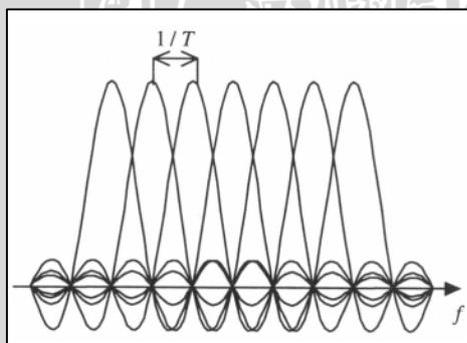


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisi tinjauan referensi untuk memberikan pemahaman dan menyelesaikan permasalahan. Referensi yang digunakan adalah buku yang terkait dengan OFDM dan *user manual* untuk pemodelan. Teori yang dibahas adalah pengertian, sistem, kesalahan sinkronisasi, dan performansi OFDM serta sistem pemodelan menggunakan TMS.

2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDM adalah sistem komunikasi data berkecepatan tinggi dengan menggunakan teknik *multicarrier* (Ergen, 2009). *Orthogonal* mengindikasikan bahwa terdapat hubungan matematis antara frekuensi pada semua *carrier* pada sistem. Pada sistem FDM, masing-masing *carrier* diberi jarak pada domain frekuensi, namun pada sistem OFDM antar *carrier* saling tegak lurus dan terjadi *overlapping* antar *sideband* pada *carrier* (Prasad, 2004). Konsep dari OFDM didasarkan pada penyebaran data berkecepatan tinggi untuk ditransmisikan dengan *carrier* berkecepatan rendah (masing-masing disebut sebagai *subcarrier*) (Ergen, 2009). Jarak antara masing-masing frekuensi ditentukan dengan menggunakan DFT (Hara, 2003), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Spektrum yang *Overlapping* pada OFDM.
Sumber: Bahai (2009:12)

OFDM pertama kali dikenal pada sekitar tahun 1960 dan dikembangkan pada tahun 1970 dan 1980. Pada sekitar tahun 1960 teknik OFDM digunakan pada sistem militer yang diteliti oleh Mosier tahun 1958, Zimmerman tahun 1967, dan Porter tahun 1968. Pada tahun 1981 OFDM diteliti oleh Hirosaki untuk modem berkecepatan tinggi, komunikasi bergerak digital, dan perekaman dengan kerapatan yang tinggi. Dengan cara melakukan proses *multiplexing* dengan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) secara

DFT. Penggunaan OFDM semakin meningkat dikarenakan kecepatan dan daya yang dibutuhkan oleh perangkat pemroses data digital. OFDM digunakan pada layanan *Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL)* dan *Wireless Local Area Network (W-LAN)*. OFDM juga diaplikasikan pada *High Definition Digital Television (HDTV)*, komunikasi optik, dan komunikasi bergerak (Xiong, 2006).

Sistem OFDM memiliki beberapa keuntungan dan kelemahan. Keuntungannya adalah:

1. OFDM yang bersifat *ortogonal* banyak digunakan untuk sistem komunikasi pita lebar nirkabel akibat spektrum yang efisien (Liu, 2005) dan tahan terhadap *multipath fading* (Schmidt, 2013);
2. OFDM dapat diimplementasikan menggunakan DFT dan *Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)* yang mana menurunkan kompleksitas sistem (Xiong, 2006).

Namun OFDM memiliki kelemahan, yaitu:

1. OFDM sensitif terhadap *frequency offset* dan *phase noise* (Prasad, 2004);
2. OFDM memiliki *Peak-to-Average-Power Ratio (PAPR)* yang tinggi, yang mana cenderung mengurangi efisiensi daya pada penguat *Radio Frequency (RF)* (Prasad, 2004).

