

**ANALISIS PENGEMBANGAN LAPANGAN *HYDROTHERMAL RESERVOIR* DALAM MENENTUKAN STRATEGI PRODUKSI TERHADAP KAPASITAS DAYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE FLASH STEAM* DAN *SOFTWARE TOUGH2***

**TUGAS AKHIR**

*Diajukan guna melengkapi syarat dalam mencapai gelar Sarjana Teknik*



Oleh

**NAJIB AMIEN HUSEIN**

**163210091**

Dokumen ini adalah Arsip Miik :  
Perpustakaan Universitas Islam Riau

**PROGRAM STUDI TEKNI PERMINYAKAN**

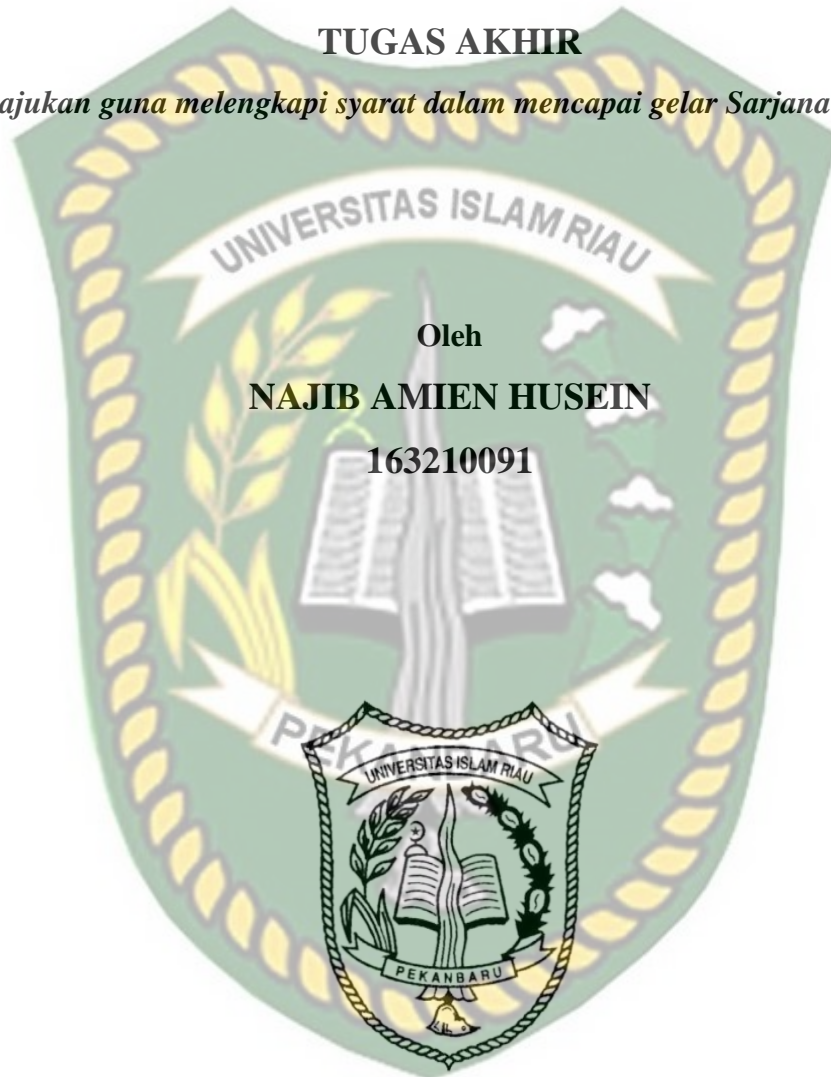
**UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

**2021**

**ANALISIS PENGEMBANGAN LAPANGAN *HYDROTHERMAL RESERVOIR* DALAM MENENTUKAN STRATEGI PRODUKSI TERHADAP KAPASITAS DAYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE FLASH STEAM* DAN *SOFTWARE TOUGH2***

**TUGAS AKHIR**

*Diajukan guna melengkapi syarat dalam mencapai gelar Sarjana Teknik*



Oleh

**NAJIB AMIEN HUSEIN**

**163210091**

Perpustakaan Universitas Islam Riau

Dokumen ini adalah Arsip Miik :

**PROGRAM STUDI TEKNI PERMINYAKAN**

**UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

**2021**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini disusun oleh:

Nama : Najib Amien Husein

NPM : 163210091

Program Studi : Teknik Perminyakan

Judul Skripsi : Analisis Pengembangan Lapangan *Hydrothermal Reservoir* dalam menentukan Strategi Produksi terhadap Kapasitas Daya Menggunakan Metode *Double Flash Steam* dan *Software Tough2*

Telah berhasil dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat guna memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Richa Melysa ST., MT (.....)

Penguji I : Novia Rita ST., MT (.....)

Penguji II : Novrianti ST., MT (.....)

Ditetapkan di : Pekanbaru

Tanggal : 17 Desember 2021

Disahkan Oleh:

KETUA PROGRAM STUDI  
TEKNIK PERMINYAKAN

  
NOVIA RITA ST., MT

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir ini merupakan karya saya sendiri dan semua sumber yang tercantum didalamnya baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar sesuai ketentuan. Jika terdapat unsur penipuan atau pemalsuan data maka saya bersedia dicabut gelar yang telah saya peroleh

Pekanbaru, 17 Desember 2021



**NAJIB AMIEN HUSEIN**

**163210091**



## KATA PENGANTAR

Rasa syukur disampaikan kepada Allah Subhanahu Wata'ala atas berkat Rahmat dan limpahan Ilmu dari-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Perminyakan, Universitas Islam Riau. Saya menyadari bahwa banyak pihak yang telah membantu dan mendorong saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini serta memperoleh ilmu pengetahuan selama perkuliahan. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Orang tua saya Bapak Kusen, dan Nurlela, Adik saya Muhammad Afnan, Muhammad Fahrul Rozi, Nurul Aisyah serta seluruh keluarga yang selalu memberikan semangat dan doa, serta bantuan materil dan moral sehingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Ibu Richa Melysa ST., MT selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir, sekaligus Dosen Pembimbing Akademik, dan Bapak Dr. Adi Novriansya MT dan Bapak Solkhan dari PT. Tracon Industri selaku Mentor Pembimbing Lapangan Tugas Akhir yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan masukan dalam penyusunan Tugas Akhir serta memberikan semangat selama perkuliahan di Teknik Perminyakan.
3. Bapak/Ibu Dosen Teknik Perminyakan yang banyak membantu selama perkuliahan dan memberikan Ilmu Pengetahuan yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu
4. Sahabat saya Muhammad Luthfi Mustofa, Ichsan Al Sabah Lukman, Refiandi Reza, Rahmat Febrian Saputra, Abdillah Muharram, dan yang lainnya Angkatan 2016 khususnya Kelas 16A yang sedang menuju ST

Teriring doa saya semoga Tuhan memberikan balasan atas segala kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Pekanbaru, 17 Desember 2021



Najib Amien Husein

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GRAFIK.....	ix
DAFTAR SIMBOL.....	x
ABSTRAK.....	xii
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>Geothermal Energy System</i> .....	4
2.2 Potensi Cadangan Panas Bumi.....	11
2.3 Kapasitas Daya Pembangkit Panas Bumi.....	12
2.4 Konseptual Model .....	14
2.5 <i>State Of The Art</i> .....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Metode Penelitian.....	19
3.2 Jenis Penelitian .....	20
3.2.1 Pembuatan Model Penelitian.....	20
3.2.2 Potensi Cadangan Lapangan N .....	27
3.2.3 Skenario Pengembangan Kapasitas Daya Pembangkit.....	28
3.3 Skenario Penentuan Strategi Produksi Lapangan N.....	31
3.4 <i>Flow Chart</i> .....	32
3.5 Tempat Penelitian dan Teknik Pengambilan data .....	33
3.6 Jadwal Penelitian .....	33

