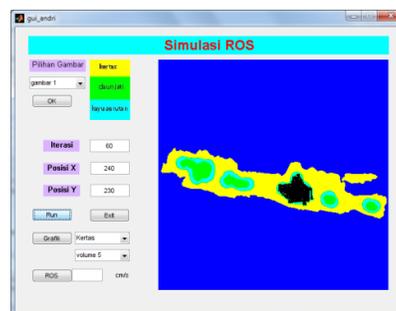
Berdasarkan hasil yang diperoleh dari minitab, persamaan yang bisa diterima adalah persamaan yang telah memenuhi syarat umum regresi linier, yaitu nilai R-Sq dan R-Sq (adj) harus tinggi, minimal diatas 70%. Kemudian semua parameter dalam model harus signifikan dengan ketentuan nilai P value pada masing-masing predictor < 5%.

3.5 Pembuatan Simulasi

Setelah diperoleh persamaan pemodelan dengan menggunakan minitab selanjutnya akan dibuat visualisasi dan simulasi ROS dengan menggunakan GUI Matlab.

Sebagai data masukan untuk program ini digunakan peta jawa, kalimantan dan sumatra yang telah diedit, dengan 4 warna yang berbeda yaitu biru, kuning, biru laut, dan hijau, seperti Gambar 7. Masing-masing warna mewakili wilayah yang berbeda-beda. Untuk warna biru mewakili "lautan", kuning mewakili vegetasi kertas, biru laut mewakili vegetasi kayu, hijau mewakili vegetasi daun jati. Vegetasi daerah yang sedang terbakar diwakili warna merah, sedangkan yang habis terbakar dengan warna hitam.

Pada saat awal, wilayah yang ditunjukkan oleh data masukan di kelompokkan ke dalam 4 kelompok/jenis wilayah: wilayah lautan, wilayah vegetasi kertas, wilayah vegetasi kayu, dan wilayah vegetasi daun jati. Selama proses kebakaran terjadi perubahan *state*: dari *state* satu ke *state* lainnya, misal titik awal api berada di wilayah daun jati, akibat panas api maka wilayah tersebut berubah menjadi kering, lalu terbakar, jika iterasinya masih ada maka akan berpindah *state* ke wilayah kayu, dan seterusnya sampai iterasinya habis. Dengan kata lain, wilayah ini akan mengalami perubahan dari *state* 4, ke *state* 5, lalu 6, dan akhirnya ke *state* 3, *state* 5, lalu 6 dan seterusnya sampai iterasinya habis.



Gambar 7. Tampilan simulasi ROS di P.Jawa

4. Hasil dan Pembahasan

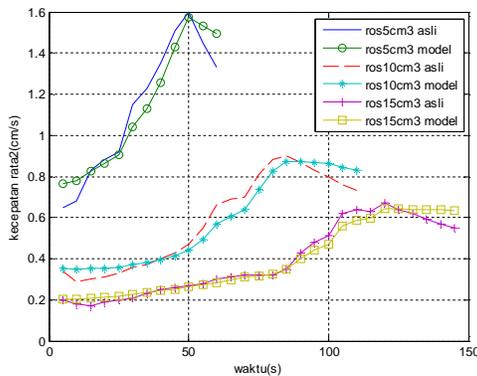
Dari hasil pengambilan data diperoleh data sebagai berikut:

4.1. ROS vs waktu pada bahan kertas

Tabel 3. Sebagian data sebaran api kertas 5cm³

t(s)	p(cm)	v(cm/s)	s1 (□C)	s2 (□C)	s3 (□C)	s4 (□C)
5	3,33	0,67	27,00	27,00	27,00	27,00
10	6,94	0,69	27,00	27,00	27,00	27,00
15	12,44	0,83	27,00	27,00	27,00	27,00
20	17,78	0,89	27,69	27,00	27,00	27,00
25	23,33	0,93	28,39	28,39	28,39	27,00
30	33,56	1,12	29,08	29,77	29,07	28,39