Parameter utama OFDM pada WLAN IEEE 802.11 a/g ditunjukkan pada Tabel 2.1. Parameter utama yang mempengaruhi parameter lainnya adalah *guard interval* pada OFDM. Nilai *guard interval* (ΔG) bergantung pada *time delay* (τ_{\max}) yang timbul pada kanal antara pemancar dengan penerima, yaitu $\Delta G > \tau_{\max}$. Digunakan 800 ns agar sinyal tahan pada lingkungan dalam maupun luar. Pembatasan jumlah daya dan waktu *guard interval* menjadi 1 dB, durasi simbol yang digunakan adalah 4 μ s. Digunakan jarak antar *subcarrier* sebesar 312,5 kHz yang merupakan hasil dari pengurangan durasi simbol dengan rentang waktu *guard interval*. Penggunaan 48 *subcarrier* kecepatan data dapat mencapai 12 sampai 72 Mbps dengan modulasi BPSK sampai 64-QAM. Ditambah empat simbol sebagai *pilot* untuk mengoreksi *frequency offset*. Penggunaan *Forward Error Coding (FEC)* membuat kecepatan data berubah dari 6 sampai 54 Mbps (Prasad, 2004).

2.1.1 Sistem OFDM

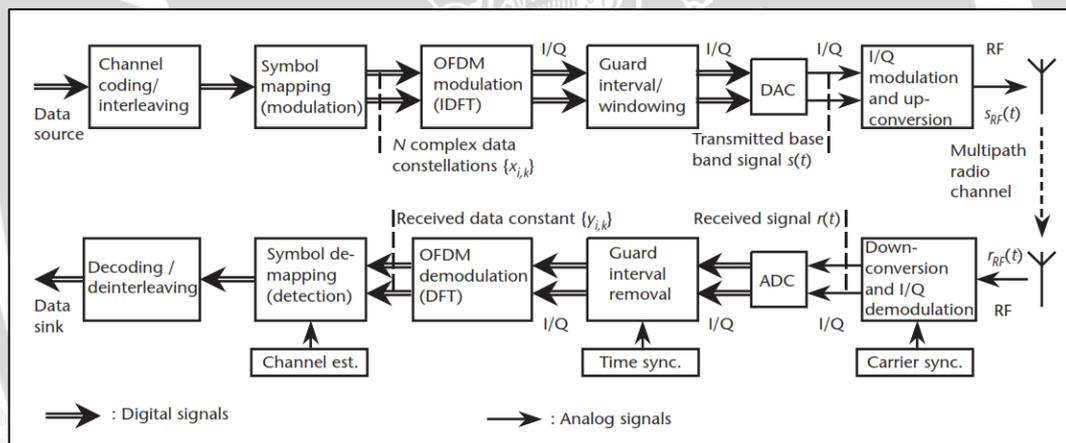
Sistem dari OFDM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 secara luas terbagi menjadi dua, yaitu: blok pemancar (bagian atas) dan blok penerima (bagian bawah). Pada bagian pemancar, sumber data diproses untuk mendapatkan transmisi yang andal atau

untuk mencegah kesalahan bit saat melalui kanal yang memiliki gangguan dengan menggunakan *channel coding*. *Channel coding* ini dapat memperbaiki kesalahan bit. FEC merupakan *coding* yang umum digunakan (Prasad, 2004).

Tabel 2.1 Parameter utama OFDM

Parameter	
Kecepatan Data	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
Modulasi	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
<i>Coding Rate</i>	1/2, 2/3, 3/4
Jumlah <i>subcarrier</i>	52
Jumlah <i>pilot</i>	4
Durasi simbol OFDM	4 μ s
<i>Guard interval</i>	800 ns
Jarak antar <i>subcarrier</i>	312, 5 kHz

Sumber: Liu (2005:5)



Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem OFDM.
(Sumber: Prasad, 2004: 118)

Data tersebut kemudian dibagi sebanyak N kanal atau terjadi pemecahan data serial menjadi paralel dalam *symbol mapping* (Prasad, 2004). Hasil dari *symbol mapping* adalah data kompleks (x_k). Dalam proses ini terjadi pemecahan data berdasarkan modulasi yang digunakan. Modulasi yang dapat digunakan adalah modulasi digital BPSK, *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), atau QAM (Prasad, 2004).