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	34
4.1 <i>Natural State</i> .....	34
4.2 <i>Matching Pressure and Temperature</i> .....	34
4.3 Potensi Cadangan Lapangan N.....	40
4.4 Penentuan Strategi Produksi terhadap Kapasitas Daya Pembangkit.....	41
4.4.1 Desain Kapasitas Daya Pembangkit.....	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1. Kesimpulan.....	58
5.2. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA .....	59



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Siklus Pembentukan Reservoir Panas Bumi (Lund, 2007).....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Sistem Geopressed Reservoir (Lund, 2007).....	6
<b>Gambar 2. 3</b> Sistem Pemanfaatan Hot Dry Rock (R. DiPippo, 2012) .....	8
<b>Gambar 2. 4</b> Sistem Hydrothermal Reservoir (Ronald DiPippo, 2015).....	10
<b>Gambar 2. 5</b> Skema Pembangkit Single Flash Steam (Colpan, 2021) .....	13
<b>Gambar 2. 6</b> Skema Pembangkit Double Flash Steam (Colpan, 2021).....	14
<b>Gambar 2. 7</b> Konseptual Model Lapangan N (Ashat et al., 2019) .....	15
<b>Gambar 3. 1</b> Model Simulasi 3 Dimensi (Marjuwan et al., 2016) .....	21
<b>Gambar 3. 2</b> Diagram Temperature-Entropi (T-s) dari siklus Double Flash Steam (Ronald DiPippo, 2015) .....	29
<b>Gambar 3. 3</b> Diagram Alir Penelitian.....	32
<b>Gambar 4. 1</b> Kondisi Natural State Lapangan N.....	34
<b>Gambar 4. 2</b> Lokasi Sumur Eksplorasi.....	35
<b>Gambar 4. 3</b> Lokasi 4 Sumur Produksi + 1 Sumur Injeksi.....	42
<b>Gambar 4. 4</b> Lokasi 5 Sumur Produksi (Skenario 1).....	47
<b>Gambar 4. 5</b> Lokasi Sumur Produksi Skenario 2 (5 Sumur Produksi).....	50
<b>Gambar 4. 6</b> Lokasi Penambahan (3 Sumur Produksi) .....	53



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Mekanisme Hydrothermal Reservoir .....	11
<b>Tabel 3. 1</b> Grid Blocks Properties .....	20
<b>Tabel 3. 2</b> Layer Properties .....	21
<b>Tabel 3. 3</b> Data Material Properties .....	22
<b>Tabel 3. 4</b> Jadwal Penelitian .....	33
<b>Tabel 4. 1</b> Letak Sumur Eksplorasi Lapangan N.....	35
<b>Tabel 4. 2</b> Parameter Potensi Cadangan Lapangan N .....	40
<b>Tabel 4. 3</b> Perhitungan Cadangan Lapangan N.....	41
<b>Tabel 4. 4</b> Data Perhitungan Metode Double Flash Steam .....	42



Dokumen ini adalah Arsip Miik :  
Perpustakaan Universitas Islam Riau

## DAFTAR GRAFIK

<b>Grafik 3. 1</b> Data P&T Sumur N-1 .....	24
<b>Grafik 3. 2</b> Data P&T Sumur N-2 .....	25
<b>Grafik 3. 3</b> Data P&T Sumur N-3 .....	26
<b>Grafik 3. 4</b> Data Sumur N-4.....	27
<b>Grafik 4. 1</b> Data P&T Sumur N-16NAH .....	36
<b>Grafik 4. 2</b> Data P&T Sumur N-26RA .....	37
<b>Grafik 4. 3</b> Data P&T Sumur N-11KN .....	38
<b>Grafik 4. 4</b> Data P&T Sumur N-12NA .....	39
<b>Grafik 4. 5</b> Kapasitas Daya Pembangkit (4 Sumur Produksi).....	45
<b>Grafik 4. 6</b> Penurunan Pressure (4 Sumur Produksi).....	46
<b>Grafik 4. 7</b> Penurunan Temperature (4 Sumur Produksi).....	46
<b>Grafik 4. 8</b> Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 1 (5 Sumur Produksi) .....	48
<b>Grafik 4. 9</b> Penurunan Pressure Skenario 1 (5 Sumur Produksi).....	48
<b>Grafik 4. 10</b> Penurunan Temperature Skenario 1 (5 Sumur Produksi).....	49
<b>Grafik 4. 11</b> Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 2 (5 Sumur Produksi) .....	51
<b>Grafik 4. 12</b> Penurunan Pressure Skenario 2 (5 Sumur Produksi).....	51
<b>Grafik 4. 13</b> Penurunan Temperature Skenario 2 (5 Sumur Produksi).....	52
<b>Grafik 4. 14</b> Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 2 (8 Sumur Produksi) .....	54
<b>Grafik 4. 15</b> Penurunan Pressure Skenario 2 (8 Sumur Produksi).....	54
<b>Grafik 4. 16</b> Penurunan Temperature Skenario 2 (8 Sumur Produksi).....	55
<b>Grafik 4. 17</b> Kapasitas Daya Pembangkit (1 Sumur Makeup).....	55
<b>Grafik 4. 18</b> Penurunan Pressure (1 Sumur Makeup).....	56
<b>Grafik 4. 19</b> Penurunan Temperature (1 Sumur Makeup).....	56

## DAFTAR SIMBOL

Potensi Perhitungan Cadangan:

$A$  = Luas *Reservoir* ( $m^2$ )

$h$  = Ketebalan *Reservoir* (m)

$\Phi$  = Porositas Batuan (%)

$P_r$  = Densitas Batuan ( $Kg/m^3$ )

$C_r$  = Kapasitas Panas Batuan ( $kJ/Kg^\circ C$ )

$T_i$  = *Temperature* Awal *Reservoir* ( $^\circ C$ )

$S_L$  = Saturasi Air (%)

$P_L$  = Densitas Air ( $Kg/m^3$ )

$U_L$  = Energi Dalam Air ( $kJ/Kg^\circ C$ )

$S_v$  = Saturasi Uap (%)

$P_v$  = Densitas Uap ( $Kg/m^3$ )

$U_v$  = Energi Dalam Uap ( $kJ/Kg^\circ C$ )

$T_f$  = *Temperature* Akhir *Reservoir* ( $^\circ C$ )

$H_{ei}$  = Kandungan Energi Panas Pada Kondisi *Initial* (kJ)

$H_{ef}$  = Kandungan Energi Panas Pada Kondisi *Final* (kJ)

$H_{th}$  = Energi Maksimal yang dapat dimanfaatkan (kJ)

$H_{de}$  = Energi yang dapat dimanfaatkan pada kondisi *Actual* (kJ)

$R_f$  = *Recovery Factor* (%)

$H_{thermal}$  = Potensi Cadangan yang dapat dimanfaatkan (MW<sub>th</sub>)

$H_{El}$  = Energi Listrik yang dapat dimanfaatkan (MW<sub>e</sub>)

Kapasitas Pembangkit *Double Flash Steam*:

$X_2$  = Fraksi Uap dari Separator ke HP Turbin (%)

