

Ekstraksi Model Gummel Poon dengan Metode Pencocokan Kurva

M. Nur Sulaiman, Moch. Rif'an, dan D. R. Santoso.

Abstrak—Simulator rangkaian elektronika berbasis SPICE menerapkan model Gummel Poon banyak digunakan pelajar. Perancang harus memiliki parameter model dari devais elektronika sebelum melakukan analisis dengan bantuan komputer. Jika komponen yang digunakan diperoleh dari pasar, ada kemungkinan karakteristiknya tidak sesuai dengan lembar data dan / atau model dalam pustaka SPICE. Oleh karena itu perlu dikembangkan metode ekstrasi parameter model. Metode ekstaksi model Gummel Poon menerapkan analisis regresi telah diuji dan disimulasi. Hasilnya menunjukkan bahwa faktor kualitas kurva yang dicocokkan, R^2 , sangat dekat dengan 1. Hasil ini cukup memuaskan dalam simulasi.

Kata Kunci— Ekstraksi, Gummel Poon, karakteristik statik, kuadrat terkecil, pencocokan kurva.

I. PENDAHULUAN

SATU model rangkaian listrik untuk transistor persambungan bipolar adalah Gummel Poon. Model ini digunakan dalam aplikasi SPICE untuk membantu perancang dalam analisis rangkaian. Aplikasi ini telah menyediakan cukup banyak model devais elektronika di dalam pustakanya, namun devais yang diperoleh dari pasar sering kali tidak sesuai dengan model. Agar SPICE mampu memberi bantuan dalam proses perancangan, parameter model dari komponen harus diekstraksi dan disimpan dalam librasi SPICE. Ekstraksi yang dilakukan di sini adalah untuk mendapatkan parameter model yang terkait dengan titik operasi BJT dan analisa dc. Sebuah model baru, VBIC, disebut sebagai model yang bisa menggantikan model Gummel-Poon [1]. Namun sampai saat ini, ia belum banyak digunakan dalam aplikasi simulasi komensial.

II. MODEL GUMMEL-POON

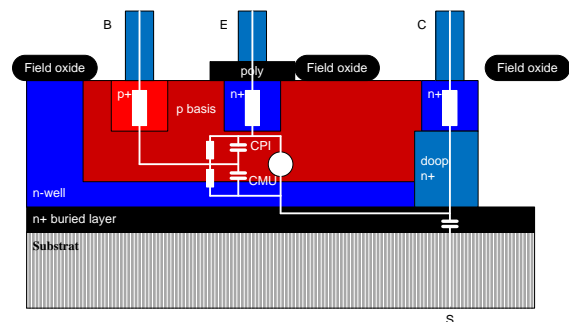
Model Gummel Poon hanya mencakup bagian dalam dari transistor diskrit. Oleh karena itu sambungan pnp parasit seperti terdapat dalam rangkaian terintegrasi tidak dimodelkan [2]. Penampang struktur fisik

M. Nur Sulaiman adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Gajayana, Malang, Indonesia (Jl. Merjosari phone 0341-562411; email nuruniga@gmail.com) dan mahasiswa Program Magister dan Doktor Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

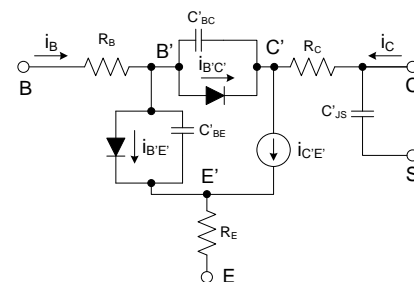
Moch. Rif'an adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Jl. MT. Haryono phone 0341-665144; email rifan@ub.ac.id)

D. R. Santoso adalah dosen di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Jl. MT. Haryono phone 0341-665144; email dieks@ub.ac.id).

transistor persambungan bipolar (*Bipolar Junction Transistor*, BJT) seperti Gambar 1 dinyatakan dalam rangkaian listrik model Gummel-Poon (Gambar 2). Tampak bahwa lapisan pnp parasit (*basis n-well substrat*) tidak dimodelkan.



Gambar 1. Penampang fisik transistor bipolar npn, sambungan pnp parasitik diabaikan.



Gambar 2. Skema sinyal besar model Gummel Poon dari transistor bipolar npn.

Transistor ideal terdiri atas sambungan pn dan sumber arus tak bebas. Sambungan pn terdiri atas daerah netral p dan daerah netral n, selain itu terdapat penampang yang berhadapan. Berdasarkan fisika BJT model Gummel dibangun dan terdiri atas dioda, sumber arus tak-bebas, resistor, dan kapasitor. Prategangan (*bias*) yang diberikan pada terminal transistor akan menentukan modus kerja transistor. Hubungan antara polaritas tegangan terminal dengan modus kerja disajikan Tabel I.