Data paralel tersebut dimodulasikan dengan *subcarrier* yang saling *orthogonal* pada blok IDFT. Secara matematis, persamaan *subcarrier* adalah

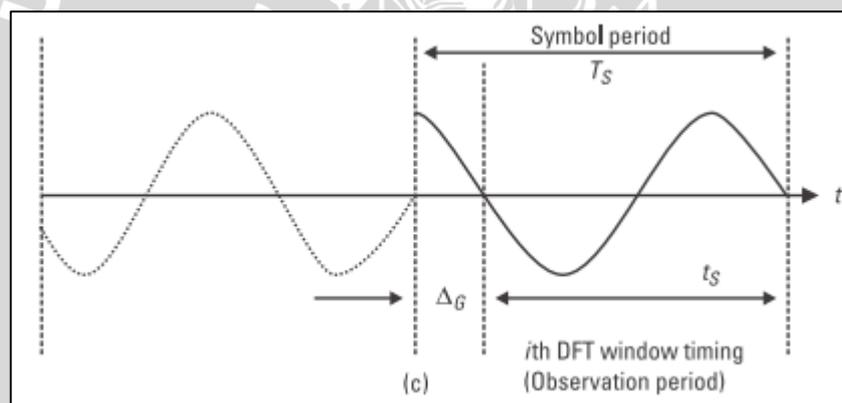
$$\phi_k(t) = e^{j2\pi f_k t} \quad (2-1)$$

dengan f_k adalah frekuensi pada *subcarrier* ke- k . Dengan demikian satu simbol OFDM *baseband* satu simbol dengan *subcarrier* berjumlah N , adalah

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \phi_k(t), \quad 0 < t < T \quad (2-2)$$

dengan T adalah panjang simbol OFDM (Ergen, 2004).

Keluaran dari IDFT kemudian diberikan *guard interval* dan *windowing* untuk menjaga *orthogonalitas* masing-masing sinyal *carrier* dan keindependenan simbol OFDM secara *time division* (Prasad, 2004). Jarak antar periode simbol bertambah oleh ΔG kemudian diberikan *cyclic prefix* (CP) pada masing-masing sinyal termulasi sebelum proses *multiplexing* untuk mencegah terjadinya *Inter Symbol Interference* (ISI) (Ergen, 2009). Periode ΔG harus lebih dari nilai τ_{\max} pada kanal perambatan *multipath* (Prasad, 2004). Pada Gambar 2.3 periode simbol diberikan ΔG antar simbol lain, kemudian disisipkan salinan gelombang yang sama atau CP dengan rentang waktu tertentu dari akhir periode simbol.

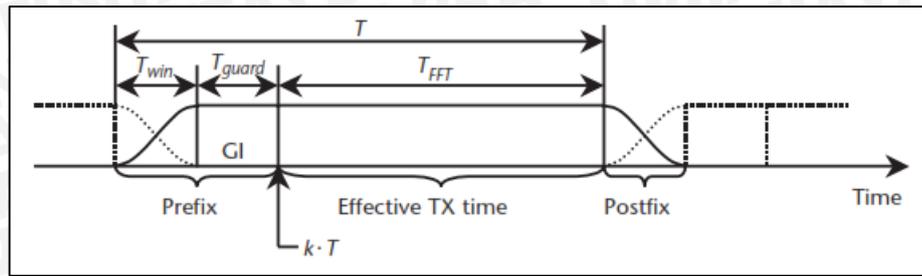


Gambar 2.3 Penambahan *Guard Interval* dengan *Cyclic Prefix* pada Periode Simbol. Sumber: Hara (2003:35)

Sedangkan *windowing* bertujuan untuk mengurangi daya *sidelobe* sinyal persegi keluar dari spektrum yang diinginkan. Periode penambahan ΔG (atau GI pada Gambar 2.4) dan *windowing* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Sinyal tersebut melalui *digital-to-analog converter* (DAC) sebelum ditransmisikan. Dalam DAC terjadi proses *filtering* dan perubahan sinyal digital menjadi analog (Prasad, 2004).

