

SIMULASI PERHITUNGAN INTENSITAS RADIASI DAN ENERGI SURYA DENGAN TURBO PASCAL 5.5

Ahmad Kurnia
Teknik Elektronika Politeknik TEDC
Email : *akurnia@poltektedc.ac.id*

Abstrak

Potensi Energi Surya sebagai energi baru dan terbarukan di Indonesia sangat besar, per-harinya mencapai 4800 watt-jam/m² atau 17 juta joule/m². Salah satu faktor penyebabnya karena letak geografis Indonesia di daerah tropis, dimana matahari memancarkan sinarnya setiap tahun. Melihat begitu besarnya potensi energi surya, maka perencanaan pemanfaatannya sangat diperlukan, dan untuk tujuan dimaksud perlu simulasi perhitungan dalam memprediksi besarnya energi surya di suatu lokasi. Tulisan ini membahas simulasi perhitungan model matematis radiasi surya dengan menghitung radiasi surya global dari persamaan geometri surya dan data kondisi cuaca di suatu lokasi. Perhitungan menggunakan program Turbo Pascal 5.5, salah satu program yang banyak digunakan untuk komputasi di bidang sains dan teknik. Hasil perhitungan untuk energi harian rata-rata dengan sampel kota Bandung, diperoleh yang tertinggi pada bulan Januari yakni 8515 Wh/m² dan terendah bulan Juli 5936 Wh/m². Untuk perbedaan hasil simulasi besarnya radiasi surya global per detik di kota Bandung pada radiasi puncak (tengah hari pukul 11.00 – 13.00) antara bulan Januari dan Juli mencapai 486 W/m². Sedangkan perbedaan besar radiasi surya bila dilihat hanya pengaruh jarak bumi-matahari, yakni radiasi saat jarak terjauh (*aphelion*) tanggal 6 Juli dan saat jarak terdekat (*perihelion*) tanggal 5 Januari, hanya berbeda 57,9 W/m². Ini berarti Deklinasi Surya kota Bandung pada bulan Januari dan Juli menjadi faktor utama tinggi-rendahnya radiasi surya di dua bulan tersebut dan bukan karena faktor jarak bumi-matahari terdekat dan terjauh. Hasil perhitungan dalam simulasi ini cukup akurat, hanya berbeda 3,6% dengan hasil pengukuran oleh LAPAN, sehingga model matematis simulasi perhitungan energi radiasi surya ini dapat digunakan untuk perencanaan pemanfaatan energi surya di suatu tempat dalam suatu waktu tertentu.

Kata kunci: energi surya, radiasi surya global, simulasi perhitungan, *aphelion-perihelion*, deklinasi surya

I. PENDAHULUAN

Matahari adalah sumber kehidupan, merupakan sumber energi bagi seluruh manusia dan makhluk lainnya di muka bumi ini. Selain menjadi sumber energi bagi sumber energi lainnya, energi surya berpotensi untuk dimanfaatkan secara langsung dan terus diupayakan sebagai sumber energi alternatif. Pemanfaatan energi surya secara garis besar dapat dilakukan dengan dua cara. Pertama secara termal dan kedua secara fotovoltaik. Cara pertama dengan pemanasan langsung, dan cara kedua, memanfaatkan tumbukan energi foton gelombang elektromagnetik radiasi surya dengan bahan semikonduktor yang dapat menghasilkan listrik melalui proses fotovoltaik.

Kelebihan penggunaan energi surya :

- Diperoleh secara gratis dan tidak menimbulkan polusi
- Dapat diperoleh dimana saja sesuai posisi/koordinatnya di dunia
- Bersifat terbarukan dan tidak terhabiskan

- Perawatan dan pemeliharaan Perangkat Pemanfaatan energi surya relatif lebih murah dan lebih mudah.

Energi surya sangat melimpah di dunia ini terutama di daerah tropis. Indonesia dianugerahi potensi energi baru terbarukan (EBT) energi surya yang sangat melimpah. Menurut Dewan Energi Nasional, potensi energi surya di Indonesia sekitar 4.8 kWh/m² perharinya, setara dengan 112.000 GWp perhari. Ini tentu saja merupakan energi yang sangat besar. Dengan demikian, pemanfaatan energi surya di Indonesia untuk berbagai bidang harus terus dikembangkan. Apalagi ketersediaan energi surya di Indonesia lebih besar dibandingkan dengan negara di Eropa atau Amerika Serikat, karena Indonesia berada di daerah tropis, terletak antara 6⁰ LU dan 11⁰ LS, dimana matahari memancarkan sinarnya setiap tahun. Besarnya energi surya atau intensitas radiasi surya di suatu lokasi diukur dengan alat ukur *pyranometer* (untuk radiasi global) dan *pyrheliometer* (untuk radiasi baur). Kedua alat sistem pengukuran radiasi surya tersebut sangat mahal dan Lembaga Pemerintah seperti LAPAN, BMKG dan LIPI memiliki

alat tersebut. Oleh sebab itu untuk perencanaan pemanfaatan energi surya di setiap titik lokasi di Indonesia, yang umumnya belum dilakukan pengukuran intensitas radiasi, diperlukan perhitungan atau prediksi besarnya energi surya di lokasi tersebut dalam setahun. Untuk itu tulisan ini membahas hasil penelitian atau perhitungan energi surya dengan membuat simulasi dengan program komputer dengan lokasi kota Bandung sebagai obyek simulasi perhitungannya.

II. LANDASAN TEORI

Matahari dan Surya

Sebelum membahas energi radiasi dari matahari atau energi surya, perlu penulis sampaikan perbedaan pengertian matahari dan surya.