Metode yang dikembangkan di sini melakukan ekstraksi parameter transistor pada modus aktif maju (*forward*). Karena lapisan transistor dapat dipandang simetri, ekstraksi parameter transistor untuk modus aktif balik (*reverse*) dapat diperoleh dengan cara sama tetapi polaritas tegangan terminal, v_{BE} dan v_{BC} dibalik.

A. Persamaan Arus-Tegangan Terminal

Persamaan arus-tegangan model Gummel Poon

disusun dengan menggangap tidak ada tegangan jatuh pada hambatan badan (*bulk resistance*) sehingga $v_{B'E'} = v_{BE}$ dan $v_{B'C'} = v_{BC}$. Ekstraksi beberapa parameter yang memerlukan tingkat arus tinggi perlu melibatkan resistansi bulk. Arus dan tegangan dalam persamaan yang akan disajikan adalah total harga dc dan ac.

B. Persamaan Arus Basis

Mengikuti HKA arus basis, i_B , adalah:

$$i_B = i_{B'E'} + i_{B'C'} \quad (1)$$

Arus $i_{B'E'}$ dan $i_{B'C'}$ masing-masing disebabkan oleh dua komponen, yaitu arus difusi dan arus rekombinasi berturut-turut pada persambungan basis-emitor dan basis-kolektor.

$$i_B = \frac{i_f}{BF} + i_{BErec} + \frac{i_r}{BR} i_{BCrec} \quad (2)$$

di mana:

- i_f : arus difusi maju ideal
- i_{BErec} : efek rekombinasi sambungan B-E
- i_r : arus difusi balik ideal
- i_{BCrec} : efek rekombinasi sambungan B-C

Harga arus difusi dan efek rekombinasi adalah sebagai berikut:

$$i_f = IS e^{v_{BE}/V_t} NF \cdot v_t^{-1} - 1 \quad (3)$$

$$i_{BErec} = ISE e^{v_{BE}/V_t} NE \cdot v_t^{-1} - 1 \quad (4)$$

$$i_{BCrec} = ISE e^{v_{BC}/V_t} NE \cdot v_t^{-1} - 1 \quad (5)$$

$$i_r = IS e^{v_{BC}/V_t} NR \cdot v_t^{-1} - 1 \quad (6)$$

di mana v_t adalah tegangan termal dan parameter model Gummel-Poon dinyatakan dalam huruf besar semua.

C. Persamaan Arus Kolektor

Mengikuti HKA arus kolektor, i_C , adalah:

$$i_C = i_{C'E'} - i_{B'C'} \quad (7)$$

di mana $i_{C'E'}$ adalah arus kolektor-emitor,

$$i_{C'E'} = i_f - i_r N_{qB}^{-1} \quad (8)$$

di mana N_{qB} adalah muatan basis,

$$N_{qB} = 0,5 \cdot q_{1S} \left(1 + \sqrt{1 + 4q_{2S}} \right) \quad (9)$$

Di mana q_{1S} adalah pemodelan tak-linieran modulasi lebar basis yang dikenal sebagai pengaruh Early,

$$q_{1S} = 1 - v_{BE}/VAR - v_{BC}/VAF^{-1} \quad (10)$$

dan q_{2S} adalah pengaruh injeksi tingkat tinggi yang dikenal sebagai pengaruh Kirk,

$$q_{2S} = \frac{IS}{IKF} \left(e^{\frac{v_{BE}}{NF \cdot v_t}} - 1 \right) + \frac{IS}{IKR} \left(e^{\frac{v_{BC}}{NR \cdot v_t}} - 1 \right) \quad (11)$$

D. Parameter Model dalam Modus Aktif Maju

Mengikuti pembatasan dalam penelitian, parameter yang berhubungan dengan titik operasi dan analisa dc pada modus aktif maju adalah parameter DC (BF , IKF , IS , ISE , NE , NF , VAF , dan VAR) dan, parameter ohmik (RE). Penjelasan makna dari parameter tersebut disajikan dalam Tabel II. [3]. Pendekatan harga

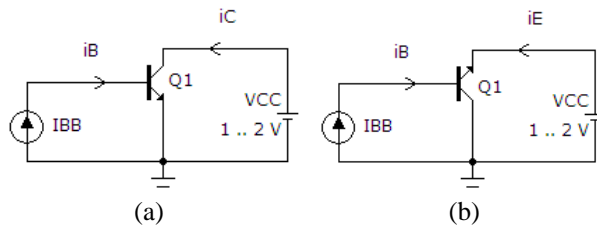
prategangan terminal modus aktif maju adalah $v_{BE} \geq 4 \cdot v_t$ dan $v_{BC} \leq 4 \cdot v_t$ [5]. Dengan kondisi ini arus i_r dan i_{BCrec} dapat di hilangkan karena sangat kecil dibanding arus i_f dan i_{BErec} . Tetapi efek Early akan tetap mempengaruhi arus i_C .