Sebelum ditransmisikan, sinyal analog tersebut melalui *upconverter* yang berfungsi sebagai *mixer* antara sinyal masukan dengan RF. Hal ini bertujuan untuk mentransmisikan sinyal dengan *carrier microwave* (IEEE Dictionary, 2002).



Gambar 2.4 Periode Penambahan *Guard Interval* dan *Windowing*
 Sumber: Prasad (2004:119)

Pada bagian penerima, sinyal OFDM yang diterima oleh antenna melalui proses *downconverter*. Proses ini bertujuan mencampurkan sinyal yang ditransmisikan, yaitu dengan *carrier microwave*, menggunakan osilator lokal (*IEEE Dictionary*, 2002).

Sinyal hasil pencampuran tersebut kemudian melalui proses *analog-to-digital converter* (ADC), sehingga sinyal analog tersebut diubah menjadi digital. Sinyal yang diterima kemudian dikembalikan seperti semula dengan mengambil CP pada sinyal yang disebut dengan *guard time removal*. Sinkronisasi waktu diperlukan untuk menentukan batas simbol. Kesalahan dari proses ini menyebabkan terjadinya ISI (Ergen, 2009).

Data didapatkan dengan melakukan proses DFT. Sinyal tersebut diproses secara matematis dengan mengalikan domain frekuensi dengan sampel DFT. Dalam persamaan dapat ditulis

$$y(t) = s(t) * h(t) \tag{2-3}$$

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k x_k \phi_k(t), \quad 0 < t < NT \tag{2-4}$$

dimana

$$H_k = \int_0^{\tau_h} h(t) e^{j2\pi f_k t} dt \tag{2-5}$$

dengan H_k merupakan transformasi *fourier* $h(t)$ pada frekuensi f_k . Saat didemodulasikan dengan DFT, dengan demikian data yang diterima kembali menjadi bentuk data kompleks (Ergen, 2004). Dalam proses ini juga terjadi sinkronisasi frekuensi dengan tujuan mendapatkan data pada kanal tertentu untuk diproses lebih lanjut. Kesalahan dari proses sinkronisasi ini menyebabkan ICI, hal ini akan dibahas secara lebih khusus pada subbab selanjutnya.

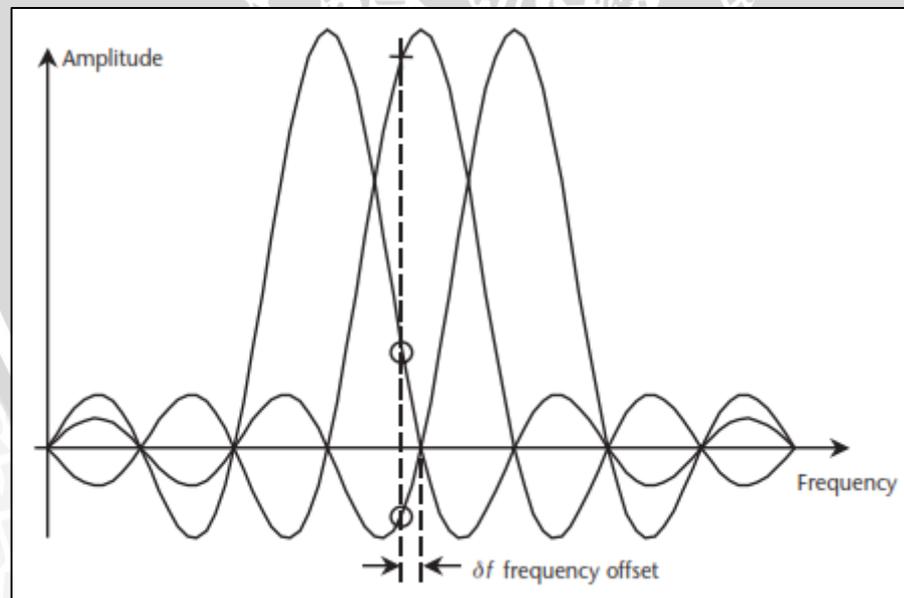
Pemetaan simbol berdasarkan jumlah bit yang ditransmisikan diproses pada *symbol mapping* dan terjadi perubahan data paralel menjadi serial. *Symbol mapping* atau ekualisasi dibutuhkan untuk mendeteksi konstelasi data (Prasad, 2004).