$h_2$  = *Enthalpy* Sumur (K/Kg)

- $h_{f2}$  = *Enthalpy fluida* Separator (kJ/Kg)  
 $h_{fg2}$  = *Enthalpy* dua fasa Separator (kJ/Kg)  
 $m_{v1}$  = Masa uap yang masuk ke HP Turbin (kJ/Kg)  
 $m_T$  = Laju Alir *fluida* (Kg/s)  
 $m_{w1}$  = Masa Air yang masuk ke HP Turbin (kJ/Kg)  
 $X_4$  = Fraksi uap yang masuk dari HP Turbin ke Condensor (%)  
 $S_4$  = *Entropy* HP Turbin (kJ/Kg.K)  
 $S_{fCond}$  = *Entropy fluida* Condensor (kJ/Kg.K)  
 $S_{fgCond}$  = *Entropy* dua fasa Condensor (kJ/Kg.K)  
 $h_4$  = *Enthalpy* uap HP Turbin (kJ/Kg)  
 $h_{fCond}$  = *Enthalpy fluida* Condensor (kJ/Kg)  
 $h_{fgCond}$  = *Enthalpy* dua fasa Condensor (kJ/Kg)  
 $\eta_t$  = Efisiensi turbin isentropic (%)  
 $m_{total}$  = Laju massa uap (Kg/s)  
 $W_t$  = Daya turbin (Kw)  
 $X_8$  = Fraksi uap kondensor (kJ/Kg)  
 $h_8$  = *Enthalpy* kondensor (kJ/Kg)

# ANALISIS PENGEMBANGAN LAPANGAN *HYDROTHERMAL RESERVOIR* DALAM MENENTUKAN STRATEGI PRODUKSI TERHADAP KAPASITAS DAYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE FLASH STEAM* DAN *SOFTWARE TOUGH2*

NAJIB AMIEN HUSEIN  
163210091

## ABSTRAK

Metode *Double Flash Steam* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam mendesain kapasitas pembangkit pada lapangan *hydrothermal reservoir*. Mekanisme dari metode ini di dasarkan pada pemanfaatan fluida panas bumi yang dihasilkan. Metode ini menggunakan dua separator dan dua *turbine* yang memiliki *pressure* berbeda. Lapangan N merupakan lapangan panas bumi dengan sistem *hydrothermal reservoir* yang memiliki total cadangan sebesar 149.82 MW. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan *Software Tough2* dalam mendesain model konseptual lapangan N, serta metode *Double Flash Steam* untuk mendesain kapasitas pembangkit sebesar 30 MW, dan metode ini dapat digunakan dalam mendesain kapasitas pembangkit pada lapangan N. Model konseptual yang dibuat memiliki sebanyak 10920 grid, dengan ukuran grid 26×21×20 yang terdiri dari 20 *layer*. Tahap pengembangan dilakukan selama 30 tahun. Pengembangan dilakukan untuk menentukan strategi produksi yang tepat dalam mengelola lapangan N. Pada penelitian yang dilakukan, terdapat 2 skenario dalam menentukan strategi produksi yang tepat. Skenario pertama terdiri dari 4 sumur produksi + 1 sumur injeksi, dan 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi dengan elevasi kedalaman -300 hingga -900mdpl, dan skenario kedua terdiri dari 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi, 8 sumur produksi + 1 sumur injeksi, dan penambahan 1 sumur makeup dengan elevasi kedalaman 300 hingga -200mdpl. Pada skenario pertama dengan 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi, kapasitas daya yang dihasilkan sebesar 32.481MW, penurunan daya sebesar 3.4MW, serta terjadi penurunan *pressure* dan *temperature* sebesar 3 bar dan 5°C. Pada skenario kedua, kapasitas daya yang dapat dihasilkan sebesar 29.13MW, penurunan daya sebesar 7MW, serta penurunan *pressure* dan *temperature* sebesar 2 bar dan 3°C, penurunan daya sebesar 7MW. Skenario pertama dengan 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi merupakan skenario yang tepat dalam menerapkan strategi produksi pada lapangan N. Kondisi *reservoir* pada tahap pengembangan masih terjaga dengan baik, sehingga lapangan N masih dapat dikembangkan selama 30 tahun pengembangan.

**Kata Kunci:** *Double Flash Steam, Hydrothermal Reservoir, Software Tough2,*

**ANALYSIS OF HYDROTHERMAL RESERVOIR FIELD  
DEVELOPMENT IN DETERMINING THE PRODUCTION  
STRATEGY OF POWER CAPACITY USING DOUBLE FLASH  
STEAM METHODS AND TOUGH2 SOFTWARE**

**NAJIB AMIEN HUSEIN**

**163210091**

**ABSTRACT**

*The Double Flash Steam method is one of the methods used in designing generating capacity in hydrothermal reservoir fields. The mechanism of this method is based on the utilization of the geothermal fluid produced. This method uses two separators and two turbines that have different pressures. Field N is a geothermal field with a hydrothermal reservoir system that has a total reserve of 149.82 MW. The research will be carried out using Tough2 Software in designing the conceptual model of the N field, as well as the Double Flash Steam method to design a generating capacity of 30 MW, and this method can be used in designing the generating capacity in the N field. The conceptual model created has as many as 10920 grids, with a grid size of 262120 consisting of 20 layers. The development phase is carried out for 30 years. Development is carried out to determine the right production strategy for managing the N field. In the research conducted, there were 2 scenarios for determining the right production strategy. The first scenario consists of 4 production wells + 1 injection well, and 5 production wells + 1 injection well with a depth of -300 to -900 mdpl, and the second scenario consists of 5 production wells + 1 injection well, with the addition of 1 makeup well with a depth of 300 to -200 mdpl. In the first scenario, with five production wells and one injection well, the resulting power capacity is 32,481MW, a power loss of 3.4MW, and a decrease in pressure and temperature of 3 bar and 5°C. In the second scenario, the power capacity that can be generated is 29.13MW, the power loss is 7MW, and the pressure and temperature drop are 2 bar and 3 °C, respectively. The power loss is 7MW. The first scenario, with 5 production wells and 1 injection well, is the right scenario for implementing the production strategy in the N field. The reservoir conditions at the development stage can still be developed for 30 years of development.*

**Keywords:** *Double Flash Steam, Hydrothermal Reservoir, Software Tough2,*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Panas bumi merupakan salah satu energi terbarukan yang sedang dikembangkan pada saat sekarang ini. Energi ini memiliki potensi yang sangat besar di Indonesia. Energi panas bumi juga merupakan salah satu target dari pemerintah Indonesia dalam meningkatkan kebutuhan energi baru terbarukan pada masa yang akan datang. Energi panas bumi memiliki tingkat kebersihan energi yang sangat baik dibandingkan energi fosil yang saat ini sedang digunakan. Meskipun begitu, Sumber energi panas bumi yang melimpah yang terdapat di Indonesia, pemanfaatan sumber energi panas bumi di Indonesia sangat minim dimanfaatkan. (Saptadji, 2018)

Energi panas bumi yang melimpah juga memiliki permasalahan yang dapat menimbulkan kegagalan dalam memproduksi energi panas bumi. Permasalahan yang paling sering ditemui pada saat pengelolaan energi panas bumi adalah penurunan *pressure* dan *temperature* pada *reservoir* panas bumi. (Pratama & Saptadji, 2018) Penurunan *pressure* dan *temperature* yang terjadi pada *reservoir* panas bumi 2 fasa akan menyebabkan pencampuran uap dan wilayah disekitar sumur produksi menjadi kering akan *fluida*. Kemudian permasalahan ini dapat menyebabkan terjadinya pemisahan pada *reservoir*, yaitu zona *steam* dan zona *brine* akibat dari pengaruh gravitasi yang menyebabkan zona *steam* membentuk zona *superhead*, sedangkan zona *reservoir* menjadi kering. (Grant & Bixley, 2011; Lukmana, 2019) Permasalahan ini dapat menyebabkan penurunan produksi dan dapat mengurangi kapasitas listrik pada lapangan tersebut. (Marjuwan et al., 2016). Maka karena itu, diperlukan pengolaan *reservoir* panas bumi secara berkelanjutan demi menjaga kondisi *reservoir* tetap optimal.

