

T E S I S

**PENERAPAN EMS PADA RUMAH DENGAN INTEGRASI PV *GRID TIE* DAN
EV MENGGUNAKAN METODE *MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING*
(MILP)**

Disusun dan diajukan oleh:

IAN ADRIAN BUSTANUDDIN

D032191007



PROGRAM PASCA SARJANA

JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

**PENERAPAN EMS PADA RUMAH DENGAN INTEGRASI PV *GRID TIE* DAN
EV MENGGUNAKAN METODE *MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING*
(MILP)**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

**Program studi
Teknik Elektro**

Disusun dan diajukan oleh:

IAN ADRIAN BUSTANUDDIN

Kepada

**PROGRAM PASCA SARJANA
JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2020

TESIS

**PENERAPAN EMS PADA RUMAH DENGAN INTEGRASI PV *GRID TIE*
DAN EV MENGGUNAKAN METODE *MIXED-INTEGER LINEAR*
*PROGRAMMING (MILP)***

Disusun dan diajukan oleh

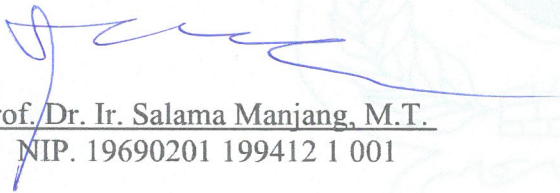
**IAN ADRIAN BUSTANUDDIN
D032191007**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 4 Maret 2021

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T.
NIP. 19690201 199412 1 001



Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP. 19750203 200012 2 002

Ketua Program Studi S2
Teknik Elektro,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, S.T., M.Eng
NIP. 19740530 199903 1 003



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.
NIP. 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ian Adrian Bustanuddin
NIM : D032191007
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya yang berjudul :

PENERAPAN EMS PADA RUMAH DENGAN INTEGRASI PV *GRID TIE* DAN EV MENGGUNAKAN METODE *MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING* (MILP)

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa tesis yang saya tulis ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Februari 2021

g menyatakan

Ian Adrian Bustanuddin

KATA PENGANTAR

Dengan segenap hati penulis panjatkan syukur kepada Allah SWT Yang Maha Kuasa atas segala rahmat, hidayah dan pertolongan-Nya yang telah diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan tesis, yang berjudul “Penerapan EMS Pada Rumah Dengan Integrasi PV *Grid Tie* dan EV Menggunakan Metode *Mixed-Integer Linear Programming (MILP)*” Tak lupa pula shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya.

Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Pascasarjana Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin, Makassar. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Kedua orang tua, istri dan anak yang selalu mendukung dan mendoakan hingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya kepada penulis untuk membimbing, memberikan masukan, motivasi dan berkonsultasi tentang materi dalam tesis ini.
3. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Yusran., S.T., M.T. yang telah memberikan masukan dan saran selama proses penelitian berlangsung.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, S.T., M.Eng. selaku ketua Program Studi S2 Teknik Elektro.
5. Rekan-rekan S2 Teknik Elektro Angkatan 2018 dan 2019.

6. Sege nap dosen dan staf Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah membantu dalam hal keilmuan maupun administrasi pada tahap awal hingga akhir.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis masih jauh dari sempurna, dan di dalam penyelesaiannya masih menemui kesulitan dan hambatan, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut agar dapat bermanfaat.

Akhir kata, penulis tetap mengharapkan saran dan kritik dengan harapan semoga tulisan ini bisa memberikan manfaat kepada seluruh pihak.

Makassar, Februari 2021

Penulis

ABSTRACT

Energy management system is an automation system that collects energy measurement data from consumers in the form of graphic and analysis of energy quality. Thus, resulting efficiency in the use of electrical energy, particularly in the development of smart homes. Also, responding strategy to demand for household consumers and the development of electrical system has encouraged the energy management systems to play an important role in the effectiveness and efficiency of smart homes. Furthermore, the integration of small-scale renewable energy sources, electric vehicles and energy storage systems has become a concern in the last decade. The motivation of this research is the target for the use of renewable energy sources and the use of electric vehicle components in Indonesia. Also, the opportunity to use electric vehicles as storage technology. Thus, this research focuses on modelling energy management systems at homes using a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) framework. In addition, the economic impact of household consumers which using photovoltaic as a small scale renewable energy sources and electric vehicles as a new type of load on households become the main concern of this research. This energy management system shows the ability of electric vehicles to conduct electrical energy transaction such as vehicles supplying energy to the house (V2H) and supplying energy to the utility grid (V2G). This research compares the results of energy management system design in households with normal forms in the electricity consumption from household consumers. Therefore, the result shows 23,2 % reduction in costs.

ABSTRAK

Sistem manajemen energi adalah sistem otomasi yang mengumpulkan data pengukuran energi dari konsumen yang selanjutnya dapat terlihat dalam bentuk grafik dan menganalisis kualitas energi, sehingga terjadinya efisiensi dalam penggunaan energi listrik, terutama dalam pengembangan rumah pintar. Selain itu, strategi respon permintaan pada konsumen rumah tangga dan perkembangan sistem kelistrikan telah mendorong sistem manajemen energi memiliki peran penting dalam efektivitas dan efisiensi rumah pintar. Selanjutnya, integrasi sumber energi terbarukan skala kecil, kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi menjadi perhatian dalam dekade terakhir. Adapun motivasi dalam penyusunan penelitian ini adalah target atas penggunaan sumber energi terbarukan maupun penggunaan komponen kendaraan listrik di Indonesia dan peluang memanfaatkan kendaraan listrik sebagai teknologi penyimpanan. Untuk itu, penelitian ini berfokus pada pemodelan sistem energi manajemen pada rumah tangga dengan menggunakan metode *Mixed-integer linear programming* (MILP). Selain itu, dampak ekonomi dari konsumen rumah tangga dimana penggunaan fotovoltaik sebagai sumber energi terbarukan skala kecil dan kendaraan listrik sebagai jenis beban baru pada rumah tangga juga menjadi perhatian khusus dalam penelitian ini. Sistem manajemen energi pada rumah tangga yang dibuat juga memperlihatkan kemampuan kendaraan listrik yang dapat melakukan transaksi energi listrik seperti kendaraan menyuplai energi ke rumah (V2H) dan menyuplai energi ke jaringan utilitas (V2G). Penelitian ini membandingkan hasil dari penerapan sistem energi manajemen pada rumah tangga dengan pola normal dalam konsumsi listrik dari konsumen rumah tangga. Sehingga hasil yang didapatkan memperlihatkan pengurangan biaya sebesar 23,2%.

DAFTAR ISI

SAMPUL	I
LEMBAR PENGESAHAN	III
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	IV
KATA PENGANTAR	V
ABSTRACT	VII
ABSTRAK	VIII
DAFTAR ISI	IX
DAFTAR TABEL	XI
DAFTAR GAMBAR	XII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	6
1.3. TUJUAN PENELITIAN	6
1.4. MANFAAT PENELITIAN.....	6
1.5. BATASAN MASALAH	7
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1. KENDARAAN LISTRIK.....	15
2.1.1. Kendaraan Listrik <i>Hybrid</i> (HEV).....	17
2.1.2. Kendaraan Listrik <i>Hybrid Plug-in</i> (PHEV).....	18
2.1.3. Full Kendaraan Listrik (FEV)	22
2.2. FOTOVOLTAIK.....	24
2.2.1. Berdiri Sendiri / <i>Off Grid</i>	25
2.2.2. <i>Grid Tie</i>	26
2.2.3. <i>Grid Interactive</i>	28
2.2.4. <i>Grid fallback</i>	29
2.3. ENERGI MANAJEMEN	29
2.3.1. Sistem Manajemen Energi Dan Manajemen Sisi Permintaan.....	30
2.3.2. Efisiensi Energi	33
2.3.3. Pengalihan Sumber Energi	33
2.3.4. Manajemen Beban	33
2.3.5. Respon Permintaan.....	33
2.4. <i>MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING</i>	34
2.5. BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON	41
2.6. PENELITIAN TERKAIT	42
2.7. STATE OF THE ART	45
2.7. KERANGKA PIKIR	49

BAB III METODE PENELITIAN.....	50
1.1. JENIS PENELITIAN	50
1.2. WAKTU DAN LOKASI PENELITIAN	50
1.3. METODE ANALISIS	50
1.4. INSTRUMENTASI PENELITIAN	51
1.5. DATA DAN PEMODELAN.....	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	64
4.1. ANALISA HASIL PENGGUNAAN KENDARAAN LISTRIK	64
4.2. ANALISA HASIL DARI INTEGRASI FOTOVOLTAIK	68
4.3. ANALISA HASIL PERBANDINGAN STUDI KASUS	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	90
5.1. KESIMPULAN	90
5.2. SARAN	92
DAFTAR PUSTAKA.....	93
LAMPIRAN	98

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Terminologi manajemen energi	29
Tabel 2.2. State of The Art.....	46
Tabel 3.1. Rata-rata beban dari rumah tangga tanpa kendaraan listrik di hari kerja.....	54
Tabel 3.2. Rata-rata beban dari rumah tangga tanpa kendaraan listrik di akhir pekan	54
Tabel 3.3. Nilai parameter dari kendaraan listrik.....	57
Tabel 3.4. Energi Produksi PV 2 kWp selama satu tahun.	57
Tabel 3.5. Harga pembelian dan penjualan energi.....	60
Tabel 4.1. Hasil integrasi kendaraan listrik pada hari kerja	65
Tabel 4.2. Hasil integrasi kendaraan listrik pada akhir pekan	66
Tabel 4.3. Aliran energi listrik dari fotovoltaik pada hari kerja.....	69
Tabel 4.4. Aliran energi listrik dari fotovoltaik pada akhir pekan	70
Tabel 4.5. Hasil jumlah tagihan listrik pada rumah tangga dengan sistem HEM.....	80
Tabel 4.6. Hasil HEM dengan integrasi PV dan EV dihari kerja (kW).....	81
Tabel 4.7. Hasil HEM dengan integrasi PV dan EV di akhir pekan (kW)	82
Tabel 4.8. Perbandingan studi kasus	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Modifikasi jaringan distribusi bus IEEE 37 (Kumar, 2016).	13
Gambar 2.2.	Pengelompokan Transportasi (MI, 2018).	16
Gambar 2.3.	Arsitektur dari jenis kendaraan listrik hybrid.....	18
Gambar 2.4.	Arsitektur dari jenis Kendaraan listrik Hybrid Plug-in.	21
Gambar 2.5.	Klasifikasi tipe kendaraan listrik.....	22
Gambar 2.6.	Diagram blok fotovoltaik berdiri sendiri.....	25
Gambar 2.7.	Diagram blok fotovoltaik grid tie menggunakan inverter terpusat.	26
Gambar 2.8.	Diagram blok fotovoltaik grid tie menggunakan mikro inverter.	27
Gambar 2.9.	Diagram blok fotovoltaik interative	28
Gambar 2.10.	Diagram blok dari sistem manajemen energi untuk rumah tangga.	32
Gambar 2.11.	peringkat bahasa pemrograman menurut IEEE. (IEEE Spectrum).	42
Gambar 2.12.	Kerangka Pikir	49
Gambar 3.1.	Flowchart alur penelitian.....	63
Gambar 4.1.	Kurva rata-rata produksi PV	68
Gambar 4.2.	Diagram kebutuhan listrik rumah tangga pada hari kerja	74
Gambar 4.3.	Diagram kebutuhan listrik rumah tangga pada akhir pekan.....	74
Gambar 4.4.	Diagram beban rumah tangga yang mengisi EV saat tiba di rumah pada hari kerja.....	75
Gambar 4.5.	Diagram beban rumah tangga yang mengisi EV saat tiba di rumah pada ahhir pekan.	75
Gambar 4.6.	Diagram beban rumah tangga yang mengisi EV LWBP pada hari kerja....	76
Gambar 4.7.	Diagram beban rumah tangga yang mengisi EV LWBP pada akhir pekan.76	
Gambar 4.8.	Diagram beban rumah tangga dengan strategi HEM yang diusulkan pada hari kerja.....	78
Gambar 4.9.	Status energi baterai EV untuk konsumen dengan strategi HEM pada hari kerja.....	78
Gambar 4.10.	Diagram beban rumah tangga dengan strategi HEM yang diusulkan pada akhir pekan.	79
Gambar 4.11.	Status energi baterai EV untuk konsumen dengan strategi HEM pada akhir pekan.	80
Gambar 4.12.	Tampilan pada saat program berjalan	89

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Beberapa tahun terakhir, studi tentang peningkatan efisiensi dan efektivitas penggunaan energi telah menjadi perhatian utama di seluruh dunia karena beberapa alasan. Hal tersebut terlihat dari kebutuhan listrik rumah tangga yang setiap tahun terus meningkat dan menjadi sektor yang mendominasi dari konsumsi listrik di dunia. Namun, kekhawatiran tentang perubahan iklim yang berasal dari peningkatan emisi seperti CO² telah memicu transisi ke sistem energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Di banyak negara, tujuan tersebut telah tertuang dalam bentuk aturan seperti target yang ditetapkan oleh pemerintah Republik Indonesia yang diputuskan melalui peraturan presiden tentang rencana umum energi nasional. Adapun beberapa pokok utama dari aturan tersebut adalah target penggunaan pembangkit energi baru terbarukan mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (Perpres no 22, 2017).

Selain itu, aturan tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai yang tertuang dalam aturan presiden, dimana aturan tersebut memberikan target penggunaan komponen kendaraan listrik. Adapun target tersebut meliputi penggunaan komponen kendaraan listrik roda dua dan tiga sebesar 80% pada tahun 2026 dan kendaraan listrik roda empat sebesar 80% pada tahun 2030. Beberapa alasan pemerintah Indonesia membuat aturan tersebut adalah untuk peningkatan efisiensi energi, ketahanan energi, dan konservasi energi sektor transportasi, dan terwujudnya energi bersih, kualitas udara bersih dan ramah lingkungan, serta komitmen Indonesia menurunkan emisi gas rumah kaca (Perpres no 55, 2019).