Proses *symbol mapping* mengubah data paralel menjadi serial. Data serial melalui proses *decoding* untuk mengetahui data yang dikirimkan telah benar atau salah.

2.1.2 Kesalahan *Frequency Synchronizaton* pada Penerima OFDM

Sinkronisasi merupakan salah satu bagian yang penting pada penerima dikarenakan perbedaan waktu pada *clock* dan frekuensi pada osilator lokal yang kurang baik dapat menyebabkan penurunan performansi pada sistem. Sinkronisasi waktu digunakan untuk memilih batas dari simbol dan frekuensi untuk menyamakan osilator antara penerima dengan pemancar. Sifat *ortogonal subcarrier* akan hilang dan muncul ISI dan ICI jika kedua sinkronisasi tidak dilakukan.

Kesalahan *frequency synchroninzation* atau perbedaan nilai frekuensi antara osilator pengirim dengan penerima menyebabkan terjadinya *frequency offset*. Akibat dari hal ini membuat proses demodulasi oleh DFT mencuplik (*sampling*) pada posisi yang salah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa daya sinyal *carrier* pada kanal yang dicuplik menurun (“+”) dan munculnya ICI pada sinyal *subcarrier* yang berdekatan (“O”). Sehingga mengakibatkan penurunan nilai SNR (Prasad, 2004).



Gambar 2.5 Timbulnya *Frequency Offset*
Sumber: Prasad (2004:130)

Secara matematis, bila sinyal yang diterima tidak terjadi kesalahan sinkronisasi waktu namun terjadi *frequency offset* (δf), maka

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{j2\pi t(\frac{n}{N}f_s + \delta_f)} \Big|_{t=\frac{k}{f_s}} \quad (2-6)$$

dan setelah melalui DFT didapat

$$\hat{x}_m = \Theta(\delta_f)x_m + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} x_n e^{j2\pi \frac{k}{N}(n-m + \frac{n\delta_f}{f_s})} \quad (2-7)$$

dengan \hat{x}_m terdapat komponen atenuasi ($\Theta(\delta_f)$) akibat *subcarrier* lain (Ergen, 2009)

2.1.3 Performansi OFDM

Performansi OFDM dapat diukur dengan melihat parameter sebagai sinyal analog dan digital. BER merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas sistem komunikasi digital. Sedangkan SNR adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas sistem komunikasi analog. Penjelasan kedua parameter tersebut diuraikan pada subbab selanjutnya.

2.1.3.1 Bit Error Rate

BER merupakan pengukuran pokok dalam mencari kualitas transmisi digital. BER merupakan probabilitas *error* pada sinyal yang diterima. BER dapat ditulis pada persamaan sebagai berikut (Hui, 2009):

$$BER = \frac{Bit_{Error}}{Bit_{Total}} \quad (2-8)$$

dengan Bit_{Error} adalah jumlah bit yang salah pada penerima sedangkan Bit_{Total} adalah jumlah bit yang diterima. Perhitungan dilakukan dengan kurun waktu tertentu. Semakin lama waktu pengamatan, maka semakin mendekati nilai probabilitas BER-nya.