Penelitian terkait strategi produksi merupakan rangkaian dari pengelolaan *reservoir* yang bertujuan untuk menerapkan berbagai strategi produksi secara keseluruhan yang tepat sasaran pada produksi *steam* berkelanjutan. Maka daripada itu, strategi produksi yang tidak tepat akan menyebabkan perubahan *reservoir* dimasa yang akan datang tidak dapat diubah. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan dan implementasi strategi yang cermat dan baik harus dilakukan pada tahap awal pengembangan lapangan panas bumi. (Lukmana, 2019; Mulyadi & Ashat, 2011)

Mempertimbangkan hal diatas, peneliti tertarik untuk melakukan studi tentang *reservoir* panas bumi dua fasa menggunakan metode *Double Flash Steam* dan software TOUGH 2 (Yunita et al., 2019). Metode *double flash steam* merupakan salah satu metode yang cocok digunakan dalam lapangan *hydrothermal reservoir*, metode ini menawarkan penambahan daya dengan memanfaatkan fluida yang diproduksi secara optimal. Metode ini baru digunakan pada lapangan Hatcobaru (Jepang), dan lapangan Krafla (Iceland). (Saptadji, 2018) Model yang akan dilakukan adalah terkait tentang strategi produksi dengan cara mengamati perolehan daya, penurunan *pressure* dan *temperature*. Model yang akan dibuat dapat memprediksi kinerja dari *reservoir* dengan berbagai strategi produksi terhadap waktu eksploitasi yang dilakukan.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung cadangan energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan pada lapangan *hydrothermal reservoir*.
2. Menentukan kapasitas pembangkit dengan metode *double flash steam* yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik di lapangan *hydrothermal reservoir* berdasarkan pertimbangan daya yang dihasilkan oleh sumur produksi yang ada.
3. Memprediksi kinerja reservoir panas bumi lapangan N untuk periode 30 tahun dan menentukan strategi produksi yang sesuai dengan kapasitas pembangkit yang didesign pada penelitian ini.



### 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini terbagi atas 2, yaitu manfaat untuk Mahasiswa, dan Universitas Islam Riau (Instansi)

#### A. Manfaat Untuk Mahasiswa

- 1) Sebagai bahan referensi dalam mengetahui kegiatan pengembangan lapangan *Hydrothermal Reservoir* dengan Menggunakan Metode *Double Flash Steam* dan Simulasi *Reservoir*.

#### B. Manfaat Untuk Universitas

- 2) *Software Tough2* dapat menjadi sumber pembelajaran bagi mahasiswa yang tertarik dalam simulasi *reservoir*, khususnya pada lapangan panas bumi.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan Masalah pada Penelitian ini hanya membahas tentang strategi produksi pada lapangan *Hydrothermal Reservoir*, tidak membahas tentang pengaruh sumur injeksi, tidak membahas tentang simulasi pemodelan *power plant* dari sumur produksi ke kapasitas daya pembangkit, tidak membahas metode dalam penentuan kapasitas daya pembangkit selain dari menggunakan metode *Double Flash Steam*, Serta tidak mempertimbangkan aspek keekonomian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Allah Subhanahu Wata'ala adalah pencipta alam semesta dengan segala isinya. Allah Subhanahu Wata'ala menurunkan Al – Qur'an sebagai pedoman dan petunjuk bagi manusia. Allah berfirman dalam Q.S Al – Maidah (5): 120 yang artinya “Kepunyaan Allah Subhanahu Wata'ala lah kerajaan langit dan bumi serta apa yang ada didalamnya; dan Dia Maha Kuasa atas segala Sesuatu. Al – Qur'an menjelaskan bahwa segala sesuatu yang ada di langit dan bumi merupakan karunia dari Allah Subhanahu Wata'ala untuk memenuhi segala kebutuhan manusia, termasuk panas bumi.

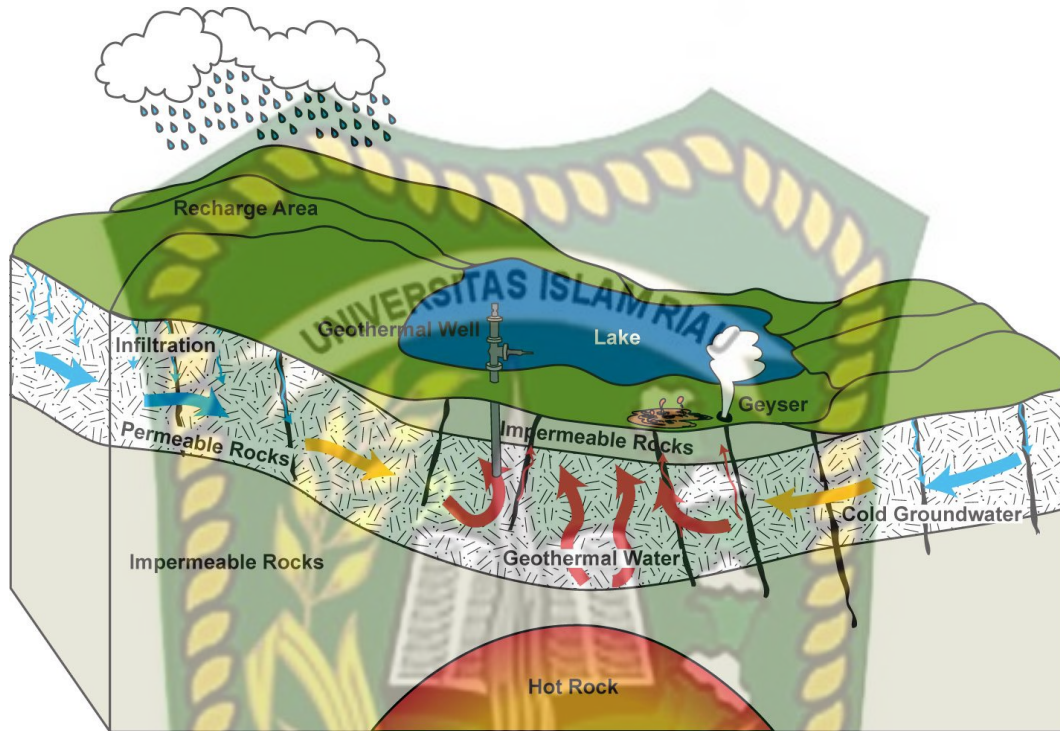
Maka sebagai Manusia yang berakal, manusia harus bisa menjaga dan memanfaatkan sumber daya alam yang telah Allah Subhanahu Wata'ala berikan dengan meningkatkan Keimanan dan Ketaqwaan kepada-Nya. Allah Subhanahu Wata'ala berfirman dalam Q.S Az- Zummar (39): 16 yang artinya “Bagi mereka lapisan – lapisan dari api diatas mereka dan dibawah mereka pula lapisan – lapisan dari api. Demikian lah Allah Subhanahu Wata'ala Mengancam hamba – hambaNya dengan (azab itu). Wahai hamba – hamba Ku, maka bertaqwalah kepadaKu”. Dari ayat diatas dapat dipahami bahwa manusia harus menjaga pemberian Allah Subhananhu Wata'ala dan meningkatkan kualitas Taqwa kepada-Nya.