Matahari adalah suatu benda langit, terjemahan dari "sun" dalam bahasa Inggris, merupakan bentuk kata materi (benda). Istilah ini dipakai contohnya medeskripsikan fisik matahari, seperti jari-jari matahari, jarak bumi – matahari, suhu matahari dan lain-lain .

Surya adalah suatu *device* (perangkat). Bentuk sifat dan keterangan, digunakan untuk menerangkan suatu bentuk sebagai sumber. Terjemahan dari "solar" dalam bahasa Inggris. Contohnya : radiasi surya, geometri surya, sel surya, energi surya, konstanta surya dan lain-lain.

Dengan demikian istilah energi matahari adalah energinya matahari, yakni yang ditimbulkan di dalam matahari oleh dari reaksi fusi, sedangkan istilah energi surya adalah energi dari radiasi matahari yang di terima di permukaan bumi. Perlu juga didefinisikan istilah yang menyangkut matahari selain radiasi, yakni cahaya. Radiasi dari matahari disebut radiasi surya, bentuk energi. Sedangkan cahaya dari matahari, tetap disebut cahaya matahari, karena besaran tingkat cahaya adalah besaran pokok tersendiri (salah satu dari 7 besaran pokok fisika) dengan satuan kandela (cd), sehingga tingkat kekuatan cahaya matahari menunjukkan intensitas kuat cahaya yang diterima di suatu titik bersumber dari matahari. Intensitas cahaya tidak selalu berbanding lurus dengan energi radiasinya. Contoh, untuk konsumsi daya listrik yang sama, intensitas cahaya dari lampu LED lebih besar dari lampu pijar akan tetapi energi cahaya radiasi yang dikeluarkan lampu pijar dapat lebih besar.

Matahari

Matahari adalah benda langit yang memiliki diameter 1,38 juta km, suhu permukaannya 5762 kelvin, sedangkan suhu dipusatnya bervariasi antara 8 hingga 40 juta kelvin. Matahari sudah berumur sekitar 5 milyar tahun. Keberadaan matahari sebagai

proses evolusi kelanjutan perluasan alam semesta dimulai dari ledakan dasyat (*Big-Bang*) yang terjadi sekitar 13,8 milyar tahun lalu. Sumber energi matahari adalah reaksi nuklir melalui proses fusi yakni reaksi penggabungan dua inti atom yang menghasilkan satu atom baru. Penggabungan ini selain atom baru memiliki inti yang lebih besar, juga akan mengeluarkan energi yang sangat dasyat. Ini terjadi karena ada massa (inti atom) yang berubah menjadi energi berdasar persamaan Einstein $E = m.c^2$. Reaksi fusi di matahari ini mengubah empat ton massa hidrogen menjadi helium tiap detiknya dan laju energi yang dihasilkan sekitar 10^{20} kWh/detik.

Konstanta Surya

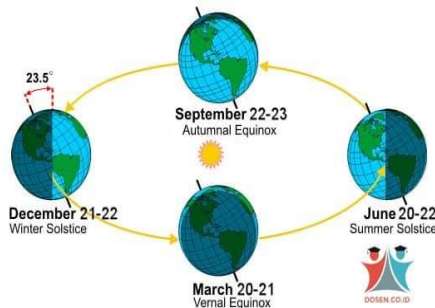
Konstanta surya adalah penjumlahan total radiasi surya untuk seluruh panjang gelombang, diukur pada permukaan laut tanpa atmosfer bumi, persatuan waktu per satuan luas ; tegak lurus sinar matahari pada jarak rata-rata matahari – bumi . Berbagai studi telah menghasilkan nilai konstanta surya yang nilainya berkisar antara 1322 watt/m^2 sampai 1395 watt/m^2 . Sebelum memasuki era penerbangan ruang angkasa, pengukuran konstanta surya dilakukan dari titik tertinggi di permukaan bumi dimana ekstrapolasi diterapkan pada nilai pengukuran yang diperoleh. Pada tahun 1971, NASA menerima nilai pengukuran konstanta surya sebesar 1353 watt/m^2 . Pengukuran dengan bantuan pesawat ruang angkasa pada tahun 1982 diperoleh nilai konstanta surya sebesar 1373 watt/m^2 . Pada akhirnya *World Radiation Center (WRC)* menetapkan nilai konstanta surya 1367 watt/m^2 dengan derajat ketidak pastian sebesar 1% sebagai standar. Nilai ini yang dipakai dalam prediksi perhitungan intensitas energi radiasi surya dalam tulisan ini.

Geometri Surya

Sebelum dapat menentukan besarnya energi radiasi surya yang sampai di permukaan bumi pada suatu titik/lokasi, pada jam, hari dan bulan tertentu, maka langkah pertama adalah menghitung posisi dan kedudukan matahari yang disebut Geometri Surya. Geometri surya terdiri sudut datang dan sudut ketinggian matahari. Besaran yang harus diketahui dalam menghitung sudut datang matahari adalah:

- *Koordinat Garis Lintang – L* : Jarak Sudut suatu titik di bumi di ukur dari ekuator ke utara atau selatan. Nilai Positif di utara dan negatif di selatan. Garis Lintang sesuai koordinat bola dengan pusat bumi sebagai acuannya.
- *Deklinasi matahari* : Jarak sudut sinar matahari ke arah Utara atau Selatan. Adanya musim panas dan musim dingin di belahan bumi Utara dan Selatan karena deklinasi ini. Titik balik deklinasi

(solstice) terjadi pada tanggal 21 Juni dan 21 Desember. Bumi berputar pada porosnya membentuk sudut kemiringan $23,47^{\circ}$ dari sumbu Kutub Utara-Selatan Bumi. Pada tanggal 21 Maret dan 22 September, posisi matahari pada *Equinok*, yakni saat waktu siang dan malam yang sama. Gambar-1 menunjukkan posisi deklinasi matahari.