Dari tabel 3. dilakukan pemodelan dengan minitab seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sehingga menghasilkan persamaan yang ditampilkan dengan matlab seperti gambar 8:



Gambar 8. Grafik ROS vs waktu pada kertas 5cm³, 10cm³ dan 15cm³

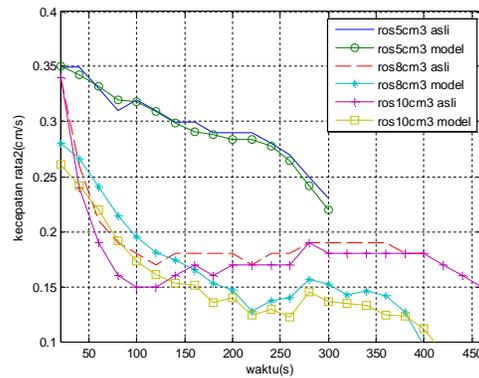
Berdasarkan gambar 8 dapat dinyatakan bahwa ROS berbanding lurus dengan kecepatan. Hal ini dikarenakan ROS sendiri merupakan fungsi dari kecepatan. Semakin kecil volume suatu bahan, maka ROS-nya semakin besar. ROS disini juga mempunyai titik puncak (maksimum) seperti halnya kecepatan. Namun disini lebih jelas bahwa untuk mencapai titik ROS maksimum, ROS-nya akan stabil terlebih dahulu, baru setelah itu mengalami fase kenaikan yang spontan hingga mencapai puncaknya, dan sesudah itu akan mengalami fase penurunan, dimana ROS-nya juga cenderung stabil (berubah tetapi pelan). Seiring menurunnya ROS, fase inilah yang dinamakan fase pemadaman, kondisi dimana reaksi pembakaran sudah mulai habis. Dapat disimpulkan bahwa ROS akan mengalami 3 fase yaitu fase stabil, fase transisi (naik tapi sangat cepat hingga titik puncak), dan fase stabil lagi (turun perlahan hingga mati).

4.2. ROS vs waktu pada bahan kayu serutan

Tabel 4. Sebagian data sebaran api kayu serutan 5cm³

t(s)	p(cm)	v(cm/s)	s1 (□C)	s2 (□C)	s3 (□C)	s4 (□C)
20	7,00	0,35	27,69	27,69	27,69	27,69
40	13,90	0,35	27,69	27,69	27,69	27,69
60	19,80	0,33	28,39	27,69	27,69	27,69
80	25,10	0,31	29,77	28,39	27,69	27,69
100	32,20	0,32	29,77	28,39	27,69	27,69
120	37,70	0,31	29,77	29,77	28,39	27,69

Dari tabel 4. dilakukan pemodelan dengan minitab seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sehingga menghasilkan persamaan yang ditampilkan dengan matlab seperti gambar 9:



Gambar 9. Grafik ROS vs waktu pada kayu serutan 5cm³, 8cm³ dan 10cm³

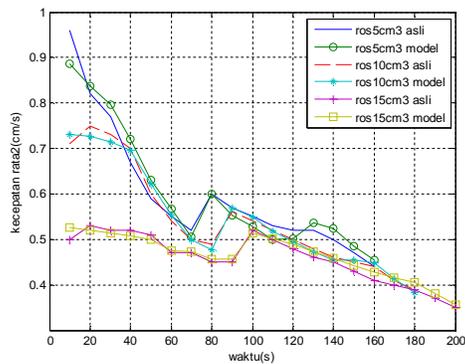
Berdasarkan gambar 9 dapat diamati bahwa ROS berbanding terbalik dengan kecepatan. Semakin kecil volume suatu bahan, maka ROS-nya semakin besar. Namun untuk ROS pada kayu serutan disini memiliki karakteristik yang berbeda dengan kertas. Pada kertas ROS-nya cenderung meningkat sampai pada titik tertentu, hal ini karena adanya proses *ignition*. Sementara pada kayu serutan *ignition* hanya terjadi diawal saat api mulai menyala, selanjutnya tidak akan ada lagi *ignition* yang bisa meningkatkan kecepatan, hal ini dikarenakan permukaan kayu serutan yang cenderung renggang, tidak rata, dan memiliki banyak rongga udara. Sehingga api akan terus mengisi rongga-rongga yang kosong dan kecepatannya akan semakin turun karena energinya akan semakin berkurang. Dari grafik diatas diperoleh data bahwa ROS pada kayu serutan cenderung mengalami penurunan seiring berjalannya waktu, dengan titik terendah pada akhir pembakaran.