2.1.3.2 Signal-to-Noise Ratio (SNR)

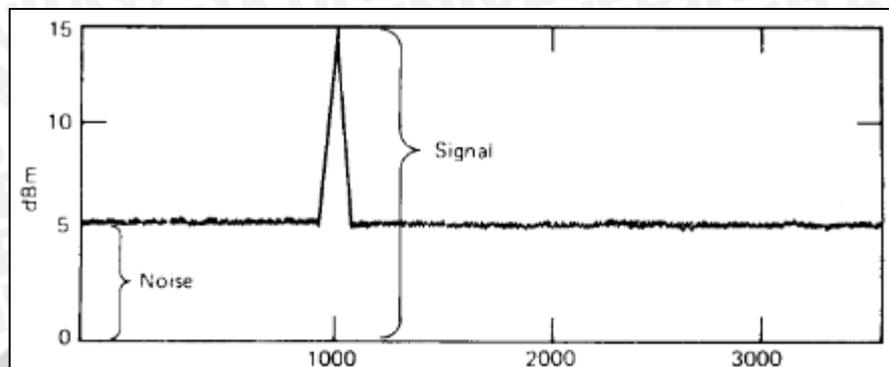
SNR merupakan kriteria yang menentukan performansi sistem analog. SNR adalah rasio antara daya rata-rata sinyal informasi terhadap daya rata-rata *noise* pada sinyal (IEEE Dictionary). Persamaan SNR adalah (Smille, 1999):

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) dB \quad (2-9)$$

dengan S adalah daya sinyal dan N adalah daya *noise*; atau dapat ditulis dalam satuan dB (Freeman, 1999):

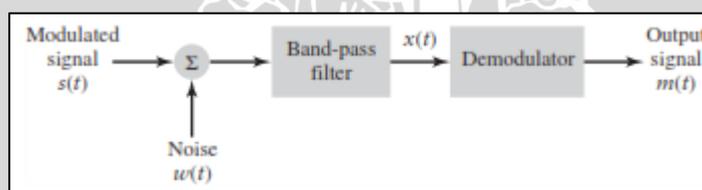
$$SNR_{dB} = level_{(signal \text{ in dBm})} - level_{(noise \text{ in dBm})} \quad (2-10)$$

Pengukuran SNR dengan spektrum frekuensi ditunjukkan pada Gambar 2.6. Gambar 2.6 menunjukkan spektrum frekuensi kanal suara, yaitu 300 sampai 3400 Hz. Pengukuran daya dilakukan dalam dBm. Dari Gambar tersebut diketahui daya noise adalah +5 dBm dan daya sinyal adalah +15 dBm, sehingga diperoleh SNR sebesar 10 dB.



Gambar 2.6 Daya Sinyal dan *Noise* pada Spektrum Frekuensi
Sumber: Freeman (1999:44)

SNR dideteksi pada penerima dengan dua cara, yaitu: *pre-detection* SNR dan *post-detection* SNR. *Pre-detection* SNR diukur sebelum sinyal yang diterima terjadi proses demodulasi untuk mengukur kualitas penerima bagian depan (*front-end receiver*). *Post-detection* SNR diukur setelah sinyal yang diterima terjadi proses demodulasi untuk mengukur kualitas data yang diterima, seperti: suara, video, dan lainnya (Haykin, 2007). Gambar 2.7 menunjukkan pengukuran SNR pada penerima sinyal analog dengan *pre-detection* SNR pada fungsi $x(t)$ dan *post-detection* SNR pada fungsi $m(t)$.



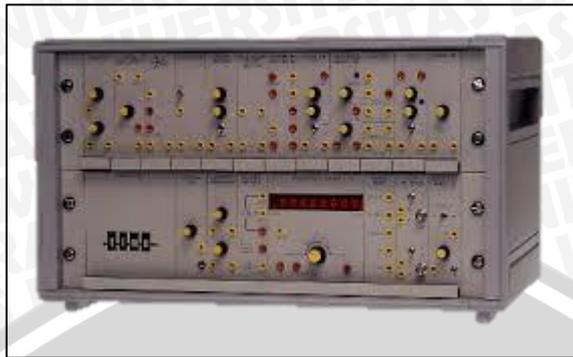
Gambar 2.7 Pendeteksian SNR pada Penerima
Sumber: Haykin (2007:368)

2.2 Sistem Pemodelan Telekomunikasi TIMS

TIMS merupakan perangkat pemodelan telekomunikasi yang dapat memodelkan persamaan matematis ataupun diagram blok suatu sistem telekomunikasi. Pemodelan dilakukan dengan cara memasang modul-modul yang tersedia.