TABLE II
DEFINISI PARAMETER MODEL DALAM MODUS AKTIF MAJU

| Nama | Keterangan | Nilai default | Nilai tipikal | Unit |
|------|-------------------------------|---------------|---------------|----------|
| BF | Beta maksimum maju ideal | 100 | 150 | |
| IKF | Arus besar beta maju rool-off | ∞ | .05 | A |
| IS | Transport arus jenuh | .1e-15 | 1e-15 | A |
| ISE | Arus jenuh kebocoran B-E | 0 | .1e-12 | A |
| ISC | Arus jenuh kebocoran B-C | 0 | 1e-13 | A |
| NF | Koefisien emisi arus maju | 1 | 1 | |
| NE | Koefisien emisi kebocoran B-E | 1.5 | 1.7 | |
| RE | Hambatan emitor | 0 | 5 | Ω |
| VAF | Tegangan Early maju | ∞ | 100 | V |
| VAR | Tegangan Early balik | ∞ | 50 | V |

III. STRATEGI EKSTRAKSI DAN OPTIMASI

Ekstraksi parameter model memerlukan dua pengukuran dc: pertama kurva keluaran, $I_C(V_{CE})$ dengan I_B sebagai parameter, baik modus aktif maju dan balik. Kurva ini berguna untuk ekstraksi VAF dan VAR . Kedua kurva Gummel (*Gummel plot*), yaitu kurva arus kolektor dan basis dalam skala logarismis, $\log(I_C)$ dan $\log(I_B)$, sebagai fungsi tegangan basis-emitor, V_{BE} , dalam skala linier dengan kondisi tegangan basis-kolektor konstan, $V_{BC} = \text{konstan}$. Kurva ini berguna untuk ekstraksi NF , IS , ISE , BF , dan NE . Berdasarkan kurva Gummel, perbandingan arus I_C terhadap I_B , Beta DC, dapat diperoleh dan ini digunakan untuk ekstraksi IKF . Setelah parameter IKF ditemukan, resistansi bulk daerah emitor, RE , dapat ditemukan sebagai bagian dalam perbaikan nilai IKF .



Gambar 4. Diagram rangkaian pengukuran arus-tegangan. (a) $I_C(V_{CE})$ dengan I_B konstan untuk ekstraksi VAF . (b) $I_C(V_{BE})$ dan $I_B(V_{BE})$ dengan V_{CE} konstan untuk ekstraksi VAR .

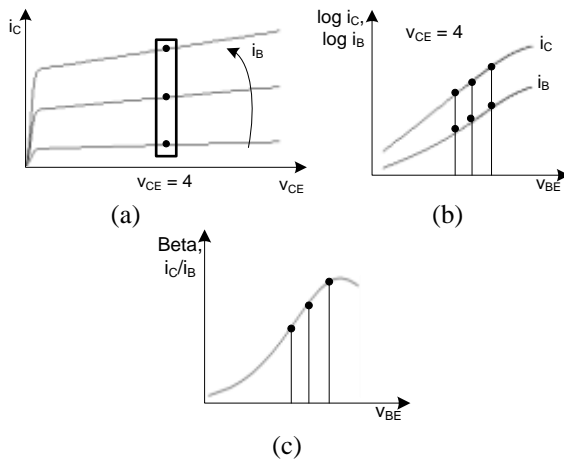
Diagram rangkaian untuk pengukuran arus-tegangan disajikan pada Gambar 4. Sketsa kurva keluaran, kurva Gummel, dan kurva Beta disajikan dalam Gambar 5. Pengambilan data arus-tegangan harus memperhatikan kurva S dari $Beta(V_{BE})$ [4].

A. Ekstraksi VAF dan VAR

VAF dapat diperoleh dari kurva keluaran modus aktif maju. Besaran dc dari arus kolektor dalam Persamaan (7) pada modus aktif maju dapat didekati dengan Persamaan (12).

$$I_C = I_f / N_{qB} \quad (12)$$

Pendekatan model muatan basis, N_{qB} , pada modus aktif maju dan pengukuran pada tingkat arus rendah disajikan Persamaan (12).