#### 2.1 *Geothermal Energy System*

Energi panas bumi (*geothermal*) merupakan salah satu energi yang dapat dimanfaatkan oleh manusia. Energi ini berasal dari magma yang ada di dalam perut bumi. Saat ini, energi ini banyak dimanfaatkan dalam pemanfaatan pembangkit listrik tenaga panas (PLTP). Sudah sangat banyak negara yang memanfaatkan energi panas bumi tersebut, salah satunya adalah Indonesia (Yunita et al., 2019). Penggunaan PLTP di Indonesia belum banyak dikembangkan dan dimanfaatkan (Melysa & Fitrianti, 2017)

Sumber panas bumi di Indonesia berasal dari letak geografis Indonesia yang berada dalam wilayah *The Ring Of Fire*, dimana Indonesia terletak diantara 3 lempeng dunia yang menyebabkan banyak terbentuknya gunung api yang merupakan sumber dari energi panas bumi tersebut. Pada saat ini, Indonesia berada

di urutan ke – 4 dunia dengan potensi cadangan panas bumi terbesar. Jika dilihat dari lokasi penyebaran dan dari segi *temperature*, Indonesia berada di urutan ke – 2 dunia. (Mansoer & Idral, 2015)



**Gambar 2. 1** Siklus Pembentukan *Reservoir* Panas Bumi (Lund, 2007)

Pada Gambar diatas, energi panas bumi terbentuk dari siklus air hujan yang masuk ke dalam bumi melalui rekahan batuan, kemudian terkumpulkan dan terpanaskan oleh batuan panas. Batuan panas yang terdapat di dalam bumi merupakan material batuan yang memiliki *pressure* dan *temperature* yang tinggi dari proses magmatisasi. Karena air yang terpanaskan pada batuan panas mencapai titik didih, maka akan terjadi proses perubahan fasa dari air menjadi uap (Rashid, 2015).

Pada *reservoir* panas bumi, terdapat mineral penyusun batuan panas bumi, antara lain *Quartz*, *Alkali feldspar*, *Basalt*, *Granite* yang terdapat pada batuan beku, dan *Dry sand*, *Limestone* yang terbentuk akibat dari proses sedimentasi (Armstead, 2014).

Energi panas bumi memiliki 4 jenis *reservoir* (Grant & Bixley, 2011; Yunita et al., 2019), yaitu antara lain sebagai berikut:

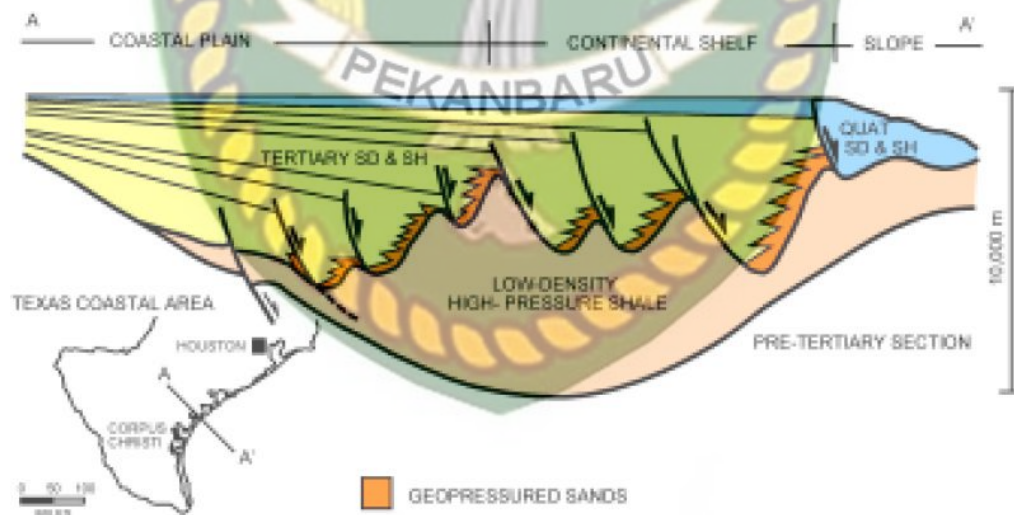
1. *Geopressured Reservoir*

*Geopressured reservoir* berasal dari formasi air asin yang memiliki *temperature* yang cukup tinggi yang terperangkap didalam lapisan batuan yang *permeable*, dan memiliki *pressure* yang jauh lebih besar daripada tekanan hidrostatik (Ronald DiPippo, 2015). Sistem *Geopressured reservoir* dapat dilihat pada gambar 2.1, dimana air asin yang terperangkap memiliki *pressure* yang sangat tinggi seringkali mengandung metana yang terlarut yang berpotensi untuk diekstraksi didalam formasi sedimen dengan kedalaman sekitar 3000-6000 m, dengan *temperature* berkisar antara 90 – 200°C. (Lund, 2007)

Untuk dapat memanfaatkan sumber energi *Geopressured reservoir* ini, terdapat 3 sifat penting yang harus diperhatikan, antara lain:

- a. *Pressure* yang sangat tinggi
- b. *Temperature* yang tinggi
- c. Metana yang terlarut

Meskipun sudah ada teknologi yang dapat mengeksplorasi sumber daya ini, pemanfaatan *Geopressured reservoir* secara ekonomi masih kurang bersaing (sangat sedikit). (R. DiPippo, 2012)