Secara fisik, TIMS adalah suatu perangkat yang terdiri atas dua rak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Rak bagian atas, dapat dipasang hingga 12 modul

berukuran *eurocard*. Sedangkan untuk rak bagian bawah, terdiri dari modul yang telah terpasang dari manufaktur.

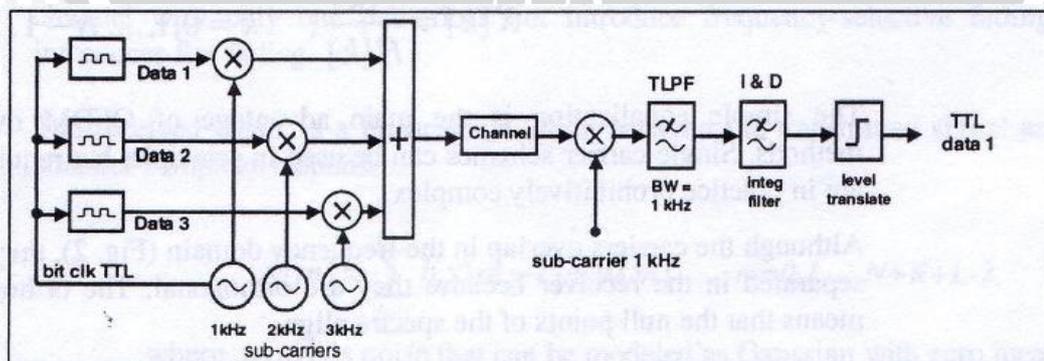


Gambar 2.8 Perangkat Pemodelan Telekomunikasi

2.2.1 Pemodelan OFDM Berbasis TMS

Instruksi pemodelan OFDM dengan menggunakan TMS terdapat pada *user manual*. Instruksi ini terdapat pada “*Communication System Modeling with EMONA TMS Vol. D3: Advanced Digital Experiments*”.

Pemodelan sistem OFDM dalam blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, diperlukan penyesuaian kebutuhan modul-modul tertentu dalam pembangkitannya. Dalam instruksi tersebut, diperoleh penyederhanaan sistem kompleks OFDM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Penyederhanaan ini antara lain: tidak adanya *serial-to-parallel converter* (S/P converter), pembangkitan frekuensi *subcarrier* dilakukan secara manual berdasarkan spektrum frekuensinya agar diperoleh *subcarrier* yang saling *overlapping*, tidak adanya pemberian *guard interval* beserta CP, pemilihan modulasi berbasis pada BPSK, serta demodulasi dapat dilakukan secara independen untuk kanal pertama.

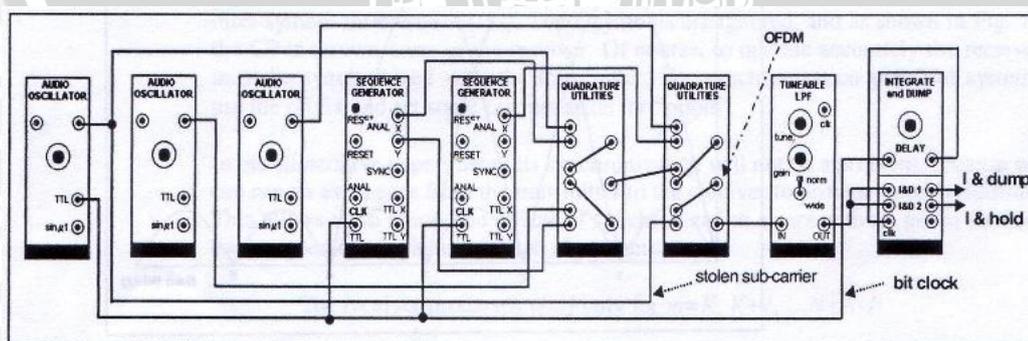


Gambar 2.9 Sistem Blok Diagram dalam Instruksi TMS
(Sumber: *Communication System Modeling with EMONA TMS*)