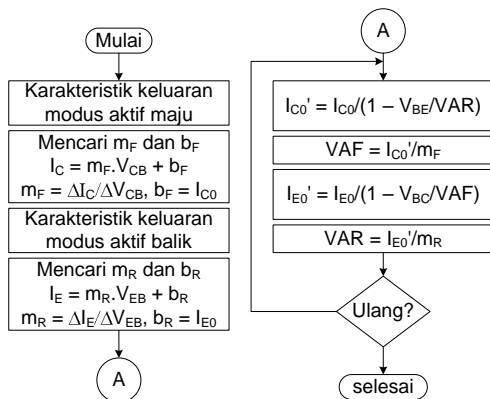


Gambar 5. a. Kurva keluaran, b. Kurva Gummel, c. Kurva Beta dc.

$$N_{qB} \cong q_{IS} = 1 - v_{BE}/VAR - v_{BC}/VAF^{-1} \quad (13)$$

Menurut [5], jika VAF rendah, meskipun arus basis tetap, peningkatan tegangan V_{BC} tertentu, ΔV_{BC} , akan menghasilkan peningkatan linier pada arus I_C , ΔI_C . Jika nilai VAR rendah, ia juga berpengaruh pada ekstraksi VAF . Oleh karena itu ekstraksi nilai VAF dan VAR pada tahap ini dan akan lebih baik jika dilakukan dengan beberapa iterasi seperti diagram alir pada Gambar 5. Pada putaran pertama digunakan nilai default VAR .

Diagram rangkaian pengukuran arus-tegangan disajikan pada Gambar 6. Arus basis, I_B , ditetapkan pada nilai rendah (misalnya $1 \mu A$) di mana hambatan bulk dapat diabaikan. Tegangan V_{CE} diubah secara bertahap dan dilakukan pengukuran tegangan V_{CE} dan arus I_C pada setiap harga V_{CE} . Arus I_B yang digunakan pada modus aktif maju juga diterapkan pada modus aktif balik.



Gambar 6. Iterasi ekstraksi VAF dan VAR . Nilai awal $VAR = \infty$.

B. Ekstraksi NF dan IS

Kedua parameter ini dapat diperoleh dari kurva Gummel, yaitu $\log(I_C)$ lawan V_{BE} dengan V_{CE} konstan sedemikian hingga $V_{BC} \leq 4.v_t$. Arus kolektor pada Persamaan (12) berlaku di sini. Operasi logaritma terhadap arus I_C akan menghasilkan persamaan garis lurus $y = m.x + c$.

$$\log I_C N_{qB} = V_{BE} \log(e) NF.v_t^{-1} + \log IS \quad (14)$$

Di mana $y = \log(I_C/N_{qB})$, $m = \log(e).(NF.v_t)^{-1}$, $x = V_{BE}$, dan $c = \log(IS)$. Geometri kemiringan garis adalah $\Delta \log(I_C)/\Delta V_{BE}$. Dengan menyamakan kemiringan dalam model matematik dan geometri dapat diperoleh parameter NF . Jika $\Delta \log(I_C) = 1$ dekade maka harga NF adalah:

$$NF = \Delta V_{BE} \log(e)(v_t)^{-1} \quad (15)$$

Harga IS diperoleh dari Persamaan (16)

$$IS = 10^c \quad (16)$$

atau,

$$IS = I_C N_{qB} / e^{V_{BE}/NF.v_t} \quad (17)$$

Diagram rangkaian pada Gambar (6.a) dapat digunakan untuk memperoleh kurva Gummel dengan merubah I_{BB} secara bertahap dan menjaga V_{CE} konstan. Plot hasil pengukuran arus I_C terhadap tegangan V_{BE} dalam skala semilog akan menghasilkan kurva Gummel seperti Gambar 4.b.

Sebagai tambahan, bahwa arus yang terukur adalah arus kolektor yang dipengaruhi efek Early. Nilai VAF dan VAR hasil ekstraksi digunakan untuk menghilangkan pengaruh itu. Data yang menjadi perhatian adalah nilai $\log I_C N_{qB}$ dengan tegangan V_{BE} dalam kisaran harga 400 mV hingga 600 mV di mana pengaruh IKF dan hambatan bulk bisa diabaikan

C. Ekstraksi ISE , BF dan NE

Persamaan arus basis, $I_B(V_{BE})$, diperlukan untuk ekstraksi ISE , BF , dan NE . Diagram rangkaian pada Gambar (6.a) dan prosedur yang sama seperti ekstraksi parameter NF dan IS serta kisaran tegangan V_{BE} yang sama kecuali pengukuran I_C diganti pengukuran I_B digunakan untuk mendapatkan data. Persamaan arus basis dalam modus aktif maju adalah:

$$I_B = I_f / BF + I_{BErec} \quad (18)$$

Harga I_f sama dengan arus kolektor modus aktif maju, I_C , yang bebas dari pengaruh Early dan pengaruh Kirk sehingga dapat ditulis sebagai,

$$I_B = I_C' / BF + I_{BErec} \quad (19)$$

Di mana $I_C' = I_C.N_{qB}$. Jika kondisi pengukuran arus I_B sama dengan pengukuran sebelumnya maka data I_C dari hasil pengukuran sebelumnya dapat dimanfaatkan dalam tahap ini. Kedua arus itu adalah fungsi tegangan V_{BE} . Harga ISE , BF , dan NE secara serempak dapat diperoleh dengan mengembangkan sistem persamaan dengan mengacu metode pencocokan kurva [6].