Gambar 1. Deklinasi dan kemiringan poros rotasi bumi $23,5^{\circ}$, titik balik (*solstice*) musim dingin & panas di utara
(Sumber Gambar ; [https://pakdosen.co.id/revolusi bumi](https://pakdosen.co.id/revolusi-bumi))

Besarnya sudut deklinasi:

$$\delta = 23,47 \sin [360 (N - 80) / 370] \dots\dots\dots (1)$$

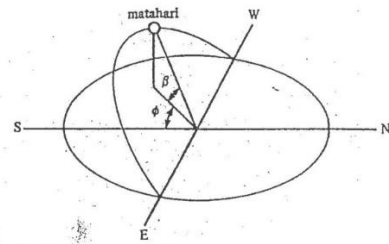
dimana N menyatakan hitungan hari dalam satu tahun dihitung mulai tanggal 1 Januari. Deklinasi matahari = nol , bila matahari tepat diatas ekuator (khatulistiwa) dan ini terjadi pada $N = 80$ (21 Maret) dan $N = 265$ (22 September) . Deklinasi bernilai positif bila matahari berada di belahan Utara khatulistiwa dan negatif di Selatan khatulistiwa.

- *Sudut jam ω* : adalah sudut penyimpangan matahari sesuai waktu jam sehari-hari, di sebelah timur atau barat garis bujur lokal. Bumi berotasi satu putaran 360° pada porosnya selama 24 jam maka besar sudut jam adalah 15° / jam , dan untuk menandai nilai sudut negatif sebelum jam 12.00 (siang) , dan positif setelah jam 12.00 maka persamaan sudut jam matahari ω adalah

$$\omega = 15^{\circ} \cdot (t_s - 12) \dots\dots\dots (2)$$

dimana t_s waktu dalam 24 jam. Sudut jam = 0° pada pukul 12.00 dan 90° pukul 18.00 .

- *Sudut ketinggian matahari β dan sudut azimuth matahari ϕ*



Gambar 2. Sudut ketinggian matahari β dan sudut azimuth ϕ

Seperti diperlihatkan Gambar-2 , sudut ketinggian matahari β adalah:

$$\beta = \sin^{-1} [\cos L \cdot \cos \omega \cos \delta] + [\sin L \cdot \sin \delta] \dots\dots (3)$$

sedangkan sudut azimuth matahari ϕ

$$\phi = \arcsin [\frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \beta}] , \phi \leq 90^{\circ} \dots\dots (4)$$

Sudut datang matahari θ

Untuk menghitung sudut datang matahari pada permukaan arah sembarang, terlebih dahulu perlu menentukan sudut datang berkas sinar matahari pada permukaan horisontal dan vertikal. Sudut datang adalah sudut antara sinar matahari dan bidang normal permukaan penerima (kolektor) sinar matahari . Untuk permukaan horisontal :

$$\theta_{hor} = 90^{\circ} - \beta \dots\dots\dots (5)$$

Sedangkan untuk permukaan vertikal, arah bidang permukaan penerima tentunya memegang peranan. Maka disini perlu ditentukan sudut azimuth permukaan ψ yakni sudut bidang normal permukaan tersebut ke arah Selatan. Kemudian diperoleh sudut azimuth permukaan γ yakni $\gamma = \phi \pm \psi$. Ditambahkan bila berlawanan dengan arah Selatan, dan dijumlahkan bila searah ke Selatan. Jadi sudut datang untuk permukaan vertikal adalah fungsi dari β dan γ .

$$\theta_{ver} = \arcsin [\cos \beta \cdot \cos \gamma] \dots\dots\dots (6)$$

Agar dapat menghitung sudut datang matahari pada permukaan penerima berarah sembarang, perlu diukur sudut kemiringan ϵ yakni sudut permukaan yang ditegakkan dari horisontal, ke arah Selatan . Akhirnya diperoleh persamaan umum sudut datang sinar matahari pada permukaan berarah sembarang:

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \epsilon + \sin \beta \cdot \cos \epsilon \dots\dots (7)$$

Persamaan diatas merupakan komponen utama bersama persamaan-persamaan lainnya untuk menghitung intensitas energi radiasi surya

Bilangan Kebeningan

Bilangan Kebeningan atmosfer K_b didefinisikan sebagai perbandingan Iradiasi matahari normal terukur (I_N) yang telah dipengaruhi oleh awan, uap air, aerosol dan lain-lain, dengan iradiasi normal pada atmosfer pada tingkat kebeningan tertinggi (I_{HN}).
 Persamaan Index Bilangan Kebeningan :

$$K_b = I_N / I_{HN} \dots\dots\dots (8)$$

Pakar kemataharian Indonesia, Haslizen Hoesin merumuskan kategori keadaan atmosfer.