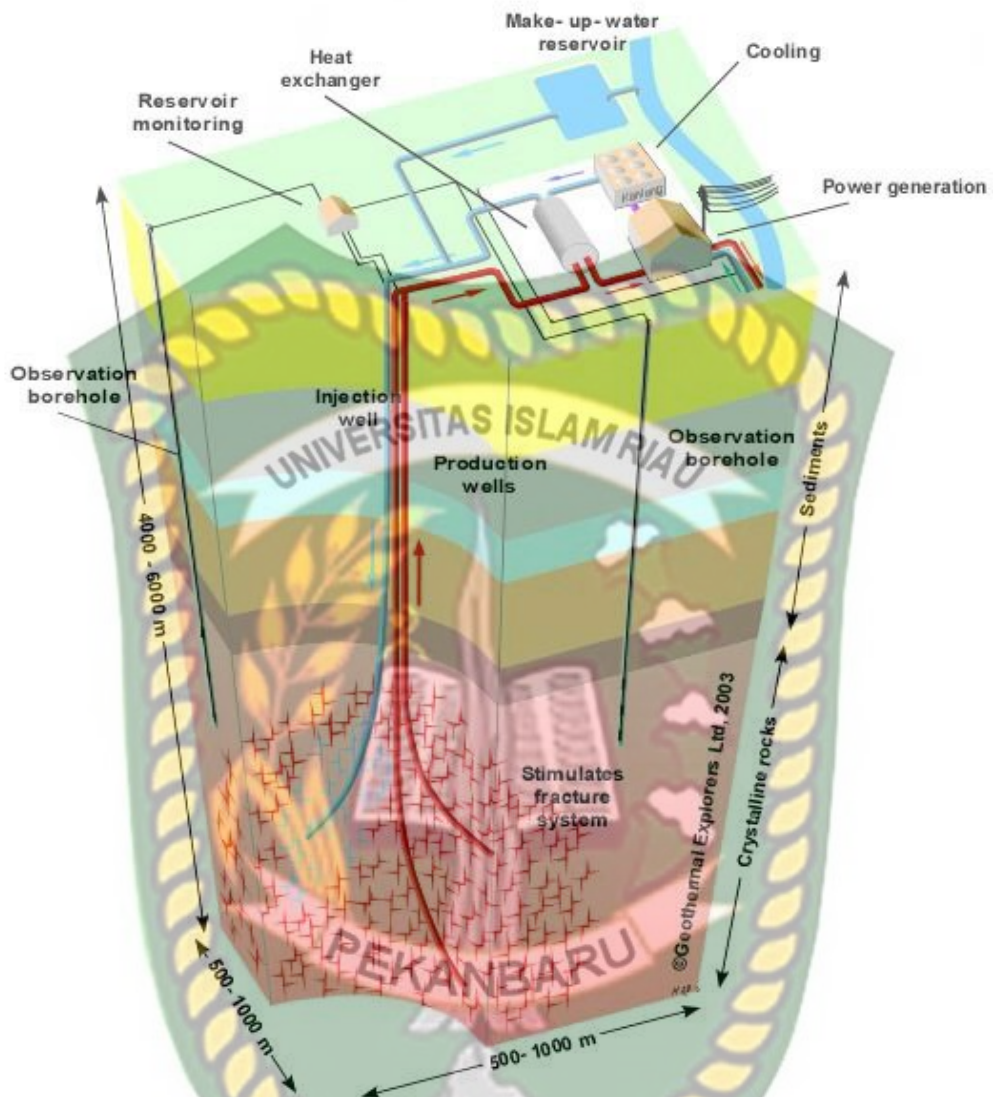
**Gambar 2. 2** Sistem *Geopressured Reservoir* (Lund, 2007)

## 2. *Hot Dry Rock Reservoir*

*Hot Dry Rock* (HDR) merupakan sistem panas bumi dimana magma hanya memanaskan batuan kering yang terdapat di atas *magma* tersebut yang menyebabkan batuan *reservoir* menjadi panas dan kering yang memiliki

*temperature* sekitar 150 – 290°C (Ronald DiPippo, 2015). *Hot Dry Rock* memiliki kedalaman yang cukup dangkal, yaitu <3000 m dan bantuannya bersifat *impermeable*. Untuk dapat memanfaatkan sumber daya ini, ditunjukkan pada gambar 2.2, dimana terdapat 2 sumur yang diletakkan pada batuan yang kering. Satu sumur digunakan untuk menginjeksikan air kedalam batuan *Hot Dry Rock* dan setelah air dipanaskan, uap yang dihasilkan akan disalurkan ke sumur produksi ke permukaan. (Ronald DiPippo, 2015)

Untuk dapat meningkatkan perpindahan panas antara batuan dan air, maka dapat dilakukan mekanisme *Hydrolic Fracturing*. Sebuah sumur injeksi dibor kedalam formasi hingga kedalaman yang sesuai dengan zona yang memiliki potensi. Air dingin yang diinjeksikan dengan *pressure* tinggi digunakan untuk membuka rekahan yang ada atau membuat retakan yang baru. Akibat dari retakan tersebut akan mengakibatkan batuan batuan kecil tersebut memanaskan air menjadi uap dengan lebih efektif. Setelah formasi mencapai keadaan *volume* dan permeabilitas yang cukup, sumur produksi yang telah dibor untuk mencegah terbentuknya zona *reservoir* baru terbentuk. (Ronald DiPippo, 2015)



**Gambar 2. 3** Sistem Pemanfaatan *Hot Dry Rock* (R. DiPippo, 2012)

### 3. Energi *Magma* (Batuan yang Melebur)

Energi *magma* merupakan sistem energi panas bumi yang memiliki sumber energi panas bumi terbesar, dimana batuan beku menjadi sumber energi panas (*heat source*) merupakan batuan cair yang memiliki *temperature* yang sangat tinggi, yaitu  $>600^{\circ}\text{C}$  dan terletak pada kedalam 3000 – 10000 m bahkan lebih dari 10000 m (Ronald DiPippo, 2015). Untuk dapat memanfaatkan sumber daya ini adalah dengan cara melakukan pengeboran sumur ke dalam magma, memasukkan pipa injeksi, dan menginjeksikan air dingin kedalam sumur dengan *pressure* yang tinggi. Cairann yang diinjeksikan tersebut akan memadatkan *magma* cair menjadi zat kaca yang akan retak dibawah tekanan *thermal*. Jika air dapat diproduksi ke

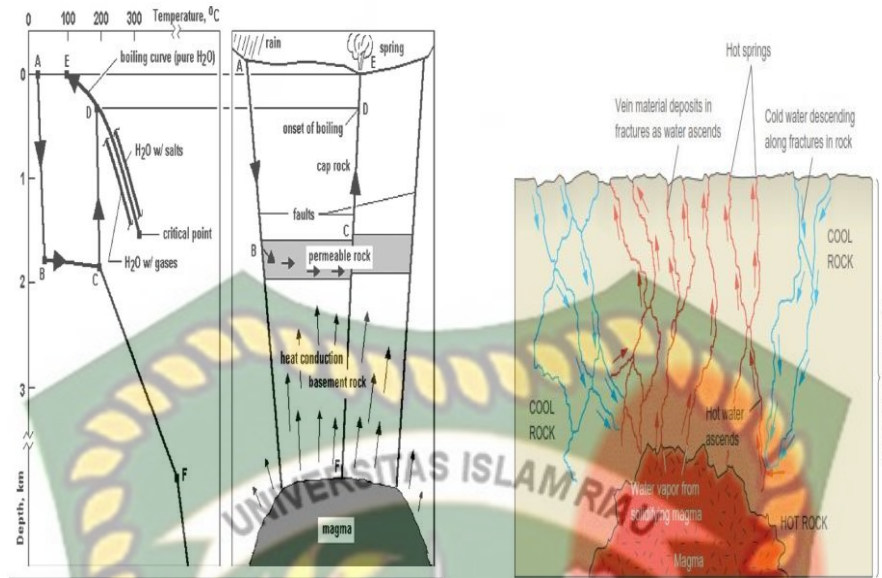
permukaan dengan melewati bagian kaca yang panas dan retak, air tersebut akan mencapai permukaan dan akan siap diproduksi dengan pembangkit tipe *Rankine*. Akan tetapi, dengan kemajuan teknologi saat ini, tidak dapat mengatasi panas dari sumber daya yang besar ini (R. DiPippo, 2012; Richard et al., 2013).