Disisi lain, total produksi listrik pada tahun 2018 yang mencapai 283,8 TWh, pembangkit energi baru terbarukan hanya memiliki peran sebesar 13%, sedangkan PLTU batubara masih mendominasi dengan persentase produksi sebesar 58% (DEN, 2019). Melihat penjelasan sebelumnya, maka konsep baru telah dirancang dan diusulkan untuk memenuhi target tersebut. Misalnya perubahan besar dalam mengurangi emisi gas dengan meningkatkan produksi energi bersih dari pembangkit energi baru terbarukan skala kecil dan melibatkan konsumen agar lebih aktif terlibat untuk mengontrol pola konsumsi energi listrik.

Di berbagai penelitian, tujuan dan permasalahan peningkatan produksi energi bersih dapat diselesaikan dengan konsep *smart grid* (Vineetha, 2014), dimana konsep tersebut menjadi perhatian dalam dekade terakhir. *smart grid* adalah jaringan listrik yang memungkinkan aliran listrik maupun data memiliki kemampuan dua arah, dan kemampuan melakukan kontrol jarak jauh. Disisi lain, pemerintah indonesia telah membuat aturan perihal transaksi dua arah antara utilitas dalam hal ini PT. PLN dan konsumen akhir dalam hal ini rumah tangga dan bangunan perkantoran. Aturan tersebut tertuang dalam peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Republik Indonesia nomor 49 tahun 2018 tentang penggunaan sistem pembangkit tenaga surya atap oleh konsumen PT. Perusahaan Listrik Negara. Adapun latar belakang dari aturan ini adalah percepatan peningkatan pemanfaatan energi baru dan energi terbarukan sesuai target kebijakan energi nasional. Dimana pembahasan pokok utama yang mengatur transaksi energi listrik dua arah menjelaskan bahwa kapasitas fotovoltaik yang dipasang adalah 100% dari daya tersambung konsumen PT. PLN. Selain itu, total penjualan energi ke pihak utilitas dikali 65% dari harga beli listrik (Permen ESDM no 49, 2018).

Dari beberapa aturan yang telah disebutkan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa perkembangan sistem tenaga listrik di Indonesia akan mengalami perubahan yang

signifikan, seperti perubahan penggunaan kendaraan berbahan fosil ke kendaraan listrik, penggunaan pembangkit energi baru terbarukan skala kecil di rumah tangga maupun gedung-gedung perkantoran dan terakhir kemampuan transaksi dua arah antara utilitas dan konsumen, sehingga mendorong perubahan konsumen menjadi prosumer. Selanjutnya, perkembangan sistem *smart grid* telah mendorong peningkatan penggunaan kendaraan listrik sebagai jenis beban baru pada sistem distribusi dan diharapkan memiliki peran penting dalam mengurangi penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil (Liu, 2013). Selain kendaraan listrik, penelitian tentang penggunaan sumber energi baru terbarukan skala kecil seperti fotovoltaik telah dilakukan dan terbukti dapat meminimalkan total biaya energi harian dengan mengintegrasikan kendaraan listrik sebagai teknologi penyimpanan energi (Kobashi, 2019).

Perilaku konsumen rumah tangga dalam sistem *smart grid* umumnya berfokus pada strategi respons permintaan (DR) yang memberikan peluang terjadinya interaksi dua arah antara utilitas dan konsumen akhir. Dimana strategi respon permintaan akan mendorong konsumen untuk lebih terlibat dalam sistem energi listrik sehingga konsumen mengetahui manfaat perubahan kebutuhan energi pada waktu tertentu. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Worighi, *et al*, menjelaskan bahwa konsumen akhir khususnya rumah tangga tidak melakukan perubahan ke arah penggunaan energi listrik yang lebih efisien dikarenakan masyarakat merasa tidak terlibat dan tidak mengetahui manfaat dari perubahan konsumsi energi listrik (Worighi, 2019).

Di sisi lain, Departemen Energi AS telah mendefinisikan respons permintaan sebagai perubahan dalam penggunaan listrik oleh konsumen akhir dari pola konsumsi normal menjadi responsif terhadap perubahan harga listrik secara *real time* atau pembayaran insentif. Hal ini dirancang untuk mendorong penggunaan listrik yang lebih rendah pada saat harga listrik tinggi atau ketika sistem jaringan listrik terancam (Lee, 2014).

Namun, konsep respon permintaan dinilai kurang memadai karena minimnya infrastruktur komunikasi untuk jaringan listrik. Selanjutnya, konsumen hanya memiliki sedikit waktu untuk mengatur konsumsi listrik rumah tangga pada jam tertentu dengan alasan untuk menghemat pengeluaran biaya listrik harian. Dari alasan tersebut dibutuhkannya sistem otomasi seperti sistem manajemen energi untuk menyelesaikan masalah pada penerapan strategi respon permintaan. Pada jurnal yang menganalisis sistem manajemen energi pada rumah tangga (HEM) menjelaskan bahwa HEM memberikan dampak yang lebih efisien pada sistem tenaga listrik, seperti berkurangnya permintaan selama jam sibuk atau waktu beban puncak (Beaudin, 2014). Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa sistem manajemen energi pada rumah tangga merupakan strategi yang dapat mengatur penggunaan listrik konsumen seperti menggeser waktu penggunaan peralatan listrik, membatasi penggunaan listrik, dan meminimalkan biaya konsumsi listrik.

Dalam artikel yang disebutkan sebelumnya juga menyebutkan bahwa sistem manajemen energi pada rumah tangga memiliki dampak pada pengurangan biaya listrik sebesar 23,1% atau penurunan permintaan sebesar 29,6% pada saat waktu beban puncak (Beaudin, 2014). Melihat penjelasan dari penelitian tersebut maka dapat diambil kesimpulan bahwa sistem manajemen energi pada rumah tangga memiliki peran penting dalam sistem kelistrikan. Hal ini ditambah dengan fakta bahwa beban rumah tangga sebagai konsumen akhir memiliki peran sebesar 40% dari konsumsi listrik global (Bakirtzis, 2015). Sehingga penerapan sistem manajemen energi pada rumah tangga akan memberikan pengaruh yang signifikan dalam pola konsumsi energi listrik global.

Secara umum sistem manajemen energi pada rumah tangga membantu pihak utilitas mengirimkan data harga listrik atau informasi secara *real time* kepada konsumen rumah tangga melalui perangkat elektronik yang disebut dengan *smart meter* sehingga konsumen dapat menggunakan peralatan rumah tangga secara efektif. Selain itu utilitas juga dapat

mengontrol pengelolaan energi rumah tangga untuk mencegah penggunaan listrik yang berlebihan selama waktu beban puncak.

Beberapa penelitian untuk pemodelan sistem manajemen energi pada rumah tangga dilakukan oleh Mahmoud Elkazaz, *et al*, merancang sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan tujuan mengurangi biaya konsumsi energi listrik harian dengan memaksimalkan konsumsi pembangkit energi baru terbarukan skala kecil berupa fotovoltaiik. Selain itu, peningkatkan manfaat pelanggan melalui pengelolaan pengoperasian teknologi penyimpanan energi pada rumah tangga juga diterapkan. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan kemampuan metodologi yang diusulkan dapat mencapai pengurangan tagihan listrik rumah tangga hingga 32% selama satu tahun dan konsumsi fotovoltaiik mencapai 87% dari total konsumsi listrik selama satu tahun (Elkazaz, 2019). Penelitian lainya oleh Muhammad Muzaffar, *et al*, memodelkan sistem manajemen energi pada rumah tangga menggunakan teknik Algoritma genetika dengan integrasi fotovoltaiik dan teknologi penyimpanan energi. Dimana hasil yang didapatkan konsumen rumah tangga dapat memperoleh keuntungan per hari 49,15%, 52,31%, 58,93% dan 68,8% dari berdasarkan masing-masing kasus dasar.

Dari pemaparan sebelumnya maka penelitian yang dilakukan bertujuan merancang sistem manajemen energi pada rumah tangga yang merupakan bagian pendukung dari *smart grid* dengan menggunakan metode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP). Sebuah analisis komparatif dari literatur tentang sistem manajemen energi pada rumah tangga digunakan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Selanjutnya, fokus penelitian adalah analisis dan perancangan sistem manajemen energi dengan mengintegrasikan sistem Rooftop dan kendaraan listrik. Adapun analisis yang dilakukan bertujuan untuk dapat diterapkan di Indonesia tepatnya kota Makassar dengan mempertimbangan literatur integrasi rumah dengan fotovoltaiik jenis grid tie dan kendaraan listrik, baik dari sisi teknis

dan ekonomi. Hal ini dimaksudkan agar konsumen rumah tangga kedepannya memiliki dampak positif pada lingkungan, ekonomi, dan sosial. Maka dari itu kami membuat penelitian dengan judul **“Penerapan EMS Pada Rumah Dengan Integrasi PV *Grid Tie* Dan EV Menggunakan Metode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP)”**

1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang diatas maka didapatkan permasalahan sebagai berikut

1. Bagaimana memodelkan sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan mengintegrasikan fotovoltaik jenis grid tie dan kendaraan listrik?
2. Bagaimana mengevaluasi dampak pada saat memanfaatkan sistem fotovoltaik jenis grid tie dan teknologi penyimpanan dari kendaraan listrik?
3. Bagaimana menganalisis penggunaan kendaraan listrik dalam melakukan perjalanan sebagai alat transportasi dan sumber energi alternatif / teknologi penyimpanan?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan sistem manajemen energi rumah tangga dengan integrasi fotovoltaik jenis grid tie dan Kendaraan Listrik.
2. Membuat evaluasi dampak dari pemanfaatan fotovoltaik jenis grid tie dan teknologi penyimpanan dari kendaraan listrik.
3. Menganalisis penggunaan kendaraan listrik dalam melakukan perjalanan sebagai alat transportasi dan sebagai sumber energi alternatif / teknologi penyimpanan.

1.4. MANFAAT PENELITIAN

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini diantaranya sebagai berikut:

1. Memberikan sumbangsih kepada akademisi maupun praktisi mengenai strategi manajemen energi pada rumah tangga dengan memanfaatkan PV dan EV.
2. Sebagai bahan referensi bagi para peneliti yang ingin meneliti dengan topik serupa.
3. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran tentang dampak dari pemanfaatan PV dan EV pada rumah tangga.

1.5. BATASAN MASALAH

Agar penelitian ini dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran yang diinginkan maka penelitian dibatasi pada:

1. Pemodelan dalam penelitian ini dibatasi hanya pada pemanfaatan sistem fotovoltaik jenis grid tie dan sumber energi dari pembangkit utilitas.
2. Analisis sistem manajemen energi dengan mengintegrasikan PV dan EV menggunakan pemodelan *Mixed-Integer Linear Programming (MILP)*.
3. Menggunakan jenis *EV Plug-in* dengan mempertimbangkan penelitian terkait
4. Rumah tanpa teknologi penyimpanan
5. Pemodelan yang dilakukan di software spyder v4.0.1 dengan gurobi v.9.1.0 sebagai *problem solve*
6. Bahasa pemograman yang digunakan adalah python 3 dengan tambahan modul-modul python yang sudah ada.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang penelitian mengenai sistem manajemen energi pada rumah tangga menggunakan berbagai metode dan tujuan, rumusan

masalah, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari tesis ini.

Bab II TINJAUAN PUSTAKA

Bab II berisi penjelasan tentang landasan teori yang digunakan dalam penelitian dan kerangka pemikiran. Selanjutnya, diuraikan tentang penelitian terkait yang berisi penjelasan tentang hasil-hasil penelitian yang menjadi acuan penelitian yang akan dilakukan. Landasan teori seperti buku, artikel, berita, jurnal, prosiding, dan tulisan asli lainnya untuk mengetahui perkembangan penelitian yang relevan dengan judul atau tema penelitian yang dilakukan dan juga sebagai arahan dalam memecahkan masalah yang diteliti. Kerangka pikir juga diuraikan dalam bab ini yang berisi penjelasan untuk memecahkan masalah yang sedang diteliti, termasuk menguraikan objek penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III ini merupakan penjelasan tentang tahapan penelitian dimulai dari pemodelan sistem manajemen energi pada rumah tangga, penentuan jenis pembangkit yang digunakan, penentuan jenis kendaraan listrik yang digunakan dan pengukuran output keseluruhan sistem yang kemudian dilakukan analisis sesuai rumusan masalah yang ada secara terperinci.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini menjelaskan tentang hasil dan pembahasan penelitian serta implikasi dari penelitian yang dilakukan. Simulasi dari rancangan sistem manajemen energi pada rumah tangga dilakukan menggunakan software spyder v.4.0.1 dengan *problem solve* gurobi v.9.1.0. Hasil yang diperoleh merupakan parameter-parameter sistem manajemen energi pada rumah tangga yang telah didesain dan dioptimalisasi. Analisis dari hasil penelitian serta pengujian kinerja dari program yang dibuat juga dibahas pada bab ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V ini berisi ringkasan temuan, rangkuman kesimpulan dan saran. Kesimpulan merupakan pernyataan secara general atau spesifik yang berisi hal-hal penting dan menjadi temuan penelitian yang bersumber pada hasil dan pembahasan. Saran merupakan pernyataan atau rekomendasi peneliti yang berisi hal-hal penting sebagaimana yang telah disampaikan

Daftar Pustaka

Lampiran

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Ada beberapa penelitian yang berkaitan dengan metode optimasi pada rancangan sistem manajemen energi pada rumah tangga, seperti *game theory* dan pendekatan *model predictive control* (MPC) dimana penerapan pengisian kendaraan listrik secara optimal dibuat pada rumah tangga dengan integrasi fotovoltaik. *Game theory* adalah cabang matematika terapan yang menggunakan sistem untuk menganalisis situasi di mana pihak-pihak yang disebut pemain membuat keputusan yang saling bergantung atau berhubungan. Saling ketergantungan ini, menyebabkan setiap pemain mempertimbangkan kemungkinan keputusan atau strategi pemain lain dalam merumuskan strategi. Solusi untuk permainan menggambarkan keputusan optimal dari para pemain (Lunden, 2013). *Game theory* sendiri pertama kali dibuat untuk memecahkan masalah dibidang ekonomi.

Sedangkan, *model predictive control* menggunakan model sistem untuk membuat prediksi tentang perilaku sistem dimasa mendatang. MPC dibuat menggunakan algoritma pengoptimalan yang bersifat *online* untuk menemukan tindakan kontrol optimal sehingga mendorong keluaran yang diprediksi atau sebagai bahan pertimbangan sebelum kontrol terjadi. Selanjutnya, *model predictive control* sering juga disebut sebagai *the moving horizon control* atau *the receding horizon control*. Latar belakang dari pendekatan ini dapat dijelaskan dengan menggunakan contoh mengemudi mobil. Dimana pengemudi melihat jalan di depannya dan mempertimbangkan keadaan saat ini dan tindakan sebelumnya, sehingga akan menghasilkan prediksi tindakannya hingga jarak tertentu, yang disebut sebagai *the prediction horizon* (Young-min, 2013).