Tabel 1. Kondisi atmosfer dan bilangan kebeningan

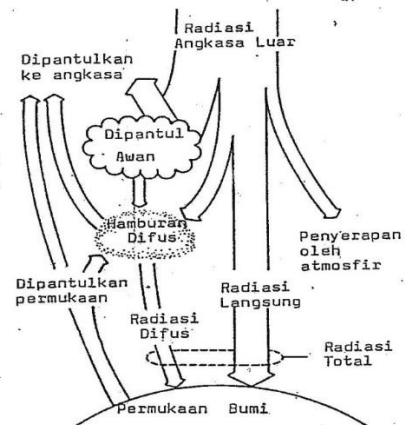
	Kondisi Atmosfir	Bilangan Kebeningan
1	Berawan/ Mendung	0,0 - 0,5
2	Warna Keruh	0,5 - 0,7
3	Biru Buram	0,7 - 0,9
4	Biru Sekali	0,9 - 1,1

Bilangan Kebeningan K_b dapat saja lebih dari 1, karena nilai acuan I_{HN} adalah relatif. Acuan I_{HN} akan berbeda untuk setiap lokasi tergantung iklimnya. Bila selanjutnya ada hasil pengukuran Iradiasi Normal I_N di lokasi tersebut yang lebih besar dari I_{HN} , maka hasil pengukuran I_N yang baru ini dijadikan acuan sebagai I_{HN} . Peneliti dari Kelompok Konservasi Energi LIPI, Yusuf Suryo Utomo dalam makalahnya di tahun 2017, menyimpulkan bahwa untuk kota Bandung, Bilangan Kebeningan bernilai diatas 0,5 hanya terjadi pada bulan Juni, Juli, Agustus dan September.

III. METODE SIMULASI

Persamaan Matematis Radiasi Surya

Radiasi surya di permukaan bumi terdiri dari tiga komponen yakni radiasi langsung, radiasi baur (difus atau hamburan) dan radiasi global. Gambar 3 mendeskripsikan gambaran radiasi langsung, radiasi baur dan radiasi global atau radiasi total. Radiasi Total merupakan gabungan radiasi langsung dan baur. Secara umum sasaran dalam perhitungan kemataharian adalah untuk mennentukan Intensitas Radiasi atau disingkat Iradiasi yang merupakan rapat energi, yakni laju energi yang sampai ke permukaan bumi per satuan luas.



Gambar 3. Radiasi surya langsung, baur/difus dan radiasi total

Radiasi Langsung (I_{DN})

Intensitas Radiasi Surya langsung yang sampai ke permukaan bumi tanpa atmosfer adalah konstanta surya dan nilainya adalah 1367 watt/m² untuk jarak rata-rata bumi-matahari 149,6 juta km. Sebelum radiasi surya sampai di permukaan bumi, intensitasnya berkurang karena penyerapan (absorpsi) oleh ozon, uap air, CO₂ yang ada di atmosfer walaupun pada hari yang tidak mendung sekalipun. Sudut lintasan sinar matahari mempengaruhi derajat penyerapan. Disini sudut ketinggian matahari β mempengaruhi I_{DN} .
 Persamaan paling umum untuk I_{DN} adalah :

$$I_{DN} = I_C \exp (-a/\sin \beta) \dots\dots\dots (9)$$

I_C = solar apparent constant, dengan pendekatan konstanta surya untuk wilayah tropis dan a = koefisien pemadaman atmosfer. Persamaan sering ditulis $I_{DN} = I_C \cdot e^{-m \cdot a}$ dengan $m = \text{air mass (massa udara)} = 1/\sin \beta$. Di kota Bandung, nilai a berkisar 0,15 sampai 0,21 .

Persamaan terkini yang memperhitungkan ketinggian lokasi dan dijabarkan dengan tekanannya, serta dengan memasukkan konstanta penurunan energi B adalah:

$$I_{DN} = I_C \exp [-P / P_0] [B / \cos \theta] \dots\dots\dots (10)$$

dimana $P/P_0 = \exp (-0,00001184 H)$ dengan H = ketinggian diatas permukaan laut

Nilai I_C dan B tergantung lokasi dan waktu. Dari data referensi, untuk tanggal 21 Januari ; $I_C = 1230$ W/m² ; $B = 0,142$, sedang untuk tanggal 21 Juli : $I_C = 1085$ W/m² , $B = 0,207$.

Radiasi Baur (I_{bh})

Radiasi Baur atau Difus atau Hamburan terjadi akibat hamburan radiasi surya oleh lapisan atmosfer.

Radiasi Surya juga mengalami penyerapan atau absorpsi oleh atmosfer. Dengan metoda yang memakai pendekatan hasil pengukuran, Liu-Jordan mendapatkan persamaan Iradiasi Baur sebagai berikut :

$$I_{bh} = \tau_d \cdot I_C \sin \beta \dots\dots\dots (11)$$

τ_d adalah koefisien transmisi, yakni perbandingan Iradiasi Normal I_N dengan konstanta surya atau $\tau_d = I_N / I_C$ dan nilainya berkisar 0,271 – 0,294 .

Radiasi Pantulan (I_{re})

Radiasi surya yang sampai di permukaan bumi ada yang dipantulkan oleh permukaan bumi, yang besarnya ditentukan oleh Albedo Permukaan A_b . Model matematis perhitungan Iradiasi Pantul I_{re} adalah :

$$I_{re} = I_{GH} \cdot A_b \cdot R_r \dots\dots\dots (12)$$

dengan $R_r = (\sin^2 \alpha) / 2$, dimana α = sudut jam lamanya matahari bersinar

Nilai albedo A_b tergantung pada lingkungan permukaan bumi dimana lokasi berada. Penelitian Liu-Jordan , memberikan rekomendasi nilai : untuk hutan = 0,03 – 0,1 ; tanah kosong = 0,07 – 0,2 ; lapang rumput = 0,14 – 0,37 ; gurun pasir = 0,24 – 0,28 dan albedo tertinggi yang membuat Iradiasi Pantul signifikan adalah untuk permukaan salju yakni 0,46 – 0,89 .