Penyederhanaan ini dilakukan karena terbatasnya rak atas untuk memodelkan sistem OFDM. S/P *converter* tidak diperlukan karena data acak yang dibangkitkan dapat dilakukan dengan cara membangkitkannya pada masing-masing kanal dengan *clock* yang sama, sehingga periode simbol yang diperoleh adalah sama. Frekuensi *subcarrier* dipilih berdasarkan spektrum frekuensi yang diperoleh, meski telah diberikan dalam instruksi yang ada untuk pemilihan frekuensinya perlu diteliti kembali apakah frekuensi yang diberikan telah terjadi *overlapping*. Tidak adanya ΔG dikarenakan pemodelan tidak terjadi *multipath fading*, sehingga tidak timbul ISI. Modulasi yang digunakan hanya terbatas pada BPSK, karena keterbatasan rak untuk membangkitkan modulasi QPSK ataupun QAM. Proses demodulasi juga dilakukan pada kanal pertama saja. Berdasarkan blok diagram pada Gambar 2.9, maka modul-modul dipasang sesuai Gambar 2.10.

Secara garis besar, kegunaan masing-masing modul tersebut antara lain:

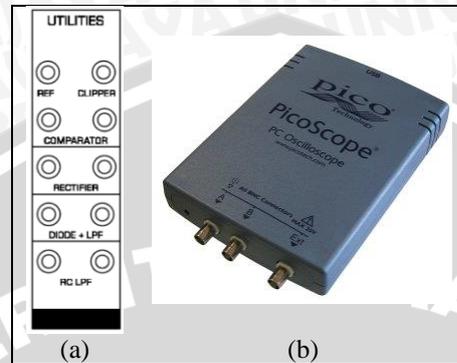
- Audio oscillator*, membangkitkan frekuensi *subcarrier* seperti Persamaan 2-1 dan mengatur periode simbol (T) atau kecepatan data setiap kanal.
- Sequence generator*, membangkitkan data paralel secara acak;
- Quadrature utilities*, mengalikan data paralel dengan sinyal *subcarrier* untuk proses modulasi dan demodulasi serta menambahkan atau *multiplexing* ketiga sinyal termodulasi tersebut untuk menghasilkan sinyal OFDM sesuai dengan Persamaan 2-2.
- Tunable LPF*, menapis sinyal di bawah frekuensi *cut-off* yang dapat ditentukan;
- Integrate and dump*, mengembalikan sinyal informasi dalam bentuk digital dengan proses integral, sehingga didapat hasil integrasi sesuai Persamaan 2-4.



Gambar 2.10 Modul-Modul dalam Instruksi TIMS
(Sumber: *Communication System Modeling with EMONA TIMS*)

Untuk perhitungan BER dan juga spektrum frekuensi, diperlukan perangkat tambahan yang tidak dijelaskan dalam instruksi. Perangkat yang pertama adalah *utilities*, perangkat ini digunakan untuk mengartikan sinyal keluaran hasil integrasi pada *integrate*

and dump dengan membandingkannya terhadap nilai tegangan 0 V sehingga diperoleh sinyal digital dengan *line coding* yang sama dengan *sequence generator* yaitu *non return-to-zero* (NRZ) polar, yaitu dengan tegangan + 5 V dan 0 V. Perangkat yang kedua adalah *PicoScope*, osiloskop digital, yang dapat dihubungkan dengan komputer. Penambahan perangkat yang digunakan, dapat ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Perangkat Tambahan: (a) Modul *Utilities* dan (b) *PicoScope* (Sumber: *TIMS User Manual* dan *PicoScope*)