Penelitian selanjutnya adalah optimasi dari pengaturan sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan menggunakan pendekatan *rolling horizon* yang memiliki tujuan

memaksimalkan penggunaan fotovoltaik dan sistem penyimpanan energi sehingga dapat menentukan tindakan dari optimasi manajemen energi listrik pada rumah tangga (Elkazaz, 2019). Secara umum, metode *rolling-horizon* memiliki tujuan mengoptimalkan jadwal operasi sistem manajemen energi dengan komponen tertentu dengan mempertimbangkan beban variabel waktu, tarif, dan serta insentif fiskal tahunan.

Selanjutnya, pemodelan area perumahan dengan masing-masing rumah terintegrasi fotovoltaik, pembangkit listrik tenaga angin skala kecil, teknologi penyimpanan energi listrik, dan kendaraan listrik dengan kemampuan kendaraan menyuplai listrik ke jaringan dijelaskan melalui penyelesaian MILP oleh F. Y. Melhem, *et al.* Model MILP digunakan pada penelitian tersebut untuk mengoptimalkan produksi energi dan sistem konsumsi rumah tangga pada area perumahan. Sehingga keputusan peran dari integrasi pembangkit energi baru terbarukan, teknologi penyimpanan, dan sistem V2G dapat terlihat dengan hasil optimal. Selain itu, tambahan algoritma berbasis teknik heuristik diimplementasikan untuk mengurangi waktu komputasi dan meminimalkan biaya listrik konsumen. Sehingga menghasilkan tiga studi kasus berdasarkan jangka waktu 24, 96, dan 168 jam yang dimodelkan dengan berbagai faktor penting. Selanjutnya, penelitian menunjukkan solusi optimal selama beberapa hari berturut-turut dengan pengurangan konsumsi energi listrik pada waktu tertentu dan mencapai pengurangan biaya energi yang signifikan (Melhem, 2017).

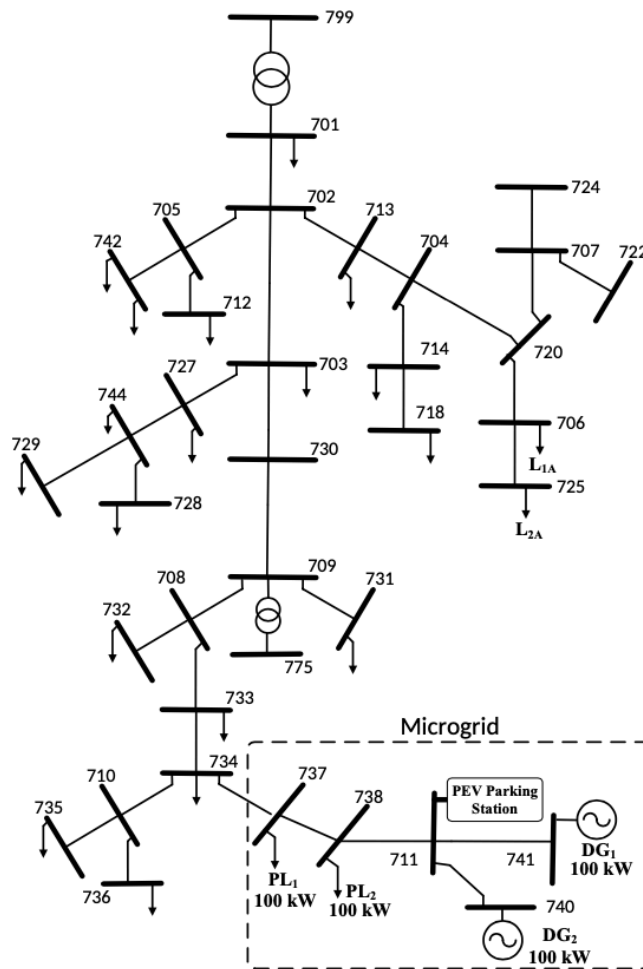
Penelitian berikutnya oleh A. G. Bakirtzis, *et al.*, pemodelan sistem manajemen energi pada rumah tangga dibuat dengan menggunakan teknik *mixed-integer linear programming* yang selanjutnya, pembangkit energi baru terbarukan skala kecil dan teknologi penyimpanan ditambahkan. Tujuan dari penelitian tersebut adalah mengetahui ukuran fotovoltaik dan teknologi penyimpanan yang akan dipasang dirumah dengan mendapatkan dampak ekonomi yang efisien. Selain itu, biaya penyusutan dari fotovoltaik

dan teknologi penyimpanan juga dibahas dalam penelitian tersebut yang kemudian digunakan sebagai pertimbangan keuntungan dari sistem manajemen energi pada rumah yang dibuat. Selanjutnya, keputusan untuk menambah kapasitas dari fotovoltaik dan teknologi penyimpanan juga dibahas (Bakirtzis, 2015). Penelitian berikutnya adalah penjadwalan beban rumah tangga yang dapat dikontrol atau tidak dan dihitung setiap jam dengan mempertimbangkan teknologi penyimpanan dan pembangkit energi baru terbarukan (Paterakis, 2015). Selanjutnya, penerapan transaksi energi dua arah dan optimalisasi lingkungan rumah tangga dengan tujuan meminimalkan biaya energi listrik dianalisis dengan MILP (Erdinç, 2016).

penelitian dengan metode *stochastic dynamic programming* (SDP) dibahas oleh Xiaohua Wu, et al, penelitian ini fokus terhadap sistem manajemen energi yang bersifat stokastik atau variabel yang berubah-ubah pada rumah tangga pintar dengan tambahan teknologi penyimpanan energi, kendaraan listrik dan fotovoltaik. Adapun tujuan utama dari penelitian adalah meminimalkan biaya energi konsumen dengan harga yang bersifat dinamis atau berubah-ubah setiap waktu, memenuhi permintaan listrik rumah tangga, melakukan pengisian kendaraan listrik, dan mempertimbangkan ketidakpastian dari produksi fotovoltaik. Variabel utama dalam penelitian ini adalah perbandingan dua kendaraan listrik dengan menggunakan sistem manajemen energi yang dibuat. Selanjutnya, terlihat efisiensi sebesar 493,6% dan 175,89% dari kedua kendaraan listrik yang digunakan (Wu, 2016).

Dalam sistem tenaga listrik moderen, *plug-in electric vehicle* (PEV) dengan potensi *Vehicle to Grid* (V2G) atau kemampuan kendaraan menyuplai ke jaringan utilitas menjadi sumber energi yang fleksibel untuk penyeimbangan energi dalam berbagai skenario pasokan dan permintaan energi. Dalam paradigma yang berkembang saat ini, merancang strategi manajemen energi untuk memanfaatkan V2G yang layak dan hemat biaya adalah salah satu

dari beberapa tantangan yang dihadapi oleh utilitas. Kemampuan kendaraan menyuplai ke jaringan utilitas merupakan salah satu poin yang akan dibahas dalam penelitian ini. Adapun penelitian yang membahas V2G adalah H. S. V. S. Kumar Nunna, *et al*, penelitian tersebut mengusulkan dua strategi manajemen energi untuk memanfaatkan kemampuan kendaraan menyuplai ke jaringan dari *plug-in electric vehicle* (PEV) dalam mengelola ketidakseimbangan energi di jaringan distribusi. Selanjutnya, metode yang digunakan adalah *multi agent system* (MAS), sehingga mendapatkan hasil keterlibatan kendaraan listrik di jaringan distribusi dalam hal ini sebagai sumber energi alternatif yang juga dianggap layak secara ekonomis. Selain itu, dalam penelitian menggunakan sistem bus IEEE-37 yang dimodifikasi dengan kendaraan listrik sebagai studi kasus dan ditunjukkan pada gambar 2.1 (Kumar, 2016).



Gambar 2.1. Modifikasi jaringan distribusi bus IEEE 37 (Kumar, 2016).

Selain kemampuan *vehicle to grid* (V2G), kendaraan listrik juga memiliki kemampuan yaitu *vehicle to home* (V2H) dimana kendaraan listrik dapat memenuhi permintaan energi dari rumah tangga. Kemampuan ini dinilai efektif dikarenakan kendaraan dapat menyuplai energi ke rumah di kondisi jaringan utilitas sementara terancam atau pada periode beban puncak. penelitian yang khusus membahas sistem kendaraan ke rumah dilakukan oleh Chenxi Li, *et al*, pemodelan sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan mempertimbangkan penetrasi teknologi kendaraan ke rumah. Sistem yang diusulkan secara optimal menjadwalkan kendaraan listrik yang disambungkan bersama dengan peralatan rumah tangga yang dioperasikan secara otomatis. Algoritma berbasis heuristik digunakan, yaitu *Natural Aggregation Algorithm* (NAA) untuk menyelesaikan model sistem manajemen energi pada rumah tangga. Hasil simulasi menunjukkan bahwa teknologi V2H dapat secara signifikan mengurangi biaya energi rumah tangga (Li, 2017).

Penelitian yang telah disebutkan sebelumnya telah memberikan kontribusi yang berharga bagi pengembangan sistem manajemen energi di wilayah rumah tangga. Namun, studi untuk mengevaluasi efisiensi sumber energi terbarukan seperti fotovoltaik pada musim hujan atau sepanjang tahun merupakan tambahan pada penelitian ini. Beberapa penelitian sebelumnya juga memiliki tujuan dan metode yang berbeda dengan penelitian yang akan dilakukan. Selain itu, beberapa penelitian yang telah dibahas sebelumnya hanya bertujuan untuk mengevaluasi potensi teknologi rumah pintar, sistem kendali manajemen energi dengan mempertimbangkan beban rumah tangga, pembangkit energi baru terbarukan, dan pola mobilitas kendaraan listrik yang semuanya dievaluasi dalam waktu 24 jam atau sehari. Beberapa penelitian lainya juga hanya melakukan analisis pada harga listrik yang bersifat dinamis. Sehingga evaluasi sistem manajemen energi pada rumah dengan kondisi harga listrik yang bersifat konstan belum dilakukan. Memanfaatkan baterai kendaraan listrik sebagai teknologi penyimpanan yang dimodelkan menggunakan *mixed-integer linear*

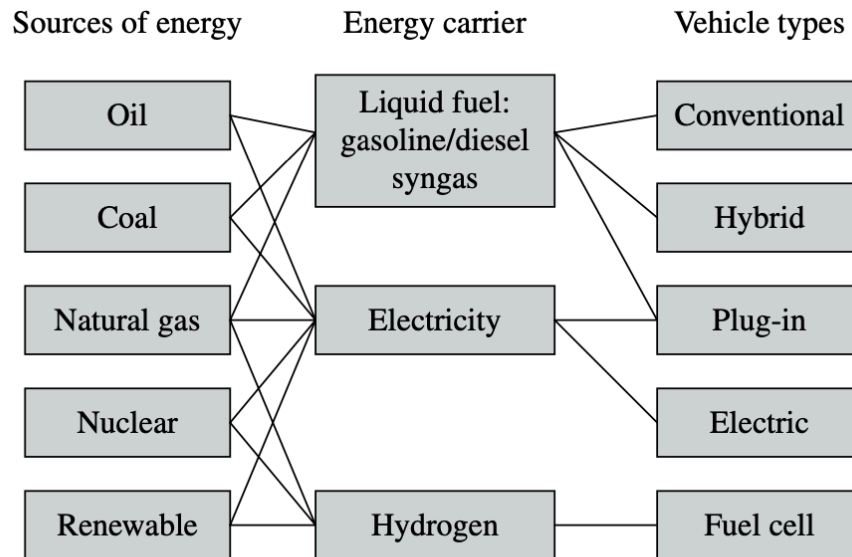
programming menjadi pokok pembahasan tambahan dari penelitian yang dilakukan. Selanjutnya, penelitian ini mempertimbangkan dampak ekonomi dari rancangan sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan menggunakan fotovoltaik dan memanfaatkan kendaraan listrik sebagai pengganti penyimpanan energi listrik rumah tangga. Di sisi lain, perhitungan sistem pengelolaan energi rumah tangga di negara berkembang seperti Indonesia yang hanya memiliki dua musim dalam setahun belum diperhitungkan dalam penelitian yang ada.

2.1. KENDARAAN LISTRIK

Keprihatinan yang meningkat atas penggunaan bahan bakar berbasis fosil memotivasi aktivitas yang intens untuk mencari sistem transportasi alternatif. Selain itu, tekanan regulasi untuk mengurangi polusi perkotaan, emisi CO² dan kebisingan kota telah membuat kendaraan listrik menjadi pilihan yang sangat menarik sebagai alternatif untuk mesin pembakaran internal. Pada dasarnya kendaraan Listrik adalah kendaraan yang tidak hanya bergantung pada *Internal Combustion Engine* (ICE) sebagai satu-satunya mekanisme penggerak, melainkan menggunakan sistem penggerak listrik sebagai pengganti atau untuk meningkatkan ICE (Crisostomi, 2018).

Selain itu, energi yang tersedia dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu energi terbarukan, energi tak terbarukan berbasis bahan bakar fosfat, dan energi nuklir. Energi terbarukan meliputi tenaga air, matahari, angin, laut, panas bumi, biomassa, dan sebagainya. Energi tak terbarukan termasuk batu bara, minyak, dan gas alam. Energi nuklir meskipun melimpah namun, tidak dapat diperbarui karena sumber daya uranium dan elemen radioaktif lainnya terbatas di Bumi. Selain itu, ada kekhawatiran mengenai keselamatan nuklir, seperti kecelakaan di Jepang akibat gempa dan tsunami dan pengolahan limbah nuklir dalam jangka panjang masih menjadi masalah. Energi biomassa dapat diperbarui karena dapat berasal dari kayu, tanaman, selulosa, dan sampah. Listrik dan hidrogen adalah bentuk energi sekunder.

kedua sumber tersebut dapat dihasilkan dengan menggunakan berbagai sumber energi, termasuk energi terbarukan dan tak terbarukan. Bensin dan solar adalah contoh kelompok energi yang berasal dari bahan bakar fosil.