Radiasi Global (I_{GH})

Iradiasi Global adalah penjumlahan radiasi langsung dan radiasi baur. Persamaan untuk menentukan radiasi global I_{GH} cukup kompleks karena saling berkaitan, dan tanpa menghitung radiasi pantulan, persamaan sederhananya adalah:

$$I_{GH} = X \cdot I_{DN} + Y \cdot I_{bh} \dots\dots\dots (13)$$

dengan X dan Y merupakan tetapan yang merupakan sifat dari media atmosfer.

Radiasi Total (I_{TOT})

Setelah diperoleh nilai setiap komponen radiasi, maka Iradiasi Surya Total I_{TOT} pada permukaan bumi adalah :

$$I_{TOT} = I_{DN} \cos \theta + I_{bh} + I_{re} \dots\dots\dots (14)$$

Faktor $I_{DN} \cos \theta$, dimana $\cos \theta$ adalah sudut kedatangan matahari sesuai persamaan 7 , dapat mencapai lebih dari 90% jumlah radiasi Total I_{TOT} pada hari yang sangat cerah. Komponen radiasi baur I_{bh} tidak dapat diabaikan untuk kondisi cuaca berawan sedangkan radiasi pantulan I_{re} cukup

berperan untuk permukaan gurun dan salju. Kedua radiasi baur dan pantulan juga saling terkait.

Program Pascal

Pascal adalah bahasa pemrograman yang pertama kali di desain oleh Profesor Niklaus Wirth, seorang ahli komputer berkebangsaan Swiss dan anggota *International Federation of Information Processing* (IFIP) pada tahun 1971. Pada tahun tersebut, bahasa pemrograman tingkat tinggi yang banyak digunakan adalah FORTRAN. Program Pascal relatif lebih fleksibel dalam pemrograman karena tidak kaku seperti FORTRAN dimana kolom urutan input perintah dan data dalam FORTRAN sudah ditentukan.

Nama program "Pascal" sendiri bukan diambil dari nama pendesainnya, melainkan dari nama seorang matematikawan asal Perancis yang menciptakan mesin penghitung pertama kali yakni Blaise Pascal (1623 – 1662). Blaise Pascal juga dikenal sebagai ahli fisika yang dapat menjelaskan fenomena tentang tekanan fluida statis yang dikenal sebagai Hukum Pascal.

Pascal merupakan salah satu bahasa pemrograman yang sering digunakan untuk mempelajari algoritma dan perhitungan dalam matematika dan teknik. Keistimewaan lain program Pascal ini adalah bahasa pemrograman yang penulisannya sangat dekat dengan cara menulis algoritma "structure english". Pascal ini menerapkan konsep prosedur dan struktur *programming* yang cukup baik. Perintah yang ada dalam Pascal juga mirip dengan bahasa Inggris yang biasa digunakan dalam keseharian, misalnya *read, write, end dan begin*. Oleh sebab itu di era tahun 80-an akhir dan tahun 90-an , Pascal menjadi pilihan untuk programmer dan orang yang ingin mempelajari konsep programming. Program PASCAL juga digunakan sebagai standar bahasa pemrograman dalam kompetisi nasional Olimpiade Komputer Indonesia dan juga kompetisi internasional "International Olympiad in Informatics" (IOI) sampai tahun 2018 .

Kelebihan dari pemrograman bahasa Pascal adalah:

- Tipe Data Standar, data standar juga tersedia di berbagai bahasa pemrograman. Tipe data Pascal standar adalah *boolean, integer, real, char, string* dan lain-lain
- User defined Data Types, Dapat membuat tipe data lain oleh pemogram yang diturunkan dari tipe data standar.
- Strongly-typed, Tipe data dari suatu variabel harus ditentukan oleh pemrogram, dan variabel tersebut tidak dapat dipergunakan untuk

menyimpan tipe data selain dari format yang ditentukan.

- Terstruktur, Pascal memiliki sintaks yang memungkinkan program dipecah menjadi fungsi-fungsi kecil (*procedure* dan *function*) yang dapat dipergunakan berulang-ulang.
- Sederhana dan Ekspresif, Pascal memiliki struktur sederhana dan mendekati bahasa manusia (bahasa Inggris) sehingga mudah dipelajari dan dipahami.

Dengan pertimbangan diatas, maka simulasi, perhitungan dan prediksi dalam menentukan intensitas radiasi surya di suatu titik di suatu lokasi dalam tulisan ini menggunakan program Pascal.

IV. HASIL SIMULASI dan VALIDASI
Perhitungan Energi Radiasi Surya

Prediksi dan simulasi perhitungan intensitas radiasi surya sesuai persamaan matematis geometri surya setiap waktu (jam, tanggal dan bulan) di suatu titik dalam koordinat lintang memunculkan sudut deklinasi matahari dan sudut jam. Data ini data primer, sedang perhitungan Iradiasi surya perlu data-data konstanta surya, bilangan kebeningan, air-mass, data albedo dan iradiasi nyata surya. Simulasi perhitungan Iradiasi Surya dan Energi Surya dengan Program Turbo Pascal 5.5 yang dibuat, terdiri dari 300 baris lebih. Berikut tampilan pembuka program:



Gambar 4. Tampilan pembuka program pascal
 Prediksi perhitungan energi radiasi surya

Berikut contoh hasil perhitungan Intensitas Energi Radiasi Surya dalam satuan watt-jam/m² untuk Kota Bandung (koordinat 6° 57' LS) pada bulan Januari. Perhitungan adalah untuk setiap hari, yakni Energi Radiasi Harian sebagai hasil interpolasi setiap jamnya, sejak mulai terbit matahari atau sejak sudut ketinggian matahari > 0° sampai terbenam. Hasil perhitungan dengan asumsi kondisi cuaca cerah,

dengan Bilangan Kebeningan = 1, pada permukaan horisontal.