#### 4. *Hydrothermal Reservoir*

*Hydrothermal reservoir* merupakan *reservoir* panas bumi yang mengandung uap atau air panas yang terbentuk saat air masuk ke dalam *reservoir* panas bumi, yang kemudian terpanaskan oleh batuan sumber panas yang *fracture* atau *porous* (Richard et al., 2013). Terdapat 5 aspek penting untuk memanfaatkan sumber daya ini agar layak secara komersil, (R. DiPippo, 2012) yaitu:

- Memiliki sumber panas yang besar
- Memiliki *reservoir* yang *permeable*
- Memiliki sumber aliran air
- Memiliki *caprock* pada bagian atas
- Memiliki mekanisme pengisian air kembali yang memadai ke *reservoir*

Proses dari *hydrothermal reservoir* ditunjukkan pada gambar 2.3. Point A terdapat sumber air dari permukaan berupa air hujan yang menjadi sumber dari pengisian dan meresap melalui patahan sehingga masuk kedalam formasi dengan lapisan yang *permeable* pada point B. Point B merupakan batuan *permeable* yang terpanaskan oleh sumber batuan panas sehingga cairan yang bersentuhan akan memanaskan terjadi penurunan densitas serta perubahan menjadi fase uap dan cenderung naik ke permukaan. Jika terdapat sesar besar pada point C maka uap akan naik ke permukaan mengakibatkan perubahan tekanan dan mencapai titik didihnya pada point D. Kemudian uap panas yang muncul ke permukaan sebagai fumarol, mata air panas, dan kolam air panas pada point E menjadi indikasi bahwa terdapat *reservoir* panas bumi pada bagian bawah manifestasi tersebut (Lund, 2007)(R. DiPippo, 2012)



**Gambar 2. 4** Sistem *Hydrothermal Reservoir* (Ronald DiPippo, 2015)

Menurut (Diaz et al., 2015), dalam *hydrothermal reservoir*, terdapat 2 mekanisme *reservoir*, yaitu:

1. Sistem *Hydrothermal* dominasi uap, pada lapangan ini, fluida yang diproduksi merupakan uap yang terbentuk pada zona *reservoir* dangkal. Zona uap terbentuk disebabkan air yang berada pada zona *reservoir* bertekanan tinggi terpanaskan oleh *magma* sehingga uap yang terbentuk masuk melalui rekahan pada batuan yang membentuk zona *steam cap*. Contoh lapangan yang menerapkan mekanisme ini adalah lapangan Kamojang, Drajat (Diaz et al., 2015), dan Lapangan Lardeleo (Arias et al., 2010).
2. Sistem *Hydrothermal* dominasi air, pada lapangan ini, fluida yang diproduksi merupakan air yang mengandung uap panas yang terbentuk pada zona *reservoir* dalam. Pada mekanisme ini, penurunan *pressure* dan *temperature* harus diperhatikan agar kinerja *reservoir* panas bumi tetap terjaga dengan baik. Contoh lapangan yang menerapkan mekanisme ini adalah lapangan Ulubelu, Wayang Windu, (Pratama & Saptadji, 2018), dan lapangan Mori (Hanano et al., 2005)



**Tabel 2. 1** Mekanisme *Hydrothermal Reservoir*

Mekanisme		<i>Temperature</i>	<i>Enthalpy</i> Produksi
Dominasi Uap		$250 < T < 330 \text{ }^\circ\text{C}$	$2600 < h < 2800 \text{ kJ/Kg}$
Dominasi Air	<i>Enthalpy</i> Rendah	$220 < T < 250 \text{ }^\circ\text{C}$	$943 < h < 1100 \text{ kJ/Kg}$
	<i>Enthalpy</i> Sedang	$250 < T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$1100 < h < 1500 \text{ kJ/Kg}$
	<i>Enthalpy</i> Tinggi	$250 < T < 330 \text{ }^\circ\text{C}$	$1500 < h < 2600 \text{ kJ/Kg}$

Sumber: (Ciriaco et al., 2020; Diaz et al., 2015)

## 2.2 Potensi Cadangan Panas Bumi

Terdapat beberapa metode dalam penentuan potensi cadangan panas bumi, metode perbandingan dan metode *volumetric* merupakan metode yang paling sering digunakan dalam penentuan potensi cadangan panas bumi.

### 1. Metode *Volumetric*

Merupakan metode umum yang digunakan dalam menghitung potensi cadangan panas bumi. Perhitungan menggunakan metode *volumetric* dilakukan berdasarkan kandungan energi panas yang terdapat didalam batuan dan *fluida* (Novriansyah, 2013). Dalam metode ini diperlukan beberapa data, antara lain sebagai berikut:

- Data Luas *Reservoir*
- Ketebalan *Reservoir*
- *Temperature Reservoir*
- Porositas, dan Saturasi air/uap
- Densitas Batuan
- Daya hantar panas batuan
- Densitas *Fluida*
- Energi dalam *Fluida*

### 2. Metode Perbandingan

Merupakan metode yang digunakan dengan syarat penelitian suatu lapangan panas bumi baru sampai pada tahap pelamparan struktur geologi (tahap awal eksplorasi), dan penyebaran manifestasi dipermukaan (Saptadji, 2018). Pada metode ini, belum ada data yang dapat dijadikan sebagai parameter dalam memperkirakan pototensi cadangan panas bumi, dan pada metode ini, potensi

cadangan panas bumi diperkirakan melalui kemiripan kondisi geologi pada lapangan lainnya.

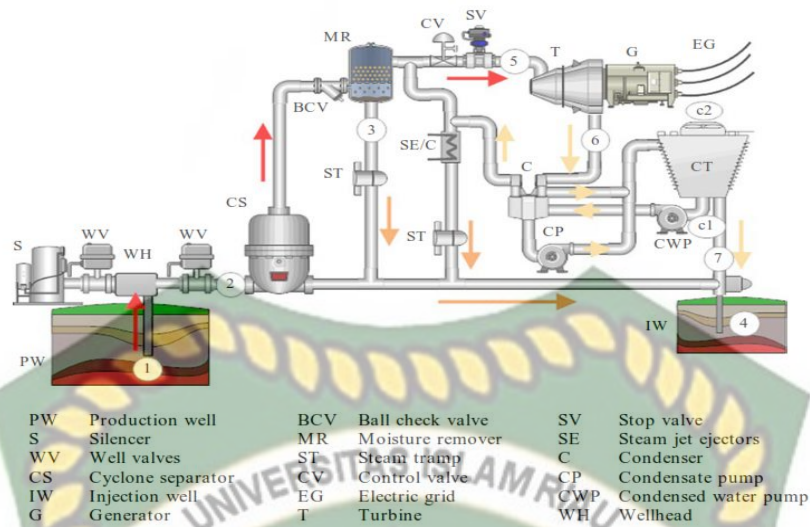
### 2.3 Kapasitas Daya Pembangkit Panas Bumi

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi pada dasarnya memiliki kesaamaan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap, perbedaannya terletak pada sumber tenaga yang diperoleh oleh kedua pembangkit tersebut. PLTU dibuat menggunakan energi batubara (*boiler*), sedangkan PLTP dibuat menggunakan energi panas bumi. Pembangkit listrik tenaga panas bumi dibagi menjadi 2 proses, yang dilihat dari jenis *fluida* yang dihasilkan, yaitu 1 fasa (uap) dan 2 fasa (uap dan air)(Saptadji, 2018). Apabila *fluida* yang dihasilkan berupa uap, maka *fluida* tersebut dapat langsung dialirkan ke *turbine* dan kemudian *turbine* akan langsung mengubah energi panas bumi tersebut menjadi energi gerak yang akan berfungsi untuk memutar *generator* sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Dan apabila *fluida* yang dihasilkan dalam bentuk 2 fasa (uap dan air), maka diperlukan proses pemisahan anatar kedua *fluida* tersebut. Pemisahan kedua *fluida* terjadi di separator, kemudian fraksi dari masing – masing *fluida* yang akan mengalir menuju *turbine* (R. DiPippo, 2012).