Gambar 2.2. Pengelompokan Transportasi (MI, 2018).

Gambar 2.2 menunjukkan berbagai jenis sumber energi, turunan dari sumber energi, dan kendaraan. Kendaraan konvensional berbahan bakar bensin / solar mengandalkan bahan bakar cair yang hanya dapat diperoleh dari bahan bakar fosil. Kendaraan Listrik Hybrid, meski lebih efisien dan mengonsumsi lebih sedikit bahan bakar daripada kendaraan konvensional, kendaraan listrik *hybrid* masih mengandalkan bahan bakar fosil sebagai energi utama. Oleh karena itu, baik mobil konvensional maupun kendaraan listrik *hybrid* tidak berkelanjutan dan ramah lingkungan. Kendaraan listrik dan kendaraan *fuel cell* masing-masing mengandalkan listrik dan hidrogen. Baik listrik dan hidrogen dapat dihasilkan dari sumber energi terbarukan, oleh karena itu kedua jenis kendaraan tersebut dikategorikan berkelanjutan dan ramah lingkungan selama hanya sumber energi terbarukan yang digunakan untuk tujuan tersebut. Sedangkan kendaraan listrik *hybrid plug-in*, meskipun tidak sepenuhnya berkelanjutan, kendaraan ini menawarkan keunggulan

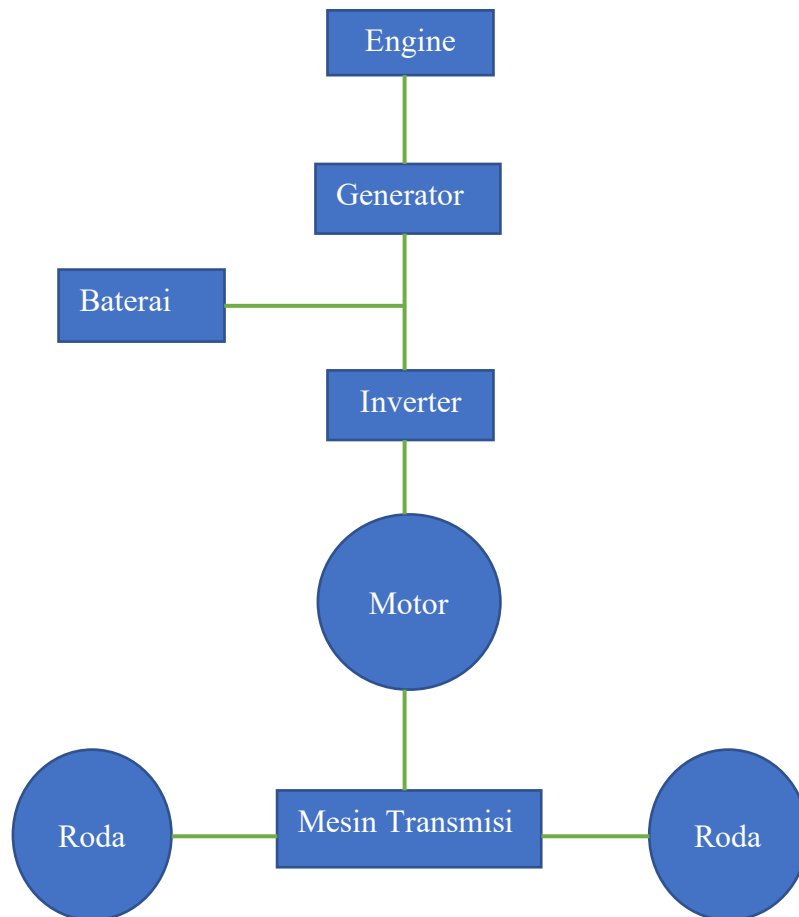
kendaraan konvensional dan kendaraan listrik pada saat yang bersamaan. kendaraan listrik *hybrid plug-in* dapat menggantikan penggunaan bahan bakar fosil dengan menggunakan listrik jaringan utilitas. Kendaraan ini bukanlah solusi akhir untuk keberlanjutan dan ramah lingkungan tetapi kendaraan listrik *hybrid plug-in* membangun jalur menuju keberlanjutan dan ramah lingkungan di masa depan (MI, 2018) . Secara umum ada tiga jenis kendaraan listrik, yaitu: Kendaraan listrik hybrid, kendaraan listrik *hybrid plug-in* dan Full Kendaraan Listrik (MI, 2018).

2.1.1. Kendaraan Listrik *Hybrid* (HEV)

Pada dasarnya kendaraan listrik *hybrid* menggabungkan ICE dan motor listrik sebagai penggerak. Sebagian besar motor listrik mendukung ICE untuk penghematan bahan bakar yang selanjutnya mendorong mesin pembakaran atau penggerak listrik pada kendaraan (Crisostomi, 2018). Pada jenis HEV bahan bakar cair masih menjadi sumber energi untuk beroperasi.

Pada umumnya, ICE adalah konverter daya utama yang menyediakan semua energi untuk kendaraan. Motor listrik meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi konsumsi bahan bakar dengan memulihkan energi kinetik selama pengereman regeneratif, dan mengoptimalkan pengoperasian ICE selama mengemudi normal dengan menyesuaikan torsi dan kecepatan mesin. ICE membantu kendaraan dengan jarak tempuh yang lebih jauh sehingga mengatasi kerugian dari kendaraan listrik. Dalam jenis HEV, ICE menggerakkan generator yang disebut I/G, dimana I/G adalah kemampuan ICE mengubah energi dalam bahan bakar cair menjadi energi mekanik dan generator mengubah energi mekanik dari keluaran mesin menjadi listrik. Selanjutnya, motor listrik akan menggerakkan kendaraan menggunakan listrik yang dihasilkan oleh perangkat I/G. Motor listrik ini juga digunakan untuk mendapatkan energi kinetik saat pengereman terjadi. Dimana terdapat baterai antara

generator dan motor listrik untuk mendapatkan energi listrik antara I/G dan motor (MI, 2018).



Gambar 2.3. Arsitektur dari jenis kendaraan listrik *hybrid*.

2.1.2. Kendaraan Listrik *Hybrid Plug-in* (PHEV)

PHEV adalah kendaraan yang dilengkapi dengan baterai yang lebih besar dibandingkan dengan HEV yang memungkinkan pengisian baterai melalui outlet rumah atau di stasiun pengisian. Sementara dalam kebanyakan kasus, penggerak listrik dan ICE mampu mendorong kendaraan dan beberapa kendaraan sejenis hanya menggunakan penggerak listrik. Selain itu, ICE dapat digunakan untuk mengisi ulang baterai atau langsung menghasilkan listrik (Crisostomi, 2018).

Kendaraan listrik *Hybrid Plug-in* berpotensi menggantikan konsumsi bahan bakar transportasi dengan menggunakan pengisian dari jaringan listrik utilitas untuk menggerakkan mobil. PHEV dapat digerakkan menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai dan mesin bensin yang kemudian dapat memperpanjang jarak mengemudi. Salah satu kelemahan kendaraan listrik adalah terbatasnya jarak tempuh mengemudi yang tersedia saat itu. Namun, PHEV dapat memperpanjang jarak kemudi dengan kombinasi energi listrik dan fosil.

PHEV kadang-kadang disebut *range-extended electric vehicles* (ReEVs) atau *extended range electric vehicles* (EREVs) dimana kendaraan ini selalu memiliki bensin atau solar yang dapat digunakan untuk mengemudikan kendaraan untuk jarak yang diperpanjang ketika energi baterai habis digunakan. Selain itu, kendaraan ini dapat memberikan penghematan bahan bakar yang tinggi selama jarak mengemudi yang jauh karena baterai yang memiliki kemampuan penyimpanan besar dan dapat menerima energi dari pengereman regeneratif sekaligus memberikan lebih banyak fleksibilitas untuk pengoptimalan mesin selama jarak operasi kendaraan jauh (Mi, 2018).

PHEV dapat menghasilkan manfaat lingkungan dan ekonomi yang signifikan bagi masyarakat. Keuntungan PHEV dapat dievaluasi dengan seberapa banyak bahan bakar yang digunakan, serta seberapa banyak polusi, termasuk emisi gas rumah kaca yang dapat dikurangi. Beberapa kelebihan utama PHEV dapat diringkas sebagai berikut:

1. Pengalihan Konsumsi Bahan Bakar Fosil Di Sektor Transportasi

Karena pemilik PHEV tidak perlu mengisi bahan bakar atau membutuhkan lebih sedikit bensin, sejumlah besar bahan bakar fosil dapat dihemat. Hal ini akan berdampak jangka panjang pada ekonomi, lingkungan, dan politik.

2. Pengurangan Emisi

Karena pengurangan penggunaan bensin, sejumlah besar emisi dapat berkurang karena penggunaan PHEV. Penggunaan sumber pembangkit listrik terpusat untuk pengisian jauh lebih efisien dan menghasilkan emisi yang jauh lebih sedikit dari pada mobil bertenaga bensin.

3. Penghematan Energi

PHEV menggunakan listrik untuk jarak mengemudi awal. Karena listrik lebih murah dari pada bensin berdasarkan kandungan energi yang setara, biaya per mil yang digerakkan dengan listrik lebih murah daripada bensin. Sebagai contoh kasus di Amerika dimana saat ini, harga bensin sekitar \$ 3 per galon di Amerika Serikat, sedangkan biaya listrik \$ 0,12 per kWh. Untuk mobil ukuran sedang, satu galon bensin dapat menggerakkan mobil sejauh sekitar 30 mil, sedangkan 1 kWh listrik dapat menggerakkan mobil sejauh 5 mil. Ini berarti biaya sebesar \$ 0,72 atau 6 kWh listrik dapat melakukan jarak tempuh untuk mengemudi sejauh 30 mil sementara itu biayanya \$ 3 untuk bensin juga memiliki jarak tempuh berkendara sejauh 30 mil. Dengan kata lain, seorang pengemudi dapat menghemat \$ 2,28 untuk perjalanan sejauh 30 mil.

4. Penghematan Biaya Perawatan

PHEV umumnya dapat menghemat biaya perawatan karena penggunaan pengereman yang ekstensif, perawatan dan perbaikan sistem pengereman menjadi lebih jarang, seperti pergantian bantalan rem dan pergantian minyak rem. Selain itu, karena engine tidak beroperasi atau beroperasi lebih cepat mengakibatkan waktu penggantian oli dan layanan perawatan mesin lainnya akan lebih lama.

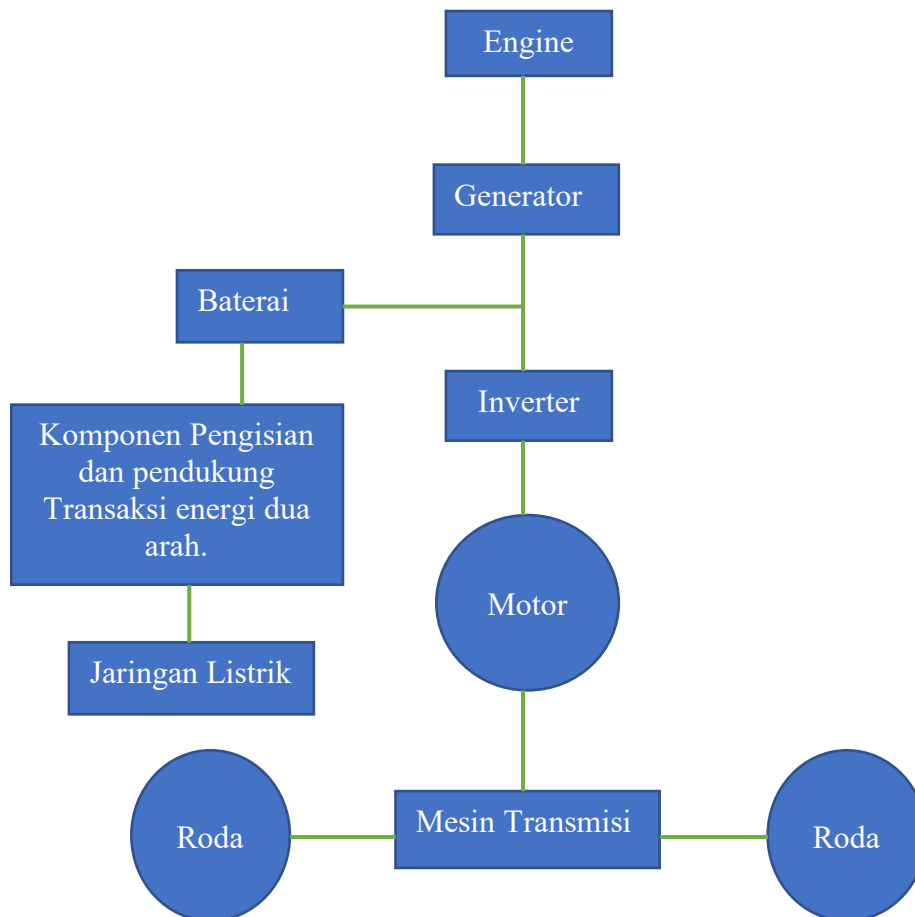
5. Energi Cadangan

PHEV dapat digunakan sebagai sumber energi cadangan pada saat terdapat transaksi energi dua arah. Teknologi baterai PHEV yang khusus dapat memberikan

daya 3–10kW untuk rumah atau kantor selama beberapa jam, dan generator/motor mesin yang terpasang dapat memperpanjang durasi cadangan dengan menggunakan bensin untuk menghasilkan listrik.

6. Penggunaan Baterai Di Akhir Masa Pakai

Baterai yang tidak lagi dapat menghasilkan kinerja yang diinginkan dalam PHEV, Baterai tersebut dapat digunakan untuk penyimpanan energi, yang menyediakan pengaturan tegangan, stabilitas sistem, dan pengaturan frekuensi untuk jaringan listrik.