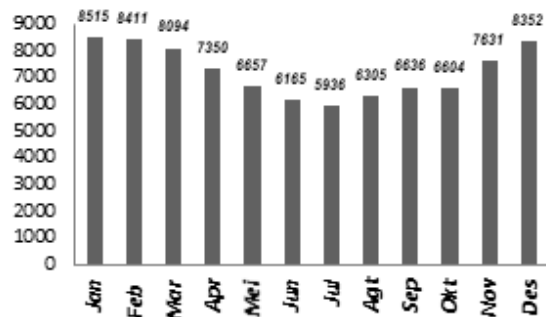
Tabel 2. Print-out Perhitungan/Prediksi Energi Radiasi Surya Bulan Januari di kota Bandung
 (Asumsi Nilai $K_b = 1,0$)

TANGGAL	ENERGI RADIASI
1 - Januari	8448.8 Wh/m.sq
2 - Januari	8452.5 Wh/m.sq
3 - Januari	8456.5 Wh/m.sq
4 - Januari	8460.8 Wh/m.sq
5 - Januari	8465.3 Wh/m.sq
6 - Januari	8470.0 Wh/m.sq
7 - Januari	8475.0 Wh/m.sq
8 - Januari	8480.2 Wh/m.sq
9 - Januari	8485.6 Wh/m.sq
10 - Januari	8491.3 Wh/m.sq
11 - Januari	8497.1 Wh/m.sq
12 - Januari	8503.1 Wh/m.sq
13 - Januari	8509.2 Wh/m.sq
14 - Januari	8515.5 Wh/m.sq
15 - Januari	8522.0 Wh/m.sq
16 - Januari	8528.6 Wh/m.sq
17 - Januari	8535.4 Wh/m.sq
18 - Januari	8542.2 Wh/m.sq
19 - Januari	8549.1 Wh/m.sq
20 - Januari	8556.2 Wh/m.sq
21 - Januari	8562.9 Wh/m.sq
22 - Januari	8559.5 Wh/m.sq
23 - Januari	8556.2 Wh/m.sq
24 - Januari	8553.0 Wh/m.sq
25 - Januari	8549.7 Wh/m.sq
26 - Januari	8546.5 Wh/m.sq
27 - Januari	8543.3 Wh/m.sq
28 - Januari	8540.1 Wh/m.sq
29 - Januari	8536.8 Wh/m.sq
30 - Januari	8533.5 Wh/m.sq
31 - Januari	8530.1 Wh/m.sq

JMLAH DLM SEBULAN 263956.01 Wh/m.sq
 Radiasi Rata-Rata per Hari Bulan Januari : 8514.71 Wh/mtr.sq

Dari hasil perhitungan diatas diperoleh Energi Radiasi Harian rata-rata di kota Bandung pada bulan Januari adalah 8515 Wh/m². Menggunakan program simulasi yang sama, hasil perhitungan Energi Radiasi Harian pada bulan lainnya di kota Bandung seperti pada diagram dibawah ini:

Perhitungan Energi Radiasi Surya Harian Rata-rata setiap Bulan di Bandung dalam Wh/m²



Gambar5. Diagram Batang Perhitungan Energi Radiasi Rata2/hari untuk Setiap Bulan di kota Bandung

Dari hasil perhitungan pada diagram diatas, dapat diketahui bahwa energi radiasi surya rata-rata harian di kota Bandung yang terbesar adalah pada

bulan Januari (8515 Wh/m²) disusul bulan Februari (8411 Wh/m²), Desember (8352 Wh/m²) dan seterusnya. Sedangkan energi radiasi rata-rata harian yang terkecil pada bulan Juli (5936 Wh/m²). Terdapat selisih yang cukup besar, yakni 2579 Wh/m² antara bulan Januari dan Juli dengan prosentase perbedaan rata-rata mencapai 37%. Apa yang menyebabkan perbedaan ini, apakah ini ada kaitannya dengan perbedaan jarak bumi – matahari pada bulan Januari dan Juli ?

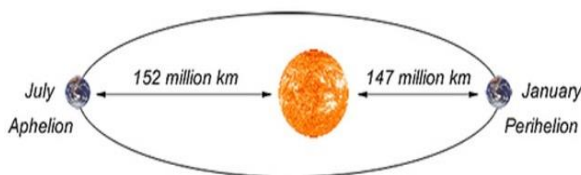
Bumi beredar mengelilingi matahari dalam orbit elips, sehingga jarak bumi terhadap matahari berubah dalam setahunnya. Tahun 2021 Bumi mencapai titik *perihelion* (terdekat dengan matahari) pada tanggal 5 Januari dengan jarak 147.091.144 km dan terjauh (*aphelion*) tanggal 6 Juli 2021 dengan jarak 152.100.527 km. Menurut peneliti LAPAN dalam laman Edukasi Sains Lapan, dampak *Aphelion* dan *Perihelion* ke Bumi secara umum, tidak ada dampak yang signifikan terhadap cuaca. Ini menepis isu di masyarakat kota Bandung setelah ada pemberitaan di media tentang *Aphelion*, bahwa suhu di Bandung terasa lebih dingin di bulan Juli, karena bumi berada pada jarak terjauh dari matahari. Selain terhadap cuaca, kita dapat melihat bahwa dampak *Aphelion* dan *Perihelion* juga tidak signifikan terhadap besarnya energi radiasi dari matahari. Hal ini dapat dibuktikan ketika menghitung perbedaan radiasi surya saat *perihelion* dan *aphelion* dengan perhitungan konstanta surya I_{SC} :

$$I_{SC} = P_{SURYA} / 4 \cdot \pi \cdot R^2 \dots\dots\dots (15)$$

dimana:

P_{SURYA} : Daya Radiasi yang dikeluarkan Matahari = 3,845 x 10²⁶ Watt

R : Jarak bumi – matahari



Gambar 6. Jarak Bumi – Matahari Bulan Juli *Aphelion* (terjauh); Januari *Perihelion* (terdekat)

Bila konstanta surya saat *aphelion* = $I_{SC(Ap)}$ dan saat *perihelion* = $I_{SC(Pe)}$, maka perbandingan kedua konstanta surya tersebut sama dengan perbandingan kuadrat jarak bumi-matahari terdekat R_{Pe} dengan kuadrat jarak bumi-matahari terjauh R_{Ap} . Dengan persamaan-15 akan diperoleh $I_{SC(Ap)} = 1323 \text{ W/m}^2$ dan $I_{SC(Pe)} = 1415 \text{ W/m}^2$ dengan perbedaan $\Delta I_{SC(Ap-Pe)}$

$= 92 \text{ W/m}^2$. Radiasi global yang sampai ke permukaan bumi I_{GH} sebanding I_{SC} dan dengan pendekatan saat radiasi tertinggi yakni tengah hari pukul 11.00 – 13.00, kondisi atmosfer sangat cerah, nilai $I_{GH} \approx 0,63 I_{SC}$. Dengan demikian maka perbedaan besarnya radiasi global saat *aphelion* dan saat *perihelion* dengan pendekatan $0,63 \Delta I_{SC(Ap-Pe)}$ pada tengah hari hanya 57,9 W/m². Perbedaan radiasi surya yang kecil oleh pengaruh jarak bumi-matahari.

Sekarang dengan I_{SC} rata-rata, melalui simulasi program Pascal dengan mengabaikan pengaruh jarak bumi-matahari, hasil radiasi surya global rata-rata tengah hari (pukul 11.00-13.00) saat *aphelion* 2021 (tanggal 6 Juli) adalah 756,1 W/m² dan saat *perihelion* (5 Januari 2021) adalah 1242 W/m². Perbedaan yang sangat besar mencapai 486 W/m².

Jadi disimpulkan, yang membuat radiasi surya di kota Bandung bulan Juli paling kecil adalah posisi kota Bandung yang berada di belahan Selatan khatulistiwa (koordinat 6° 57' LS). Pada bulan Juli sudut ketinggian matahari rata-rata lebih rendah, dan matahari baru saja mengalami titik balik deklinasi 23,5° di belahan bumi Utara (*Gambar-1 solstice tanggal 21 Juni*). Hasil sebaliknya diperoleh dengan perhitungan simulasi tersebut untuk kota Sabang provinsi Aceh, koordinat 5° 54' LU yang berada di belahan Utara. Pada bulan Juli di kota Sabang justru menjadi puncak besarnya energi surya yang diterima. Ini seperti di Eropa dan belahan bumi Utara lainnya, bulan Juni-Juli merupakan musim panas.

Validasi Simulasi

Hasil perhitungan prediksi radiasi surya di permukaan bumi dengan model matematis dan di eksekusi oleh program Pascal perlu diuji keakuratannya dengan membandingkan hasil pengukuran oleh Lembaga atau Badan yang memiliki alat dan sistem pengukuran intensitas energi surya global. Tulisan ini mengambil sampel data radiasi surya global di kota Bandung pada bulan dengan radiasi terkecil yakni bulan Juli yang diperoleh dari Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional (LAPAN) Bandung untuk tahun 1989. Pada pengukuran tersebut, energi radiasi global terendah pada tanggal 8 Juli (1581 Wh/m²) dan tertinggi pada 31 Juli (5467 Wh/m²) dengan rata-rata 3601 Wh/m². Dari data ini diperoleh nilai bilangan kebenaran tertinggi 0,98 (31 Juli) dan terendah 0,31 (8 Juli) dengan rata-rata bilangan kebenaran 0,68. Penelitian terakhir oleh peneliti LIPI juga menyimpulkan bilangan kebenaran di kota Bandung pada bulan Juni, Juli, Agustus dan September selalu diatas 0,5. Ini menunjukkan bahwa di kota Bandung, komponen Iradiasi langsung I_{DN} lebih berperan dari

Iradiasi baur I_{GH} pada bulan-bulan tersebut. Berikut tabel data hasil pengukuran radiasi global di kota Bandung oleh LAPAN dan hasil perhitungan. Sampel data yang diambil tanggal 31 Juli, hari paling cerah dengan radiasi tertinggi.

Tabel 3. Hasil Simulasi Perhitungan dan Hasil Pengukuran LAPAN Energi Radiasi Surya Global di Bandung dalam Wh/m^2
(Sampel Data pengukuran tgl 31 Juli 1989)

Waktu	Hasil Perhitungan	Hasil Pengukuran	Prosen Perbedaan
08.00 – 09.00	398	429	-7,2 %
09.00 – 10.00	596	596	0 %
10.00 – 11.00	740	707	4,7 %
11.00 – 12.00	816	782	4,3 %
12.00 – 13.00	816	772	5,7 %
13.00 – 14.00	740	703	5,3 %
14.00 – 15.00	596	577	3,3 %
15.00 – 16.00	398	399	0 %

Dari hasil perhitungan setiap jam di waktu pagi, siang dan sore terlihat simetris. Perhitungan antara pukul 09.00 – 10.00 sama dengan hasil pengukuran, sedangkan pukul 12.00 – 13.00 perbedaannya yang paling besar (5,7 %). Ini dikarenakan perhitungan model matematis, walaupun variabel seperti kondisi atmosfer dan lain-lain sudah diperhitungkan ; akan tetapi tentu saja dalam kondisi nyata tidak dapat memprediksi perubahan variabel-variabel komponen tersebut dari radiasi langsung, baur dan juga pantulan yang mempengaruhi radiasi global. Prosentase perbedaan rata-rata hasil perhitungan dan hasil pengukuran untuk waktu efektif dari pukul 09.00 – 15.00 adalah 3,9 % . Perbedaan yang cukup kecil, sehingga model matematis simulasi perhitungan energi radiasi surya dapat digunakan untuk memprediksi besar energi surya di suatu lokasi di permukaan bumi termasuk di Indonesia pada jam, hari dan bulan tertentu.