Persamaan (19) dibagi dengan I_B menyebabkan ruas kiri bernilai 1 yang berarti arus basis yang diperoleh dari Persamaan (19) harus sama dengan arus basis hasil pengukuran. Parameter model yang belum diketahui akan menyebabkan ada perbedaan, E_{rel} , di antara keduanya. Persamaan (20) menyajikan harga E_{rel} untuk masing-masing koordinat titik hasil pengukuran, E_{reli} .

$$E_{reli} = \frac{I_{Ci}}{I_{Bi}BF} + \frac{ISE}{I_{Bi}} \left(e^{\frac{V_{BE}}{NE \cdot V_i}} - 1 \right) \quad (20)$$

Penerapan kuadrat rata-rata terkecil (*Least Mean Square*) pada Persamaan (20) menghasilkan perbedaan total dari setiap titik ukur.

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^N E_{reli}^2 \quad (21)$$

Diharapkan harga E_{tot} minimal dengan menentukan harga ISE , BF , dan NE . Derivasi parsial dari Persamaan (21) terhadap BF dan ISE dan eliminasi untuk menyelesaikan ISE akan diperoleh Persamaan (22) dan Persamaan (23).

$$ISE = S1.S2 - S3S4 \quad S5.S2 - S4^2 \quad (22)$$

$$BF = S2 \quad S2 - ISE.S4 \quad (23)$$

Di mana :

$$S1 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{I_{Bi}} e^{\frac{V_{BE}}{NE \cdot V_i}} \quad S2 = \sum_{i=1}^N \frac{I_{Ci}^2}{I_{Bi}^2} \quad S3 = \sum_{i=1}^N \frac{I_{Ci}}{I_{Bi}}$$

$$S4 = \sum_{i=1}^N \frac{I_{Ci}}{I_{Bi}^2} e^{\frac{V_{BE}}{NE \cdot V_i}} \quad S5 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{I_{Bi}^2} e^{\frac{2V_{BE}}{NE \cdot V_i}}$$

Ekstraksi dilakukan dengan merubah NE secara bertahap dan diterapkan ke dalam Persamaan (22) dan Persamaan (23). Harga E_{tot} diperoleh dari satu set harga BF , ISE , dan NE ini. Suatu set parameter yang menyebabkan E_{tot} minimal adalah hasil ekstraksi.

D. Ekstraksi IKF

Parameter IKF menyebabkan kemiringan arus I_C dalam kurva Gummel berkurang. Pengaruh IKF diiringi dengan pengaruh hambatan RE , tetapi parameter IKF hanya berpengaruh pada arus I_C sedangkan RE berpengaruh pada kedua arus I_C dan I_B . Oleh karena itu ekstraksi IKF dilakukan berdasar pada perbandingan I_C dan I_B . Dalam modus aktif maju perbandingan tersebut bisa ditulis sebagai,

$$\text{Beta} = I_C \cdot I_B^{-1} = I_f / N_{qB} \quad I_f / BF + I_{BErec}^{-1} \quad (24)$$

Ruas kiri dan ruas kanan Persamaan (24) harus memiliki nilai sama. Parameter IKF di dalam N_{qB} belum diketahui, ia akan menyebabkan hadirnya perbedaan, E_{rel} . Perbedaan di setiap koordinat kurva Gummel, E_{reli} , dimasukkan dalam Persamaan (25) agar metode kuadrat rata-rata terkecil dapat diterapkan.

$$1 + E_{reli} = \frac{I_f / N_{qB}}{I_f / BF + I_{BErec}} \frac{I_{Bi}}{I_{Ci}} \quad (25)$$

Secara keseluruhan, perbedaan hasil ukur dan model pada Persamaan (25) dapat dapat diperoleh dengan Persamaan (21). Nilai E_{tot} minimal dapat diperoleh dengan merubah IKF secara bertahap. Data pengukuran, I_C dan I_B , dipilih dalam kisaran V_{BE} 600 mV hingga 750

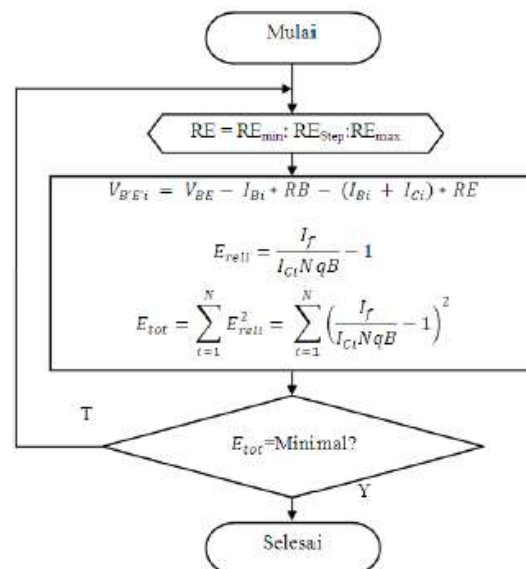
mV dengan V_{CE} konstan. Dalam kisaran tegangan V_{BE} ini, secara umum bati arus dc akan mencapai nilai puncaknya seperti ditunjukkan Gambar 4.c.