4.3. ROS vs waktu pada bahan daun jati

Tabel 5. Sebagian data sebaran api daun jati 5cm³

t(s)	p(cm)	v(cm/s)	s1 (□C)	s2 (□C)	s3 (□C)	s4 (□C)
10	9,60	0,96	27,00	27,00	27,00	27,00
20	16,30	0,82	27,69	27,00	27,69	27,69
30	23,00	0,77	28,39	27,69	28,39	28,39
40	26,90	0,67	29,08	28,39	29,08	29,77
50	29,50	0,59	29,77	29,08	29,77	30,46
60	33,10	0,55	30,46	29,77	30,46	31,85

Dari tabel 5. dilakukan pemodelan dengan minitab seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sehingga menghasilkan persamaan yang ditampilkan dengan matlab seperti gambar 10:



Gambar 10. Grafik ROS vs waktu pada daun jati 5cm³, 10cm³ dan 15cm³

Berdasarkan gambar 10 dapat dinyatakan bahwa ROS pada daun jati berbanding terbalik dengan kecepatan. Jika volumenya semakin kecil maka kecepatannya semakin besar, tetapi disini jika volumenya semakin kecil maka ROS-nya semakin kecil. Hal ini berarti ROS berbanding lurus dengan volume. Semakin besar volume daun jati, ROS-nya juga semakin besar. Hal ini dikarenakan ignition pada daun jati akan semakin besar dan cepat jika volumenya semakin besar. Berbeda dengan ignition pada kertas dan kayu serutan yang semakin lambat jika volumenya semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan proses penyebarannya daun jati lebih cepat dibanding kedua bahan tersebut.

5. Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil data dan analisa dapat disimpulkan bahwa :

- ROS merupakan fungsi dari kecepatan sehingga ROS dan kecepatan rambat api selalu berbanding lurus. ROS dan kecepatan rambat api sama-sama dipengaruhi oleh volume bahan, panjang api, dan waktu pengambilan data.

- Semakin besar volume suatu bahan maka nilai ROS-nya semakin rendah. Hal ini disebabkan karena semakin besar volume suatu bahan, kecepatan rambatnya juga semakin tinggi.
- Dari hasil curve fitting ROS model dengan data asli diperoleh rata-rata persentase error sebesar 7,26% (untuk kertas); 15,11% (untuk kayu serutan) dan 2,47% (untuk daun jati).

Berdasarkan analisa hasil pengukuran dapat dinyatakan bahwa pemodelan sebaran api dengan regresi linier mampu menghasilkan nilai yang mendekati nilai sebaran api sesungguhnya sehingga kami merekomendasikan pemakaian pemodelan regresi linier untuk pembuatan simulasi sebaran api kebakaran hutan tropis untuk memprediksi luas wilayah yang akan terkena dampak kebakaran hutan tersebut.

Referensi

- [1] Mark A.Finney, "FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation", Research Paper RMRS-RP-4 Revised, USDA, 1998.
- [2] Patricia L.Andrews, Collin D.Bevins, Robert C.Seli, "BehavePlus Fire Modeling System, version 4.0, User's Guide", General Technical Report RMRS-GTR-106WWW, USDA, 2008.
- [3] Richard C.Rothermel, "A Mathematical Model For Predicting Fire Spread in Wildland Fuels", Research Paper INT-115, USDA, 1972.
- [4] Ljiljana Bodrozic, Jadranka Marasovic, Darko Stipanicev, "Fire Modeling in Forest Fire Management ", CEEPS Spring School, Kielce, Poland, 2000.