V. KESIMPULAN

1. Untuk itu perencanaan pemanfaatan energi surya diperlukan simulasi perhitungan agar dapat memprediksi besarnya energi surya yang diterima di suatu lokasi pada jam, hari dan bulan tertentu.
2. Metode simulasi adalah dengan perhitungan model matematis geometri surya untuk memperoleh nilai sudut ketinggian matahari dan sudut datang sinar surya ke permukaan, yang berubah setiap jam dan tanggal sesuai siklus deklinasi dan *solstice* setiap tahunnya di suatu titik di permukaan bumi. Kemudian dilengkapi

data lainnya untuk menghitung radiasi langsung, radiasi baur dan terakhir radiasi surya global .

3. Hasil perhitungan energi harian rata-rata untuk kota Bandung, yang tertinggi $8515 Wh/m^2$ pada bulan Januari dan terendah $5936 Wh/m^2$ pada bulan Juli.
4. Perbedaan besarnya radiasi surya global di kota Bandung saat jarak bumi-matahari terjauh (*aphelion*) bulan Juli, dan terdekat (*perhelion*) bulan Januari pada radiasi puncak (tengah hari) hanya $57,9 W/m^2$, sedangkan perbedaan karena Geometri/ deklinasi Surya posisi kota Bandung pada dua bulan tersebut di tengah hari sebesar $486 W/m^2$.
5. Dapat disimpulkan Deklinasi Surya kota Bandung pada bulan Januari dan Juli menjadi faktor utama tinggi dan rendahnya radiasi surya di dua bulan tersebut dan bukan karena faktor jarak bumi-matahari terdekat dan terjauh.
6. Hasil perhitungan besarnya energi surya dengan sampel kota Bandung dalam ulisan ini cukup akurat, hanya berbeda 3,9 % dengan hasil pengukuran oleh LAPAN Bandung, sehingga model matematis simulasi perhitungan energi radiasi surya dapat digunakan untuk memprediksi besar energi surya di suatu lokasi di permukaan bumi termasuk di Indonesia pada jam, hari dan bulan tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

Sol Wieder. (1982). *An Introduction to Solar Energy for Scientist and Engineers*. Penerbit John Wiley & Sons, USA ,

Wilbert F. Stoecker & Jerold W. Jones.(1987). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw Hill 1982, Terjemah oleh Suppratman Hara "Refrigrasi dan Pengkondisian Udara" – Penerbit Erlangga.

Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) RI.(2017). *Rencana Umum Energi Nasional*.

Yusuf Suryo Utomo, (2017). *Prediksi Radiasi Surya Global Bulanan Kota Bandung Menggunakan Data Lama Penyinaran Matahari (LPM)*. Jurnal Material dan Energi Indonesia Vol. 07, No. 02 hal 21 – 27 Departemen Fisika FMIPA Unpad Bandung.

Haslizen Hoesin, Yusuf Suryo Utomo dan Isril Haen (2004). *Model Matematis Perkiraan Radiasi Surya Pada Stasiun Pengukuran Lama Penyinaran Matahari*, Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses 2004, Jurusan Teknik Kimia UNDIP Semarang, p. A-4/1-6.

Haslizen Husein. (1980). *Radiasi Matahari di Permukaan Bumi dan Atmosfir*. Proseding

- Seminar Nasional Kelompok Tenaga Radiasi dan Lingkungan, Bandung.
- Aman Mostavan. (1999). *Konversi Energi Surya*” Diktat Kuliah TF-427 Teknik Energi Surya, Jurusan Teknik Fisika ITB.
- A Harsono dan Parangtopo. (1988). *Analisa Radiasi Surya tentang Kecerahan dan Radiasi Baur di Jakarta*. Jurusan Fisika FIPIA-UI – Paper Riset Dirjen Energi Baru Deptamben RI.
- Irawan Rahardjo dan Ira Fitriana, “*Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia*” Proposal BPPT Strategi Penyediaan Listrik Nasional Dalam Rangka Mengantisipasi Pemanfaatan PLTU Batubara Skala Kecil, PLTN, dan Energi Terbarukan. http://www.oocities.org/markal_bppt/publish/pltkcl/plrahard.pdf.
- Ahmad Kurnia, (1990). *Intensitas Radiasi Surya untuk Pemanfaatan Secara Fotovoltaik*, Skripsi Jurusan Fisika FMIPA Unpad Bandung.
- <https://www.republika.co.id/berita/q3o89y368/pekan-ini-jarak-bumi-terdekat-dengan-matahari>. Berita harian online Republika, 06 Januari 2021.
- <https://www.kompas.com/tren/read/2021/07/06/140000265/hari-ini-terjadi-aphelion-bumi-berada-di-titik-terjauh-dari-matahari-apa-dampaknya?page=all>. Berita harian online Kompas.com, 06 Juli 2021.