E. Ekstraksi Hambatan Bulk Emitemer, RE

Tingkat arus tinggi pada terminal kolektor dalam ekstraksi IKF menyebabkan pengaruh hambatan bulk perlu diperhitungkan. Mengikuti HKT, tegangan intrinsik daerah basis-emitor adalah:

$$V_{B'E'} = V_{BE} - I_B \cdot RB - I_B + I_C \cdot RE \quad (26)$$

Arus I_B sangat kecil dibanding arus I_C sehingga RB kurang berperan dalam persamaan dan dapat diabaikan. Ekstraksi dengan cara mencari kemiringan garis lurus seperti ditunjukkan [2] memerlukan tingkat arus sangat tinggi untuk mendekati nilai sebenarnya. Sebagai gantinya, dilakukan perubahan nilai RE secara bertahap kemudian setiap nilai $V_{B'E'}$ diterapkan pada Persamaan arus kolektor, Persamaan (12). Perbedaan total dari hasil hitung dan hasil ukur dapat diperoleh dengan penerapan kuadrat rata-rata terkecil. Harga RE yang menghasilkan selisih total minimal dinyatakan sebagai hasil ekstraksi. Iterasi ditunjukkan dalam Gambar 10.



Gambar 10. Iterasi untuk mendapatkan RE

F. Optimasi

Tahap awal ekstraksi menggunakan nilai default untuk parameter model belum diketahui. Hasil ekstraksi awal dapat diperbaiki dengan cara mengulang proses ekstraksi. Hasil ekstraksi awal dilibatkan dalam proses pengulangan ini. Mengacu pada hasil simulasi, umumnya parameter model mencapai nilai akhir setelah lima kali pengulangan.

Satu set parameter model terakhir belum tentu menghasilkan kurva karakteristik arus-tegangan yang sangat mirip dengan kurva karakteristik hasil ukur. Metode kuadrat terkecil digunakan kembali untuk mencari set parameter model yang menghasilkan kurva paling mirip. Untuk optimasi, kurva yang dibandingkan adalah kurva Beta DC yang disusun dengan semua data

hasil pengukuran.

IV. HASIL PENGUJIAN

Sebuah transistor dirakit dalam simulator Microcap menjadi rangkaian seperti Gambar 6. Analisa dc dilakukan untuk mengambil data-data numerik arus-tegangan yang diperlukan sebagai masukan proses ekstraksi. Tiga kategori transistor yang digunakan sebagai contoh, yaitu daya rendah (BC547A), daya menengah (BC141-10), dan daya besar (2SC1173).

Skrip Matlab telah disusun untuk ekstraksi parameter Gummel Poon. Data masukan terdiri atas hasil pengukuran arus-tegangan terminal transistor dan nilai ideal dari parameter Gummel Poon.

Hasil optimal ekstraksi parameter BC547A disajikan dan dibandingkan dengan nilai model librari SPICE dalam Tabel III. Perbedaan nilai parameter model terbesar ditemukan pada VAR karena nilai model SPICE ideal. Sedangkan IKF berbeda sebesar -1,1%. Tetapi jika set parameter hasil ekstraksi dan model digunakan

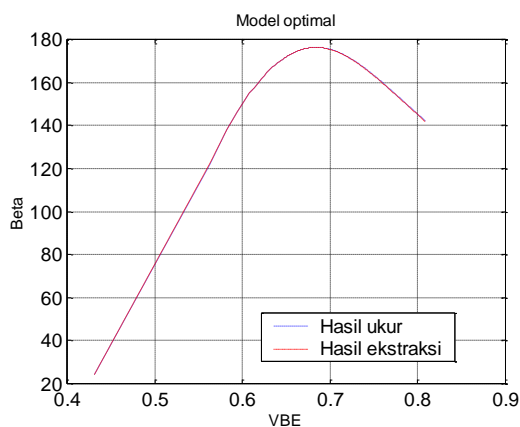
TABEL III
HASIL EKSTRAKSI DAN PERBANDINGAN MODEL BJT TIPE BC547A

| Par | Model SPICE | Hasil Ekstraksi | Selisih(%) |
|-----|--------------|-----------------|---------------|
| BF | 1.90796e+002 | 1.90813e+002 | 9.01242e-003 |
| IKF | 1.51395e-001 | 1.49720e-001 | -1.10638e+000 |
| IS | 7.88900e-015 | 7.86989e-015 | -2.42281e-001 |
| ISE | 1.00300e-012 | 1.00745e-012 | 4.43291e-001 |
| NE | 1.83900e+000 | 1.83950e+000 | 2.71887e-002 |
| NF | 9.68124e-001 | 9.68023e-001 | -1.04844e-002 |
| RE | 1.23200e+000 | 1.23300e+000 | 8.11688e-002 |
| VAF | 1.00000e+002 | 1.00016e+002 | 1.62190e-002 |
| VAR | 1.00000e+099 | 5.37755e+013 | -1.00000e+002 |