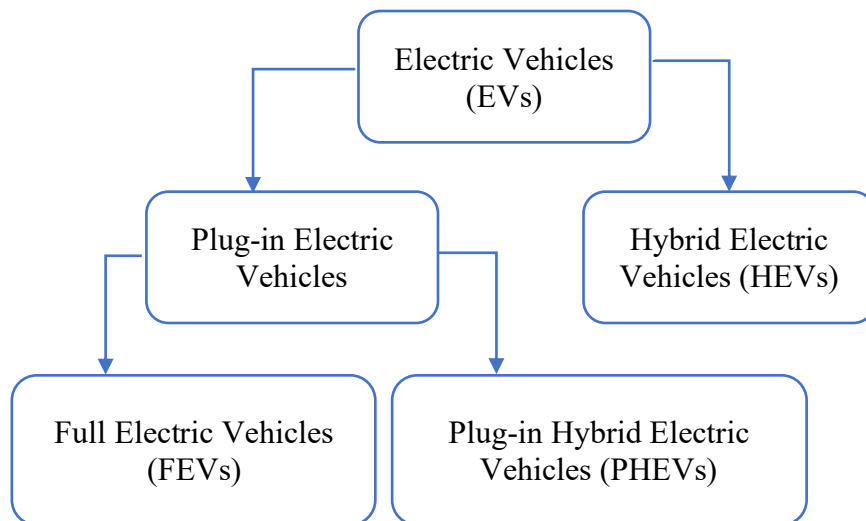
Gambar 2.4. Arsitektur dari jenis Kendaraan listrik *Hybrid Plug-in*.

Gambar 2.4 menunjukkan arsitektur PHEV seri. Pada konfigurasi seri, keluaran mesin bensin dihubungkan dengan generator. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat digunakan untuk mengisi baterai atau memasok daya ke motor. Motor listrik adalah satu-

satunya komponen penggerak roda dimana motor dapat berupa motor induksi, motor reluktansi sakelar, atau motor magnet permanen. Motor dapat dipasang pada kendaraan dengan cara yang sama seperti pada kendaraan konvensional dengan tidak menggunakan transmisi. Pada konfigurasi seri, motor dirancang untuk menyediakan torsi yang dibutuhkan kendaraan untuk melaju di segala kondisi. Mesin/generator dapat dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi rata-rata.

2.1.3. Full Kendaraan Listrik (FEV)

Pada jenis selanjutnya, dimana FEV hanya beroperasi pada sistem penggerak listrik. Seperti halnya PHEV, baterai FEV memiliki ukuran besar dan dapat diisi ulang di stasiun pengisian daya atau di rumah. Karena tidak ada polusi udara yang dilepaskan saat mengemudi, kendaraan ini sering dipasarkan sebagai kendaraan tanpa emisi. Namun, kekurangan dari jenis kendaraan ini adalah jarak tempuh yang terbatas dan belum dilengkapi kemampuan transaksi energi dua arah.



Gambar 2.5. Klasifikasi tipe kendaraan listrik

Meskipun penerapan kendaraan listrik dapat menjadi solusi atas perbaikan lingkungan dan kesehatan, penerapannya hingga saat ini dinilai kurang maksimal. Menurut laporan

European Environment Agency, negara-negara eropa hanya dapat menjual kendaraan listrik 12.000 di paruh pertama tahun 2012. Angka tersebut kurang dari 0,15% dari total penjualan mobil baru di tahun tersebut. Disisi lain, pertumbuhan positif terjadi di AS pada tahun 2017 dengan menyumbang 1% dari penjualan mobil AS. Hal yang sama terjadi dinegara China yang berhasil menjual 32.000 mobil listrik pada Maret 2017, dimana peningkatan sebesar 89% terjadi jika dibandingkan bulan yang sama pada tahun sebelumnya.

Terlepas dari perkembangan yang menjanjikan di china dan AS, persentase kendaraan listrik saat bepergian tetap sangat rendah. Beberapa faktor utama yang menghalangi penggunaan kendaraan listrik secara luas dari sudut pandang pelanggan adalah sebagai berikut:

1. Harga

kendaraan listrik sampai saat ini dinilai memiliki harga yang mahal, bahkan ketika masyarakat disubsidi untuk membeli kendaraan listrik. Faktor utama yang mempengaruhi harga kendaraan listrik adalah biaya baterai (Axsen, 2008). Menanggapi hal ini, beberapa perusahaan, mengusulkan untuk menyewakan baterai kepada pelanggan untuk mengimbangi beberapa biaya terkait baterai. Hal ini juga menjadi motivasi dalam melakukan penelitian ini, dimana baterai dari kendaraan listrik dapat digunakan sebagai teknologi penyimpanan energi pada rumah tangga.

2. Waktu Pengisian

Waktu pengisian untuk kendaraan listrik memiliki waktu lebih lama dari kendaraan berbahan fosil. Dengan masalah tersebut, sistem manajemen energi dan pengadaan titik pengisian menjadi solusi di masa mendatang.

Selain masalah yang disebutkan sebelumnya, beberapa penelitian tentang sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan mengintegrasikan kendaraan listrik mengelompokkan tantangan yang muncul kedepannya. seperti:

1. Pengisian (perspektif sistem jaringan listrik)

Energi yang berpotensi diperlukan untuk mengisi kendaraan listrik dalam jumlah besar akan sangat meningkatkan beban pada jaringan distribusi, dan dapat menyebabkan masalah kualitas daya jika tidak diatur.

2. Infrastruktur Pengisian Daya

Meskipun sebagian besar pengisian daya terjadi di rumah pada malam hari, pertimbangan atas ketersediaan dan distribusi stasiun pengisian sangat penting. Hal ini terkait dengan masalah jarak terbatas dan waktu pengisian yang lama.. Masalah utama dalam konteks ini adalah kecemasan jangkauan antara titik awal dengan titik akhir.

3. Sumber Baterai

Kekhawatiran lebih lanjut adalah sumber litium yang terbatas yang kemudian digunakan untuk membuat baterai kendaraan untuk menggantikan kendaraan berbahan fosil.

Penelitian ini mencoba mengatasi beberapa masalah yang menghalangi penerapan kendaraan listrik, seperti mengembangkan teknik untuk menggunakan jaringan kendaraan listrik dengan lebih baik. Untuk tujuan tersebut, analisis terhadap kendaraan listrik yang disambungkan dengan jaringan listrik pada rumah tangga dan sebagai teknologi transportasi dilakukan.

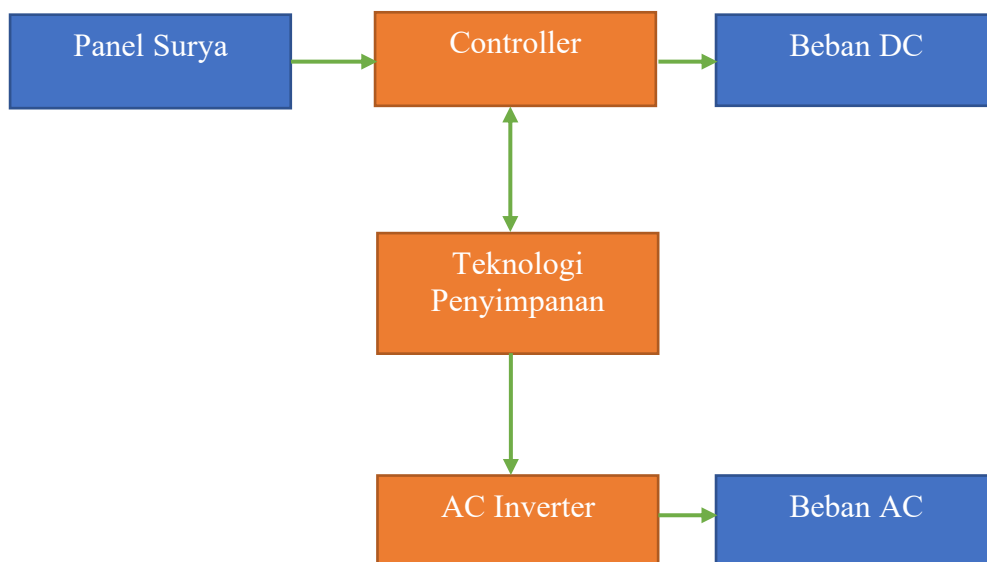
2.2. FOTOVOLTAIK

Pada umumnya, fotovoltaik adalah konversi langsung cahaya matahari menjadi listrik, beberapa bahan menunjukkan sifat yang dikenal sebagai efek *photoelectric* yang menyebabkan penyerapan foton cahaya dan pelepasan elektron. Ketika elektron bebas ini ditangkap maka dihasilkan arus listrik yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Secara

umum ada empat konfigurasi berbeda untuk instalasi listrik tenaga surya, yaitu: Berdiri Sendiri atau Off Grid, Grid Tie, Grid Interactive dan Grid fallback.

2.2.1. Berdiri Sendiri / *Off Grid*

Instalasi fotovoltaik surya yang berdiri sendiri adalah jenis instalasi PLTS yang paling populer. Fotovoltaik pada awalnya dibuat untuk tujuan instalasi ini dengan tujuan menyediakan energi di lokasi dimana tidak ada sumber energi lain atau sering disebut rumah/wilayah off-grid. Sistem yang berdiri sendiri pada dasarnya semuanya bekerja dengan cara yang sama. Panel surya menghasilkan energi kemudian disimpan dalam baterai dan digunakan sesuai kebutuhan.



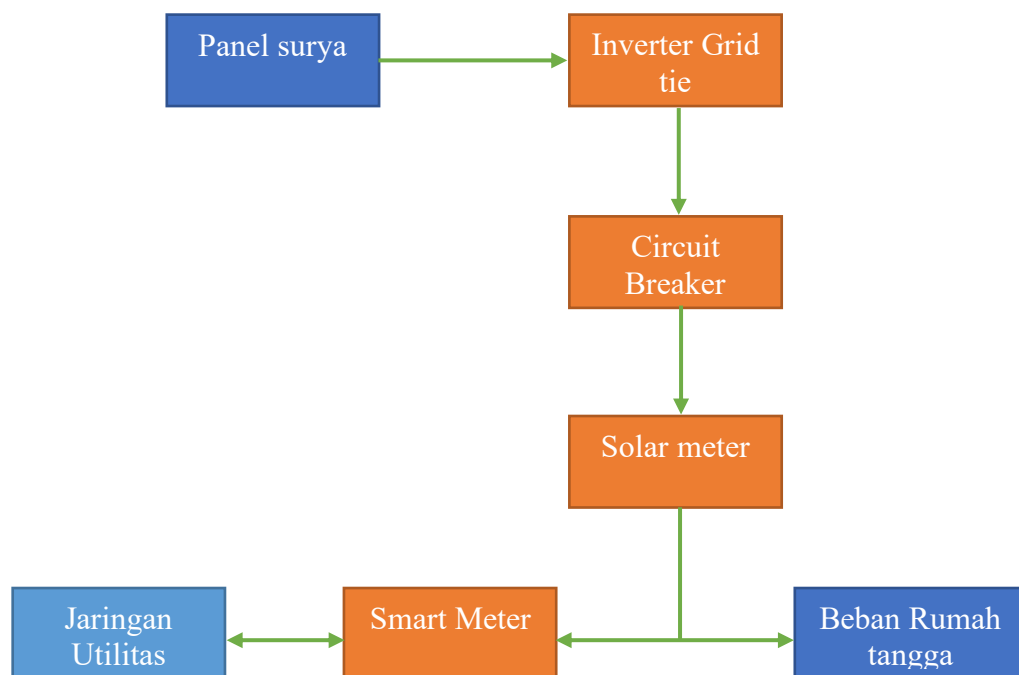
Gambar 2.6. Diagram blok fotovoltaik berdiri sendiri.

Diagram blok yang disederhanakan pada gambar 2.6 menunjukkan sistem fotovoltaik yang berdiri sendiri dan sederhana. Meskipun detailnya akan bervariasi, desain ini membentuk dasar dari sebagian besar sistem yang berdiri sendiri. Desain ini menyediakan daya DC tegangan rendah untuk menjalankan perangkat dan peralatan listrik yang lebih kecil seperti komputer laptop atau beban DC, ditambah pasokan AC untuk menjalankan beban AC. Dalam diagram ini, panah menunjukkan aliran arus. Panel surya menyediakan

energi yang dimasukkan ke pengontrol surya yang selanjutnya pengontrol surya mengisi daya baterai. Pengontrol juga memasok daya ke beban DC, baik menggunakan panel surya atau baterai sebagai sumber energi. Sedangkan, Inverter AC mengambil daya langsung dari baterai dan menyediakan catu daya AC (Boxwell, 2019).

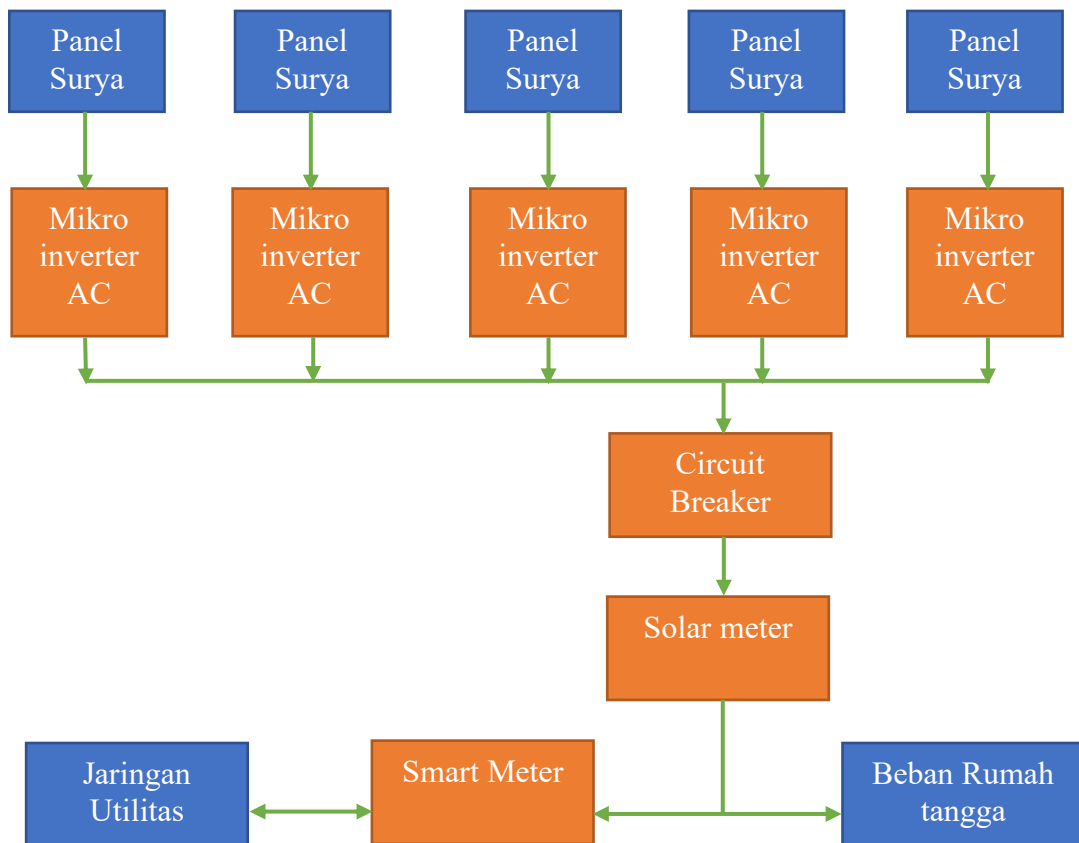
2.2.2. Grid Tie

Di dekade terakhir instalasi grid tie sangat populer di Eropa, Amerika Utara dan Australia dikarenakan adanya hibah untuk mengurangi biaya instalasi. Selain itu, kemampuan untuk mendapatkan uang melalui *feed-in tariff* dan peluang untuk menjual listrik kembali ke perusahaan listrik menjadi nilai lebih dari instalasi grid tie. Pada sistem ini, rumah tangga menggunakan tenaga surya di siang hari dan setiap kelebihan energi yang dihasilkan disuntikkan ke jaringan utilitas. Sedangkan di malam hari, pada saat sistem energi surya tidak menghasilkan listrik maka rumah kembali membeli energi dari perusahaan listrik dengan cara biasa. Manfaat dari instalasi tenaga surya grid-tie adalah mengurangi ketergantungan pada perusahaan listrik dan memastikan bahwa lebih banyak listrik diproduksi dengan cara yang efisien bagi lingkungan.