untuk membuat kurva $I_C(V_{BE})$, $I_B(V_{BE})$ dan $Beta(V_{BE})$ kemudian dibandingkan, total perbedaan berdasar metode kuadrat rata-rata terkecil menghasilkan E_{tot} sebagai berikut:

| | $i_C (v_{BE})$ | $i_B (v_{BE})$ | Beta (vBE) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|
| Etot | 1.60147e-003 | 1.60147e-003 | 1.60147e-003 |
| R2 | 9.92730e-001 | 9.96646e-001 | 1.01109e+000 |

Plot kurva Beta DC berdasar hasil ekstraksi dan model librari SPICE ditampilkan dalam Gambar 11.



Gambar 11. Plot beta dc hasil ekstraksi dan hasil ukur BC547A

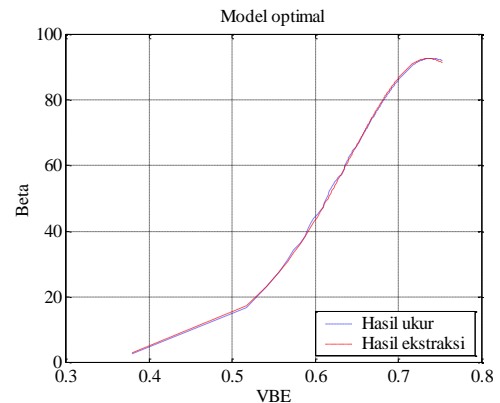
Tampak bahwa secara keseluruhan kedua kurva berimpit. Hasil ini cukup memuaskan karena keduanya menunjukkan perilaku yang sangat mirip.

Hasil optimal ekstraksi parameter BC141-10 disajikan dan dibandingkan dengan nilai model librari SPICE dalam Tabel IV. Perbedaan antara model dengan hasil ekstraksi semakin besar, hal ini tampak pada kolom selisih parameter BF , IKF , IS , ISE , NF , dan RE . Secara keseluruhan, set parameter tersebut menghasilkan total perbedaan, E_{tot} , yang rendah dan kurva $Beta(V_{BE})$ yang berimpit. Penampakan kurva beta dc disajikan dalam Gambar 12.

TABEL IV
HASIL EKSTRAKSI DAN PERBANDINGAN MODEL BJT TIPE BC141-10

| Par | Model SPICE | Hasil Ekstraksi | Selisih(%) |
|-----|--------------|-----------------|---------------|
| BF | 1.32281e+002 | 1.40122e+002 | 5.92772e+000 |
| IKF | 1.85688e-001 | 1.44730e-001 | -2.20574e+001 |
| IS | 9.99600e-015 | 1.25198e-014 | 2.52481e+001 |
| ISE | 9.95415e-013 | 8.96111e-013 | -9.97610e+000 |
| NE | 1.59700e+000 | 1.57980e+000 | -1.07702e+000 |
| NF | 9.97116e-001 | 1.00500e+000 | 7.90919e-001 |
| RE | 3.68637e-001 | 3.39000e-001 | -8.03962e+000 |
| VAF | 1.00000e+002 | 9.99980e+001 | -2.02446e-003 |
| VAR | 1.00000e+099 | 2.28802e+005 | -1.00000e+002 |

| | $i_C (v_{BE})$ | $i_B (v_{BE})$ | Beta (vBE) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|
| Etot | 4.74085e-002 | 4.74085e-002 | 4.74085e-002 |
| R2 | 9.89672e-001 | 1.00338e+000 | 9.98766e-001 |



Gambar 12. Plot beta dc hasil ekstraksi dan hasil ukur BC141-10

Hasil optimal ekstraksi parameter 2SC1173 disajikan dan dibandingkan dengan nilai model librari SPICE dalam Tabel 4. Perbedaan hasil ekstraksi dengan model juga tinggi, hal ini tampak pada kolom selisih parameter BF , IKF , IS , dan ISE . Tetapi kurva $Beta(V_{BE})$ yang dibuat dengan menggunakan parameter SPICE dan hasil ekstraksi menampakan garis yang berimpit.

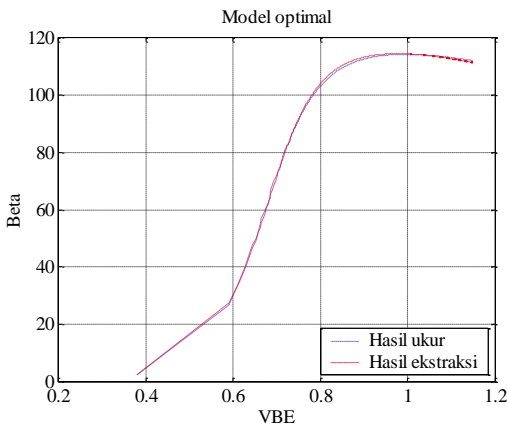
TABEL V
HASIL EKSTRAKSI DAN PERBANDINGAN MODEL BJT TIPE 2SC1173

| Par | Model SPICE | Hasil Ekstraksi | Selisih(%) |
|-----|--------------|-----------------|---------------|
| BF | 1.96362e+002 | 2.13672e+002 | 8.81543e+000 |
| IKF | 1.44800e+000 | 1.17267e+000 | -1.90145e+001 |
| IS | 1.00000e-014 | 1.18215e-014 | 1.82151e+001 |
| ISE | 4.29303e-013 | 3.93968e-013 | -8.23088e+000 |
| NE | 1.45900e+000 | 1.44750e+000 | -7.88211e-001 |
| NF | 1.00000e+000 | 1.00503e+000 | 5.02899e-001 |
| RE | 1.00000e+000 | 9.99000e-001 | -1.00000e-001 |
| VAF | 1.00000e+002 | 1.000273e+002 | 2.73025e-002 |
| VAR | 1.00000e+099 | 1.977886e+014 | -1.00000e+002 |

| | $i_C (v_{BE})$ | $i_B (v_{BE})$ | Beta (vBE) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|
| Etot | 4.31828e-002 | 4.31828e-002 | 4.31828e-002 |
| R2 | 9.63053e-001 | 9.73960e-001 | 1.00787e+000 |

Penyebab perbedaan parameter model adalah pencuplikan data yang digunakan masukan proses pencocokan kurva tidak berada pada daerah yang benar.

Sewaktu mengembangkan metode ini, usaha perbaikan bisa dilakukan dengan mengatur kisaran data yang digunakan sebagai masukan proses ekstraksi sedemikian hingga diperoleh perbedaan hasil ekstraksi terhadap model minimal. Hal ini, dalam praktik, tidak dapat dilakukan karena nilai acuan yang benar tidak dapat diperoleh. Oleh karena itu, dengan menggunakan semua data masukan, rendahnya total perbedaan hasil ekstraksi dan model bisa digunakan sebagai alasan untuk menyatakan bahwa hasil ekstraksi bisa mendekati perilaku transistor sebenarnya.



Gambar 13. Plot beta dc hasil ekstraksi dan hasil ukur 2SC1173

V.KESIMPULAN

Metode ekstraksi telah dibuat dan disimulasi dengan aplikasi Microcap dan Matlab. Tampak bahwa perilaku transistor bisa ditiru dengan memanfaatkan hasil ekstraksi. Jumlah data dan pemilihan kisaran data yang digunakan sebagai data masukan sangat mempengaruhi hasil akhir nilai parameter model. Pemilihan data akan lebih tepat jika hasil pengukuran arus-tegangan terminal transistor bisa disajikan kurva S secara keseluruhan dalam kurva Beta(V_{BE}).

PUSTAKA

- [1] Cao, Xiaochong., (2000, February). Comparison of the New VBIC and Conventional Gummel-Poon Bipolar Transistor Models. *IEEE Transactions On Electron Devices*. VOL. 47. No. 2, pp 427-433. http://www.electronics.oulu.fi/Opetus/ELJK/JUTUT/VBIC_juttu.pdf
- [2] Munich, Sischaka, F., *Gummel-Poon Bipolar Model. Model Description. Parameter Extraction*, Agilent Technology GmbH, 1990, pp. DC 1 – DC 23.
- [3] Steer, Michael. B., 2007. *SPICE: User's Guide and Reference*, Edition 1.3., [On-line], <http://www.freedu.org/doc/SPICE/>
- [4] Breti, J. W., (1998, March). Direct Extraction of SPICE Gummel-Poon for High Frequency Modelling. *IEEE Microelectronic Test Structur*.pp. 83-88. Available: <http://www.uta.edu/ronc/5342/>
- [5] Sendra, Adel S., Smith, Kenneth C., 2010, *Microelectronic Circuits*, Ed. 6, Oxford, New York.
- [6] Kreyszig, E., 1998, *Matematika Teknik Lanjutan*, Ed. 6, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.