Gambar 2.7. Diagram blok fotovoltaiik *grid tie* menggunakan inverter terpusat.

Diagram blok pada gambar 2.7 menunjukkan sistem grid tie sederhana, dimana tipe yang dipasang di banyak rumah saat ini. Panel surya terhubung ke inverter grid-tie lalu mengirimkan energi ke beban utama. Listrik dapat digunakan oleh perangkat di dalam gedung atau rumah tangga atau dialirkan ke jaringan utilitas. Inverter grid-tie memiliki kemampuan memantau pasokan daya dari jaringan dengan kemampuan mendeteksi kondisi listrik dan memutus daya dari panel surya untuk memastikan tidak ada energi yang dialirkan kembali ke jaringan. Solar meter sendiri memiliki fungsi mencatat berapa banyak energi yang dihasilkan oleh panel surya. Selain itu, *smart meter* menghitung berapa banyak energi yang diambil dari jaringan dan berapa banyak energi yang dikirim ke jaringan utilitas menggunakan sistem fotovoltaik (Boxwell, 2019).

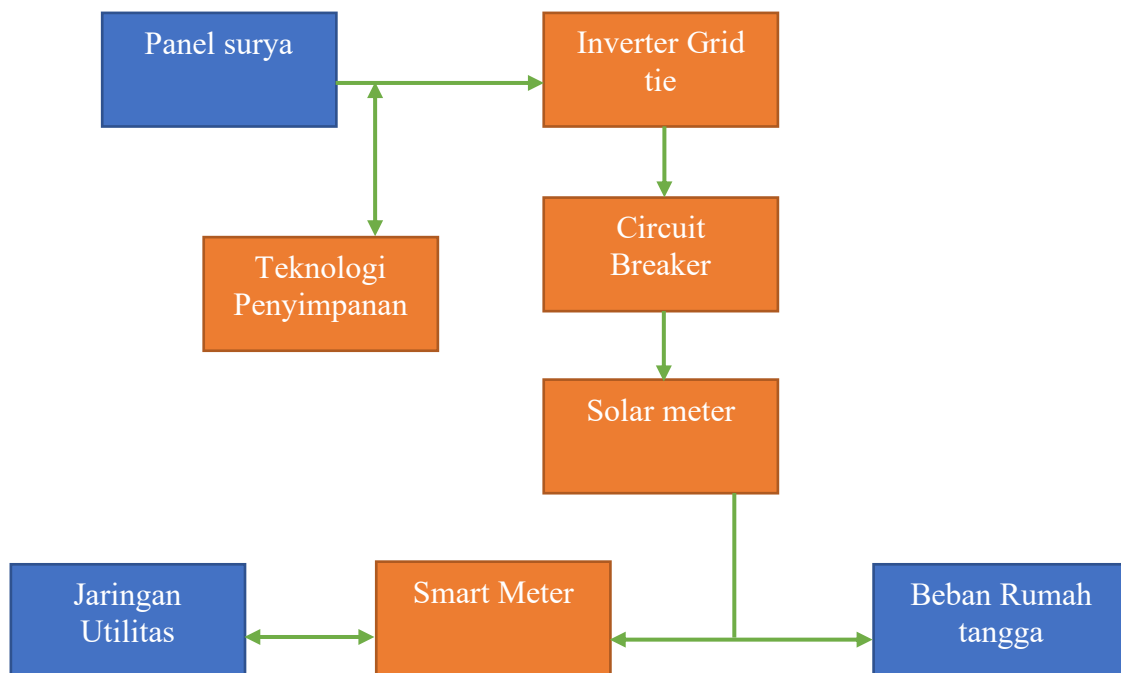


Gambar 2.8. Diagram blok fotovoltaik *grid tie* menggunakan mikro inverter.

Sistem grid-tie menggunakan mikro-inverter diilustrasikan pada gambar 2.8, dimana setiap panel surya memiliki inverter dan dihubungkan ke inverter masing-masing. Sehingga mengubah daya DC dari setiap panel surya menjadi catu daya AC.

2.2.3. *Grid Interactive*

Seperti halnya *grid-tie*, *grid interactive* adalah kombinasi antara instalasi grid tie dengan penambahan teknologi penyimpanan seperti baterai. Selanjutnya, penggunaan daya dari panel surya terjadi saat matahari bersinar dan menjual kelebihan energi kepada perusahaan listrik. Namun, sistem grid interactive memungkinkan energi tersimpan terlebih dahulu di baterai sebelum dijual kembali ke jaringan utilitas. Biaya sistem grid tie dengan tambahan teknologi penyimpanan dan pengontrol baterai untuk mendapatkan cadangan daya lebih tinggi dari pada sistem grid-tie standar. Secara umum penambahan dua komponen tersebut akan menambah 35–50% biaya jika dibandingkan sistem grid tie standar.



Gambar 2.9. Diagram blok fotovoltaiik interative

2.2.4. Grid fallback

Sistem *grid fallback* adalah instalasi yang mengutamakan produksi daya cadangan atau pengisian baterai. Setelah baterai penuh, permintaan beban akan terpenuhi oleh baterai dan kelebihan energi dari panel surya akan dijual ke jaringan utilitas.

Pada penelitian ini, sistem energi manajemen rumah menggunakan instalasi PV grid tie dengan tujuan mendapatkan dampak ekonomi dari hasil intensif penjualan energi ke jaringan utilitas.

2.3. ENERGI MANAJEMEN

Secara umum, industri energi dan banyak penelitian menggunakan istilah yang bervariasi untuk menjelaskan berbagai cara menggunakan energi secara lebih efektif. Istilah-istilah tersebut mencakup sistem manajemen energi, manajemen sisi permintaan, efisiensi energi, pengalihan bahan bakar, manajemen beban dan respon permintaan (Smith, 2016). Tabel 2.1 menunjukkan istilah umum dari manajemen energi dan perbedaan spesifik yang terkait untuk mengelola energi secara lebih efektif.

Tabel 2.1. Terminologi manajemen energi

	Perubahan perilaku konsumen	Prosedur operasi dan pemeliharaan	Peralatan hemat energi	Perbaikan proses	Konservasi energi	Pemulihan tenaga	Pengurangan beban sementara	Pengurangan beban permanen	Sumber energi yang didistribusikan
Sistem Manajemen Energi									
Manajemen Sisi Permintaan									
Efisiensi Energi									

Pengalihan Sumber Energi									
Manajemen Beban									
Respon Permintaan									

Keterangan:

Aspek utama
Aspek sekunder

2.3.1. Sistem Manajemen Energi Dan Manajemen Sisi Permintaan

Pada tabel sebelumnya, memperlihatkan bahwa sistem manajemen energi mencakup semua aspek pengelolaan energi, mulai dari perubahan perilaku, praktik operasi dan pemeliharaan yang lebih baik, perbaikan peralatan hemat energi, perbaikan proses untuk konservasi energi, pemulihan energi dan pengurangan permintaan pada beban puncak maupun permanen dan kemampuan sumber energi yang dapat didistribusikan.

Sedangkan, manajemen sisi permintaan adalah istilah lain yang mencakup semua aspek pengelolaan energi dan dikaitkan secara khusus dengan program utilitas yang bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan energi di lokasi pelanggan. Secara umum, definisi dari manajemen sisi permintaan adalah perencanaan, implementasi, dan pemantauan kegiatan utilitas yang dirancang untuk mempengaruhi permintaan listrik pelanggan dengan cara melakukan perubahan yang diinginkan dalam beban konsumen akhir.

Sistem manajemen energi oleh konsumen dapat berhubungan dengan pengurangan dan kontrol penggunaan energi yang lebih baik melalui sistem yang lebih efisien dan kontrol otomatis. Selain itu, konsumen dapat mengambil tindakan untuk mengurangi kapasitas yang dibutuhkan untuk mendapatkan harga energi yang lebih menguntungkan. Seperti pemilik

rumah tangga mematikan pemanas air listrik atau meningkatkan titik pengaturan termostat untuk sistem pendingin dengan tujuan menghemat uang atau biaya permintaan.

Adapun Standar operasi dari sistem manajemen energi dibagi pada dua persyaratan. pertama, teknologi dari komponen yang terdiri dari semua bagian sistem tenaga seperti smart meter dan kedua adalah metode untuk memproses informasi sehingga menerapkan sistem manajemen energi terjadi. Dari penjabaran sebelumnya maka dapat disimpulkan bahwa sistem manajemen energi adalah sistem otomatis yang mengumpulkan data pengukuran energi dan membuatnya terlihat bagi pengguna melalui grafik, alat pemantauan secara real-time, dan analisis kualitas energi, sehingga memungkinkan pengelolaan sumber energi listrik (Segatto, 2018). Secara umum sistem energi manajemen terbagi 4, yaitu:

1. Sistem Energi Manajemen Rumah (HEM/HEMS)
2. Sistem Energi Manajemen Bangunan (BEMS)
3. Sistem Energi Manajemen Community (CEMS)
4. Sistem Energi Manajemen Pabrik (FEMS)

Dalam studi ini, sistem energi manajemen rumah diterapkan untuk mendapatkan hasil permasalahan yang diangkat. Di sisi lain, sistem manajemen energi rumah (HEM) adalah sektor yang berkembang di era modern seperti *smart grid* dan *smart home*. Selanjutnya, persentase konsumsi listrik di Indonesia untuk rumah tangga mencapai 39,7%, sementara sektor lainnya seperti industri 36%, transportasi 0,1% dan komersial 24,2 % (ESDM, 2019).

Sistem energi manajemen pada rumah tangga dapat memberikan manfaat bagi pemilik rumah dan utilitas dengan menghemat biaya listrik bulanan yang tercapai melalui penyediaan informasi kontrol, penjadwalan, dan harga. Sistem ini dapat memantau konsumsi energi dari rumah tangga untuk membantu mereka menyesuaikan perilaku penggunaan energi berdasarkan sinyal informasi yang mereka terima dari sistem. Selain itu, sistem manajemen energi rumah juga dapat mendukung program respons permintaan dan

utilitas dengan cara mengurangi permintaan listrik pada waktu beban puncak melalui mengirim sinyal dari utilitas dan membuat jadwal berdasarkan sinyal, tujuan sistem, dan prioritas pemilik rumah.



Gambar 2.10. Diagram blok dari sistem manajemen energi untuk rumah tangga.

Selanjutnya, terdapat kemampuan yang disebut sumber daya energi yang didistribusikan atau sebagai pembangkit listrik alternatif yang dapat membantu pada sistem distribusi. Sistem ini mencakup teknologi untuk generator distribusi, penyimpanan energi, dan kualitas daya. Keuntungan sumber daya energi yang didistribusikan adalah pengurangan permintaan dari pembangkit terpusat. Selain itu, biaya tagihan listrik rumah tangga dapat lebih rendah yang didapatkan dari penjualan energi. Sumber daya energi yang didistribusikan dapat diterapkan pada skala utilitas di mana mereka dimasukkan ke dalam sistem distribusi, atau dapat diterapkan di tingkat lokal seperti perkantoran dan rumah tangga. Selanjutnya, penelitian ini akan membahas fotovoltaik dengan kemampuan sebagai sumber energi terdistribusi tingkat rumah tangga karena dapat dianggap sebagai alternatif pengelolaan energi sisi permintaan.

2.3.2. Efisiensi Energi

Istilah efisiensi energi mengacu pada penggunaan metode, proses, atau peralatan alternatif untuk menghasilkan hasil tertentu (produk atau layanan, misalnya) dengan lebih sedikit dalam penggunaan energi. Penerapan jenis perubahan ini sebagian besar bergantung pada ketersediaan teknologi dan kondisi ekonomi.

3.3.3. Pengalihan Sumber Energi

Pengalihan sumber energi adalah proses pergantian satu bahan bakar atau sumber energi dengan yang lain. Hal ini dapat mengarah pada penghematan energi bersih, menggeser kebutuhan dari satu bahan bakar ke bahan bakar lainnya, menghemat sumber energi yang langka, atau mengurangi biaya bahan bakar.

3.3.4. Manajemen Beban

Manajemen Beban mengacu pada konsumen akhir dan mencakup aktivitas yang dilakukan oleh utilitas untuk memanipulasi beban yang terbaca oleh sistem pembangkit untuk mencapai kondisi operasi yang paling menguntungkan dan ekonomis. Pada umumnya, perhatian utama utilitas adalah untuk meningkatkan faktor beban dan mengurangi permintaan pada waktu beban puncak. Hal ini dikarena permintaan pada waktu beban puncak yang tinggi memerlukan pemeliharaan kapasitas pembangkit tambahan yang jarang digunakan dan membutuhkan biaya besar baik dalam hal biaya modal awal maupun operasi.

3.3.5. Respon Permintaan

Respons permintaan adalah bagian dari manajemen beban yang mengacu pada tindakan yang mengurangi beban untuk sementara sebagai respons terhadap harga atau sinyal lain dari utilitas. Metode Ini sering dibedakan dari strategi manajemen beban lainnya, seperti penyimpanan energi termal atau peningkatan efisiensi energi yang menghasilkan

pengurangan beban permanen. Contohnya adalah meminta pelanggan listrik mengurangi konsumsi mereka pada saat-saat kritis atau sebagai tanggapan terhadap harga listrik. Respons permintaan dapat didorong oleh salah satu dari dua metode berbasis insentif atau adanya biaya insentif untuk konsumen pada saat mengatur konsumsi listrik agar lebih efisien. Selanjutnya, program penawaran Atau tarif berbasis waktu dimana terdapat tarif waktu penggunaan atau perbedaan harga pada waktu beban puncak dan waktu normal.

2.4. MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING

Secara umum, *Mixed-integer linear programming* adalah bagian dari bidang pemrograman matematika yang disebut *linear programming*. Dimana *linier programming* dapat didefinisikan sebagai metode matematis untuk mengalokasikan sumber daya dengan aktivitas normal ke aktivitas optimal, ketika masalah dapat dimodelkan dengan menggunakan fungsi objektif linier dan kendala yang memiliki linier berbeda. Program linier terdiri dari sekumpulan variabel, fungsi objektif linier yang menunjukkan kontribusi setiap variabel terhadap hasil yang diinginkan dan kumpulan batasan linier yang menjelaskan batasan nilai variabel. Selanjutnya, jawaban untuk program linier adalah sekumpulan nilai untuk variabel yang menghasilkan nilai terbaik, terbesar dan terkecil, dimana fungsi tujuan yang tetap konsisten dengan semua batasan. Sedangkan pemodelan adalah proses menerjemahkan masalah dunia nyata ke dalam program linier. Setelah masalah dirumuskan sebagai program linier, program dapat digunakan untuk memecahkan masalah tersebut. Bagian tersulit dari penerapan pemrograman linier adalah merumuskan masalah dan menafsirkan solusinya. Adapun dasar dari *linear programming* memiliki bentuk sebagai berikut:

$$a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n = 0 \quad (2.1)$$

Secara umum, a disebut koefisien persamaan atau terkadang dapat disebut parameter. Hal penting yang perlu diketahui tentang koefisien adalah bahwa koefisien tersebut memiliki nilai tetap dan berdasarkan sifat dasar dari masalah yang sedang diselesaikan. Sedangkan x disebut variabel persamaan dimana x diizinkan untuk mengambil kisaran nilai dalam batasan yang ditentukan sebelumnya.

Persamaan dan ketidaksamaan linier sering kali ditulis menggunakan notasi penjumlahan, yang memungkinkan penulisan persamaan dalam bentuk yang jauh lebih ringkas. Persamaan (2.1) misalnya, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$a_0 + \sum_{t=1}^n a_t x_t = 0 \quad (2.2)$$

Pada persamaan (2.2) menjelaskan bahwa huruf i adalah indeks, atau penghitung yang dimulai dalam persamaan diatas adalah 1 dan berlanjut ke n . Banyak istilah dalam penjumlahan untuk setiap nilai indeks seperti variabel tidak harus ditentukan dengan huruf x , indeks tidak harus berupa huruf i . Sehingga pemodelan pada penelitian banyak menggunakan penamaan yang diatur sendiri.

Variabel dalam *linear programming* adalah sekumpulan jumlah yang perlu ditentukan untuk menyelesaikan masalah seperti, masalah yang diselesaikan ketika nilai terbaik dari variabel telah diidentifikasi. Sehingga variabel *linear programming* sering disebut variabel keputusan karena tujuannya adalah memutuskan nilai apa yang harus diambil setiap variabel. Pada umumnya, variabel mewakili jumlah sumber daya yang akan digunakan. Misalnya, variabel mungkin mewakili jumlah luas hutan yang akan ditebang dari bagian hutan tertentu selama periode tertentu. Seringkali, mendefinisikan variabel masalah adalah

salah satu langkah tersulit dan/atau paling penting dalam merumuskan masalah sebagai *linear programming*. Terkadang definisi variabel kreatif dapat digunakan untuk secara dramatis mengurangi ukuran masalah atau membuat masalah non-linier menjadi linier (Tóth, 2012).

Objective Function dari masalah *linear programming* memiliki tujuan untuk memaksimalkan atau meminimalkan beberapa nilai numerik. Nilai ini merupakan nilai bersih sekarang yang diharapkan dari sebuah proyek atau properti hutan seperti contoh kasus pada paragraf sebelumnya, atau biaya konsumsi listrik seperti pada penelitian ini. Pemrograman linier adalah teknik yang sangat umum, dan aplikasinya dibatasi terutama oleh referensi yang digunakan. *Objective function* menunjukkan bagaimana setiap variabel berkontribusi pada nilai yang akan dioptimalkan dalam menyelesaikan masalah. Adapun bentuk umum *objective function* sebagai berikut:

$$\text{maximize or minimize } Z = \sum c_i X_i \quad (2.3)$$

Dimana:

c_i = koefisien dari *Objective function* yang sesuai dengan variabel ke- i , dan

X_i = variabel keputusan ke- i .

Koefisien *objective function* menunjukkan kontribusi nilai *objective function* dari satu variabel terkait. Misalnya, jika *objective function* bertujuan untuk memaksimalkan nilai sekarang dari sebuah program dan X_i adalah aktivitas ke- i dalam program tersebut, maka c_i adalah koefisien *objective function* yang sesuai dengan X_i yang memberikan nilai bersih saat ini yang dihasilkan oleh satu aktivitas i . Sebagai contoh lain, jika masalahnya adalah meminimalkan biaya untuk mencapai suatu tujuan, maka X_i adalah jumlah sumber daya

yang digunakan untuk mencapai tujuan tersebut. Dalam kasus ini, c_i adalah biaya dari satu sumber daya i (Tóth, 2012).

Batasan menentukan kemungkinan nilai variabel yang dapat diambil dari masalah pemrograman linier. Dimana nilai tersebut biasanya mewakili batasan sumber daya, atau tingkat minimum atau maksimum dari beberapa aktivitas atau kondisi. bentuk umum dari batasan sebagai berikut berikut:

$$\text{Subject to } \sum_{i=0}^n a_{j,i} X_i < b_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.4)$$

Dimana:

X_i = variabel keputusan ke- i ,

$a_{j,i}$ = koefisien pada X_i dalam kendala j ,

b_j = koefisien dalam kendala j

j = indeks yang dimulai dari 1 hingga m

Dalam kendala sumber daya, koefisien $a_{j,i}$ menunjukkan jumlah sumber daya j yang digunakan untuk setiap unit aktivitas i , yang diwakili oleh nilai variabel X_i . Sedangkan batasan b_j menunjukkan jumlah total sumber daya j yang tersedia untuk program tersebut. Selanjutnya persamaan (2.4) ditulis sebagai batasan yang kurang dari atau sama, batasan lebih besar dari atau sama juga dapat digunakan. Batasan yang lebih besar dari atau sama selalu dapat diubah menjadi batasan kurang dari atau sama dengan mengalikannya dengan -1.

Sedangkan *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) dapat didefinisikan sebagai program matematika dengan kendala linier dimana variabel tertentu diperlukan untuk mengambil nilai integer. Formulasi pemrograman matematika meliputi seperangkat

variabel yang mewakili tindakan yang dapat diambil dalam sistem yang dimodelkan yang selanjutnya, mencoba untuk mengoptimalkan (minimalisasi atau maksimalisasi) fungsi dari variabel-variabel tersebut. Tahap berikutnya adalah membagi setiap keputusan yang mungkin menilai kualitas dari solusi yang didapat. Secara singkat, *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) merupakan model pemrograman linier bilangan bulat yang dapat mengoptimasi tujuan tertentu. Pada proses pemodelan MILP, fungsi tujuan ditentukan terlebih dahulu. Kelebihan dari pemodelan ini terletak pada variabel keputusan yang sebagian dapat berupa bilangan bulat dan Boolean atau biner serta sebagian lainnya berupa pecahan. Batasan-batasan yang tersedia dapat menentukan nilai dari variabel keputusan tersebut (karlof, 2006).

Selama bertahun-tahun, MILP telah menjadi kode komersial yang efisien untuk memecahkan masalah terkait. Adapun model yang sering digunakan adalah versi MILP dari kode pengoptimalan IBM ILOG CPLEX, Gurobi Optimizer dan FICO Xpress. Sedangkan, pada penelitian ini kami menggunakan Gurobi Optimizer untuk memodelkan sistem manajemen energi pada rumah. Secara umum *Mixed-Integer Linear Program* (MILP) dapat dimodelkan seperti berikut:

$$\min \quad c^T x \tag{2.5}$$

$$s. t. \quad Ax \leq b \tag{2.6}$$

$$x \geq 0 \tag{2.7}$$

$$x_j \in \mathbb{Z} \tag{2.8}$$

Dimana **minimize** $c^T x$ adalah *objective function*, $Ax \leq b$ adalah *linear constraint*, $x \geq 0$ dan $x_j \in \mathbb{Z}$ adalah *bound* dan *integrality constraints*. Adapun contoh pemodelan sederhana dilakukan oleh Cengiz Haksever, *et al*, dengan tujuan

mengoptimalkan dua keputusan fundamental manajemen inventaris seperti berapa banyak yang harus dipesan dan kapan harus memesan dengan mempertimbangkan lebih dari satu produk dan kendala (Haksever, 2005) . Adapun model yang dihasilkan seperti berikut:

$$\text{Min } TC(N_j, X_j) = \sum_{j=1}^k [C_{oj}N_j + C_{hj} \left(\frac{X_j}{2}\right)] \quad (2.9)$$

Kendala:

$$L_{ij} = a_{ij}Y_{ij} - b_{ij}X_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (2.10)$$

$$\sum_{i=0}^{PJ} Y_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.11)$$

$$N_j = \sum_{i=0}^{pj} L_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.12)$$

$$X_{ij} \geq n_{ij}Y_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.13)$$

$$X_{ij} \leq m_{ij}Y_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=0}^{PJ} X_{ij} = X_j, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.15)$$

$$\sum_{j=1}^k w_{rj} X_j \leq MZ_1 + B_r Z_2, \quad r = 1, 2, \dots, v, \quad (2.16)$$

$$T_j \geq RZ_1, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.17)$$

$$T_j \leq RZ_1 + Z_2, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (2.18)$$

$$T_j D_j - X_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (2.19)$$

$$Z_1 + Z_2 = 1, \quad (2.20)$$

$$T_j, X_{ij}, X_j, N_j, L_{ij} \geq 0 \quad \forall i \text{ dan } j, \quad (2.21)$$

$$Y_{ij} = 0, 1 \text{ integer}, \quad (2.22)$$

$$Z_1, Z_2 = 0,1 \text{ integer}, \quad (2.23)$$

Persamaan (2.9) adalah *objective function* yang memiliki fungsi untuk mendapatkan total biaya, sedangkan kendala (2.10), (2.11) dan (2.12) menunjukkan segmen linier kebutuhan produk. Batasan (2.13) hingga (2.17) adalah *bound constraint* dari program linier yang ditunjukkan dengan variabel IBD (indeks batas) dan BD (nilai batas), seperti jika variabel ke- n memiliki *bound constraint*, maka n menunjukkan *bound constraint* atas dan $-n$ menunjukkan *bound constraint* bawah. BD adalah nilai batas atas dan bawah dari setiap variabel. Selanjutnya, Z_1 dan Z_2 adalah variabel biner yang membantu memutuskan pendekatan yang digunakan sehingga batasan (2.18) berfungsi untuk menjamin pendekatan yang akan digunakan dan memastikan beberapa atau semua variabel harus mengambil nilai integer. Branch and bound adalah algoritma yang merupakan dasar untuk hampir semua perangkat lunak untuk menyelesaikan atau memodelkan MILP.

Beberapa penelitian fokus secara khusus pada dasar *branch and bound* berbasis *linear programming*, dimana masalah diselesaikan untuk mendapatkan batasan pada nilai fungsi tujuan dari solusi optimal. Secara umum, *branch and bound* adalah pendekatan dengan cara membagi and mengatasi yang mereduksi masalah menjadi serangkaian subproblem yang lebih kecil dan kemudian secara rekursif atau dengan cara pengulangan untuk menyelesaikan setiap subproblem (Karlof, 2016).

Terdapat empat elemen penting dari algoritma Branch and bound, yaitu:

1. *Lower bounding*: Metode untuk menentukan batas bawah pada nilai fungsi tujuan dari solusi optimal untuk submasalah tertentu.

2. *Upper bounding*: Suatu metode untuk menentukan batas atas pada solusi nilai optimal ZIP.
3. *Branching*: Prosedur untuk mempartisi subproblem untuk mendapatkan dua anak atau lebih.
4. *Search strategy*: Sebuah prosedur untuk menentukan urutan pencarian.

Dengan implementasi spesifik dari elemen-elemen diatas, terdapat banyak versi berbeda dari pembuatan algoritma dasar.

2.5. BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON

Dalam penelitian ini, rancangan sistem manajemen energi pada rumah tangga dibuat dengan bahasa pemrograman python dengan berbagai alasan, salah satunya karena mudah dipelajari bagi pemula. Python sendiri adalah bahasa pemrograman yang memiliki tujuan umum seperti bahasa pemrograman lainnya dan dapat digunakan secara efektif untuk membangun hampir semua jenis program yang tidak memerlukan akses langsung ke perangkat keras komputer. Python sendiri tidak optimal untuk jenis program yang memiliki batasan keandalan yang tinggi karena memiliki semantik statis yang lemah. Namun, Python memiliki beberapa keunggulan dibandingkan banyak bahasa lainnya, seperti bahasa yang relatif sederhana dan mudah dipelajari. Selain itu, Python dirancang untuk diinterpretasikan dan dapat memberikan jenis keterangan atau runtime yang sangat berguna bagi pemrogram pemula. kelebihan lainnya adalah jumlah pustaka yang tersedia secara gratis yang terhubung ke Python dan menyediakan fungsionalitas tambahan yang berguna (Gutttag, 2013).

Python diadaptasi oleh akademisi untuk tujuan penelitian dengan kecepatan tinggi dan bersaing dengan Matlab sebagai bahasa yang paling disukai untuk penelitian. Python sendiri

menempati peringkat pertama berdasarkan peringkat IEEE Spectrum dari bahasa pemrograman teratas untuk tahun 2019 (Gowrishankar, 2019)

Rank	Language	Type	Score
1	Python	🌐 🖨️ ⚙️	100.0
2	Java	🌐 📱 🖨️	96.3
3	C	📱 🖨️ ⚙️	94.4
4	C++	📱 🖨️ ⚙️	87.5
5	R	🖨️	81.5
6	JavaScript	🌐	79.4
7	C#	🌐 📱 🖨️ ⚙️	74.5
8	Matlab	🖨️	70.6
9	Swift	📱 🖨️	69.1
10	Go	🌐 🖨️	68.0

Gambar 2.11. peringkat bahasa pemrograman menurut IEEE. (IEEE Spectrum).

2.6. PENELITIAN TERKAIT

Beberapa penelitian terkait yang membahas metode *mixed-integer linear programming* antara lain sebagai berikut:

1. Penelitian oleh Nikolaos G. Paterakis, *et al*, dalam penelitian ini, sistem manajemen energi rumah yang terperinci dikembangkan untuk menentukan penjadwalan permintaan energi sehari-hari dari rumah tangga pintar dengan mempertimbangkan harga yang bersifat dinamis dan pembatasan konsumsi listrik pada waktu beban puncak. Pembangkit energi baru terbarukan skala kecil berupa fotovoltaik yang terintegrasi dengan rumah tangga. Selain itu, tambahan teknologi penyimpanan dan kendaraan listrik dengan kemampuan menyuplai energi ke rumah (V2H) terdapat pada pemodelan. Adapun Model

mixed-integer linear programming dilakukan di aplikasi GAMS v.24.0.2 dan menggunakan CPLEX v.12 sebagai *problem solve*. Hasil yang didapat sistem manajemen energi membatasi konsumsi listrik sebesar 4 kW pada waktu beban puncak. Selanjutnya, harga listrik yang berubah-ubah mempengaruhi keputusan HEM kapan membeli listrik dari jaringan utilitas dan kapan menggunakan energi dari teknologi penyimpanan dan berjalannya sistem V2H (Paterakis, 2015).

2. Penelitian oleh Ozan Erdinç, *et al*, analisis pengoperasian di lingkungan sekitar rumah tangga dalam hal meminimalkan total biaya konsumsi listrik menjadi tujuan utama pada penelitian ini. Studi ini didasarkan pada latar belakang model rinci setiap rumah tangga dimana teknologi penyimpanan, kendaraan listrik dan fotovoltaic terdapat pada setiap rumah tangga. Selanjutnya, peralatan listrik pada rumah yang dapat dikontrol dapat membantu meminimalkan biaya listrik harian dimana skema tarif harga listrik yang bervariasi atau berubah setiap jamnya. Adapun point utama pada penelitian ini adalah sistem manajemen energi yang mengatur aliran listrik dua arah antara rumah satu dengan rumah lainnya maupun area perumahan dengan pihak utilitas. Selanjutnya, koordinasi dari setiap sistem manajemen energi pada rumah terhubung dengan sistem manajemen energi pada area perumahan sehingga perilaku kompetitif dalam konsumsi listrik diwaktu harga listrik murah dapat diatur. Adapun model *mixed-integer linear programming* dilakukan di GAMS v.24.1.3 dengan menggunakan CPLEX v.12 sebagai *problem solve*. Selanjutnya, hasil yang didapatkan adalah kapasitas trafo area perumahan yang tidak melebihi batas dan meratanya konsumsi listrik rumah pada saat harga listrik murah (Erdinç, 2016).

3. Penelitian oleh Dimitrios Thomas, *et al*, Dalam penelitian ini, model berbasis kerangka kerja atau metode *mixed-integer linear programming* (MILP) dilakukan untuk menganalisis operasi sistem energi manajemen di gedung kampus dengan mempertimbangkan kemampuan transaksi energi yang bersifat dua arah dari kendaraan listrik pada saat tiba di bangunan kampus, dampak ketidakpastian produksi fotovoltaik pada operasi sistem energi manajemen dan efek pengaturan faktor prioritas yang berbeda dalam penjualan energi kembali ke jaringan utilitas. Selanjutnya, perbandingan pada saat adanya teknologi penyimpanan pada sistem juga dibahas dalam penelitian ini. Sehingga hasil yang didapatkan memperlihatkan bahwa skenario terbaik untuk produksi fotovoltaik adalah adanya teknologi penyimpanan dengan kemampuan menyuplai/menjual lebih banyak energi ke jaringan utilitas (D. Thomas, 2018).
4. Penelitian oleh Ziming Zhu, *et al*, studi ini bertujuan membuat jadwal optimal untuk konsumsi listrik rumah tangga dengan menggunakan teknik *mixed integer linear programming* yang dimodelkan di aplikasi matlab. Tahap pertama mengumpulkan data peralatan rumah tangga dengan mempertimbangkan jumlah konsumsi listrik setiap jamnya dan pengelompokan peralatan yang dapat dikontrol dan tidak. Hasil yang didapatkan memperlihatkan penjadwalan peralatan rumah tangga yang lebih efisien dengan menempatkan beban yang dapat dikontrol berjalan di waktu luar beban puncak dan kondisi dimana konsumsi listrik tidak berlebih. Sehingga penulis berkesimpulan bahwa ketika beberapa rumah tangga berpartisipasi dalam penjadwalan, konsumsi beban per jam yang lebih seimbang tercapai (Zhu, 2011).

5. Penelitian oleh Kin Cheong Sou, *et al*, penelitian ini mempertimbangkan masalah penjadwalan peralatan rumah tangga untuk mendapatkan biaya listrik minimum. Karakteristik operasi, seperti durasi yang diharapkan dan konsumsi daya puncak dari peralatan rumah yang dapat diatur melalui sinyal profil daya. kerangka kerja penjadwalan peralatan rumah tangga menggunakan teknik *mixed integer linear programming* yang dibuat di aplikasi matlab dan menggunakan CPLEX sebagai *problem solve*. Hasil yang didapatkan adalah penghematan sebesar 47% dari penjadwalan peralatan rumah tangga selama 10 menit. Adapun waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 15,4 detik (Sou, 2011).

2.7. STATE OF THE ART

Pada Tabel 2.2 dapat dilihat perbandingan penelitian tentang sistem manajemen energi pada rumah tangga atau bangunan dengan menggunakan berbagai metode berbeda termasuk MILP.

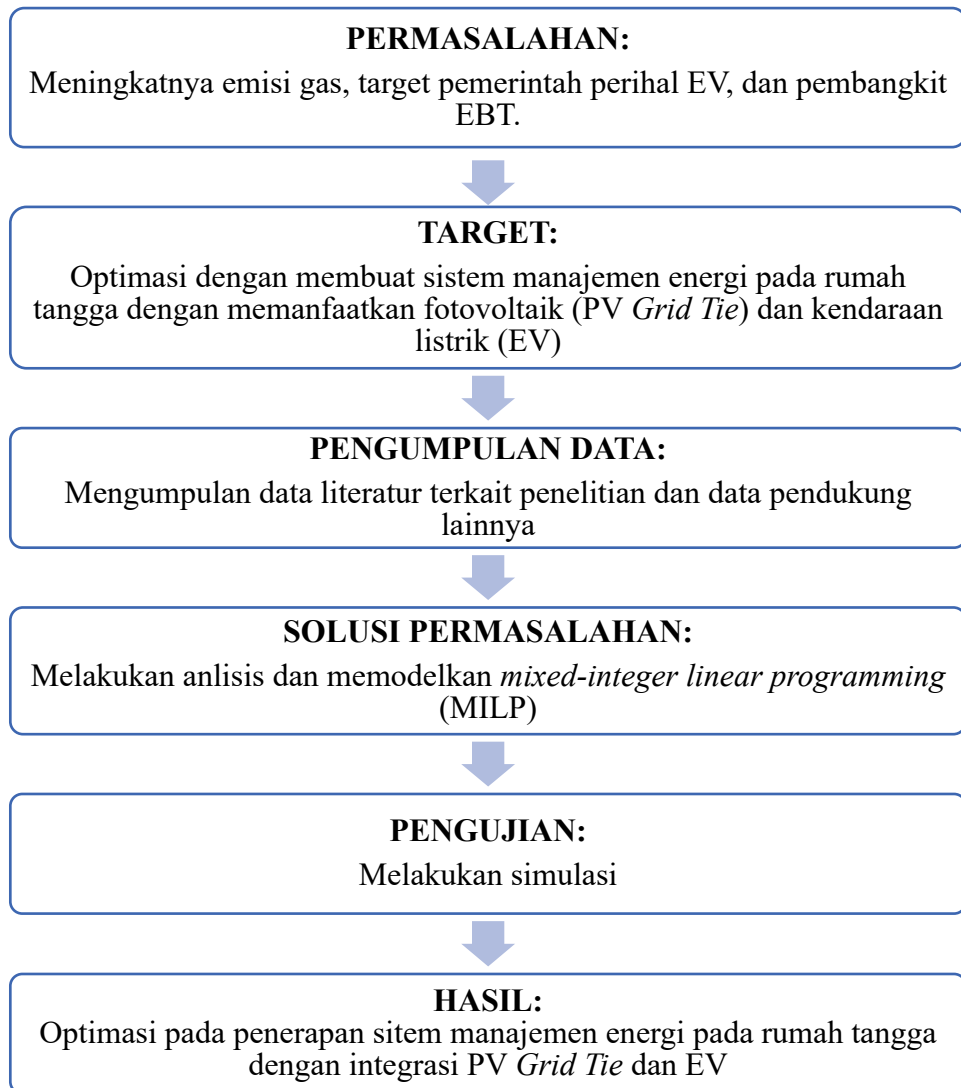
Tabel 2.2. State of The Art

No	Judul	Penulis	Tahun	Tujuan	Perbedaan
1	Optimization based Real-Time Home Energy Management in the Presence of Renewable Energy and Battery Energy Storage	Mahmoud Elkazaz, Mark Sumner, Richard Davies, Seksak Pholboon, David Thomas.	2019	Merancang sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan tujuan mengurangi biaya konsumsi energi listrik harian dengan memaksimalkan konsumsi pembangkit energi baru terbarukan skala kecil berupa fotovoltaik dan meningkatkan manfaat pelanggan melalui pengelolaan pengoperasian teknologi penyimpanan energi pada rumah tangga	Menggunakan metode <i>rolling horizon</i> dan pemasangan teknologi penyimpanan pada pemodelan.
2	Energy Management in Smart Homes with PV Generation, Energy Storage and Home to Grid Energy Exchange	Muhammad Muzaffar I, Intisar A. S, Muhammad Faisal N. K, Rehan L, Muhammad Athar S, Hafiz A. M.	2019	Manajemen energi rumah (HEM) area negara berkembang dimodelkan dengan integrasi PV dan teknologi penyimpanan dengan mempertimbangkan pengguna dan batasan sistem lainnya. Algoritma genetika (GA) diterapkan untuk mengetahui penjadwalan peralatan yang optimal	Menggunakan metode Algoritma genetika dan penambahan instalasi teknologi penyimpanan pada sistem.
3	Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array	Xiaohua Wu, Xiaosong Hu, Scott Moura, Xiaofeng Yin, Volker Pickert.	2016	Penggunaan metode <i>stochastic dynamic programming</i> (SDP) untuk pemodelan sistem manajemen energi pada rumah pintar dengan penyimpanan energi PEV dan PV dan mempertimbangkan beberapa variabel tidak pasti.	Menggunakan metode <i>stochastic dynamic programming</i> .

4	A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response	A. G. Bakirtzis, Ozan Erdinc, Nikolaos G. Paterakis, Iliana N. Pappi, João P.S. Catalão.	2015	Mengukur tambahan PV dan teknologi penyimpanan untuk rumah tangga pintar, yang memuat profil yang dipengaruhi oleh keputusan pemodelan sistem HEM yang beroperasi berdasarkan harga dinamis berdasarkan respon permintaan.	Memanfaatkan EV sebagai teknologi penyimpanan <i>mobile</i> . Fokus penelitian adalah investasi tambahan untuk PV dan teknologi penyimpanan
5	Home energy management systems: A review of modelling and complexity	Marc Beaudin n, Hamidreza Zareipour	2015	Memberikan tinjauan mendalam tentang pendekatan pemodelan untuk HEMS. Selanjutnya, meringkas pertimbangan komputasi yang terkait dengan pemodelan HEMS.	Pada penelitian ini hanya membahas pemodelan HEMS dan penjadwalan peralatan rumah
6	Optimal operation of an energy management system for a grid-connected smart building considering photovoltaics' uncertainty and stochastic electric vehicles' driving schedule	Dimitrios Thomas Olivier Deblecker, Christos S. Ioakimidis	2018	Merancang sistem manajemen energi pada bangunan kampus dengan mengintegrasikan EV, baterai dan PV dengan melakukan penjadwalan pada kendaraan dan analisis sistem V2G, V2B dan G2V.	Dalam penelitian ini, memanfaatkan EV sebagai teknologi penyimpanan dan merancang EMS pada bangunan kampus. Sehingga memiliki parameter yang berbeda.
7	Energy Management in Smart Distribution Systems with Vehicle-to-Grid	H. S. V. S. Kumar Nunna, Swathi Battula, Suryanarayana	2016	Merancang sistem energi manajemen pada jaringan distribusi dengan	Fokus penelitian adalah kemampuan kendaraan listrik yang dapat disambungkan ke sistem distribusi.

	Integrated Microgrids.	Doolla, Dipti Srinivasan.		penambahan kendaraan listrik sebagai sumber alternatif.	
8	Smart home energy management with vehicle-to-home technology	Chenxi Li, Fengji Luo, Yingying Chen, Zhao Xu, Yanan An, Xiao Li	2017	Memodelkan sistem manajemen energi pada rumah tangga dengan menggunakan metode <i>Natural Aggregation Algorithm</i> (NAA)	Fokus penelitian adalah kemampuan kendaraan listrik memenuhi kebutuhan energi rumah tangga. Sehingga dampak ekonomi hanya didapatkan dari satu variable. Selain itu, metode berbeda diterapkan.

2.7. KERANGKA PIKIR



Gambar 2.12. Kerangka Pikir