Terdapat berbagai macam sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi yang sudah diterapkan di lapangan. Pada penelitian ini, peneliti hanya membahas tentang pembangkit dengan sistem pembangkit 2 fasa dominasi air (Colpan, 2021), antara lain sebagai berikut:

#### 1. *Single Flash Steam*

Pada kapasitas pembangkit *single flash steam*, sebelum masuk ke *turbine*, *fluida* dimasukkan pada separator, pada separator *fluida* dipisahkan menjadi 2 fasa, fasa uap dialirkan langsung ke *turbine*, sedangkan fasa air dialirkan ke kolam penampungan atau bisa langsung dialirkan ke sumur injeksi. Setelah *fluida* uap masuk ke *turbine*, maka akan dialirkan ke *generator* untuk menghasilkan energi listrik.

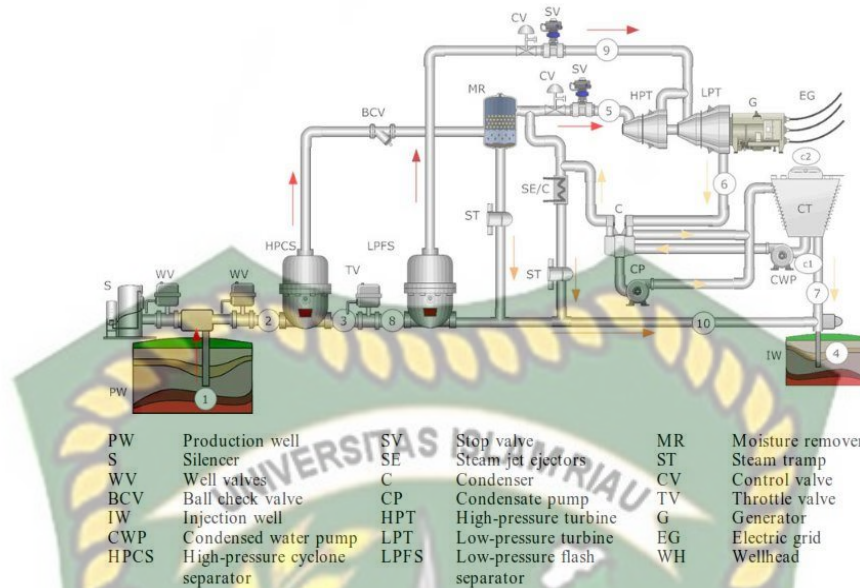


**Gambar 2. 5** Skema Pembangkit *Single Flash Steam* (Colpan, 2021)

*Fluida reservoir* yang diproduksi ke permukaan biasanya mengalami penurunan *pressure* dan *temperature*, dimana *fluida* yang diproduksi tersebut berubah fasa dari fasa air menjadi fa uap. Asumsi yang digunakan pada proses ini dimanakan *isenthalpic* dengan kesetimbangan termodinamika tetap terjaga. Proses tersebut menandakan bahwa tidak terjadi kehilangan panas dari sistem ke lingkungan dan penurunan *temperature* yang terjadi karena dipakainya sebagian panas yayang ada untuk merubah fasa dari fluida.

Proses penguapan yang terjadi karena pada zona produksi *reservoir* dipasang *slotted linear*. *Slotted linear* memiliki lubang – lubang yang memungkinkan *throttling process*, dimana selama proses terjadi nilai *enthalpy* dianggap konstan.

## 2. *Double Flash Steam*

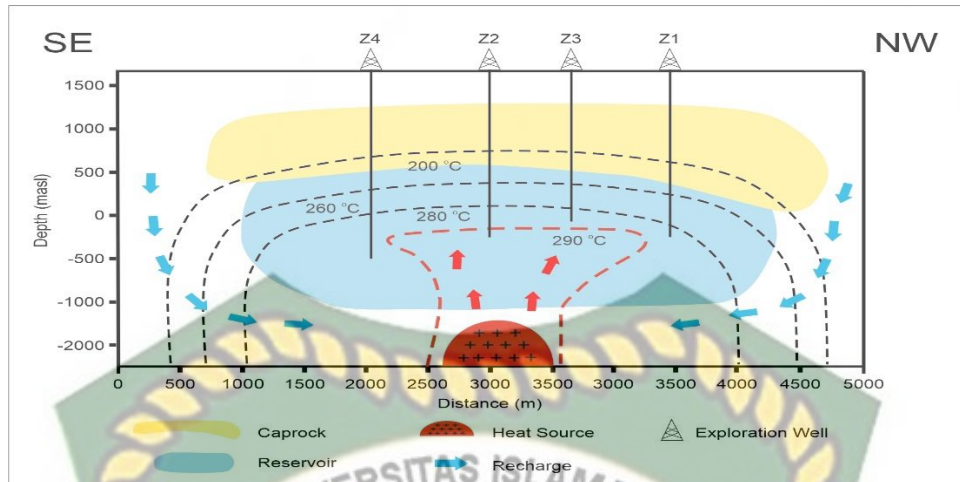


**Gambar 2. 6** Skema Pembangkit *Double Flash Steam* (Colpan, 2021)

Pada kapasitas pembangkit *double flash steam*, *fluida* yang diproduksi ke permukaan dan terjadi proses *isenthalpic* yang telah dijelaskan sebelumnya, dan sebelum masuk ke *turbine*, *fluida* dimasukkan pada separator, pada separator *fluida* dipisahkan menjadi 2 fasa, fasa uap dialirkan langsung ke *High Pressure Turbine*, sedangkan fasa air dialirkan ke *flasher* sebelum masuk ke *Low Pressure Turbine*. Setelah *fluida* uap masuk ke *turbine*, maka akan dialirkan ke *generator* untuk menghasilkan energi listrik. (Rashid, 2015)

#### 2.4 Konseptual Model

Konseptual model merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam membuat model simulasi. Dimana model ini adalah konsep yang ada pada sistem panas bumi dua fasa, apakah *reservoir* dari lapangan tersebut mengandung pasokan uap atau air panas. Konseptual model biasanya merupakan model yang memiliki gambaran dari suatu sistem panas bumi, dimana pada model ini terdapat gambaran dari geologi *reservoir* (zona *caprock*, *ground water*, *recharge area*, *heat source*), persebaran data *pressure* dan *temperature* (O'Sullivan et al., 2000; Richard et al., 2013).



**Gambar 2. 7** Konseptual Model Lapangan N (Ashat et al., 2019)

## 2.5 State Of The Art

Pada penelitian terkait yang telah dilakukan, terdapat jurnal – jurnal yang diperoleh dari *Science Direct* dan *International Geothermal Association*. Jurnal yang diperoleh tersebut terkait dengan menentukan strategi optimal sumur produksi pada lapangan panas bumi.

Menurut (Pratama & Saptadji, 2016) lapangan Wayang Windu, Wairakei, Tongonan, Awibengkok memiliki jenis reservoir panas bumi yang sama. Pada penelitian yang dilakukan, terdapat 6 sumur produksi dengan 4 strategi yang dilakukan dalam penentuan sumur produksi pada 2 bagian *reservoir* yang berbeda, yaitu *steam cap* dan *brine reservoir*. Analisis strategi yang digunakan pertama kali adalah meletakkan sumur produksi pada zona *steam cap* secara keseluruhan. Analisis strategi yang kedua adalah meletakkan sumur produksi pada zona *brine reservoir* secara keseluruhan. Analisis strategi ketiga adalah meletakkan sumur produksi diantara zona *steam cap* dan *brine reservoir*. Analisis strategi yang keempat adalah meletakkan 25% pada zona *steam cap* dan 75% pada zona *brine reservoir*. Hasil terbaik yang diperoleh dari keempat strategi yang digunakan adalah strategi ke 4, dimana perolehan hasil yang dicapai mencapai 220MW dan dapat dimanfaatkan selama 30 tahun.

Menurut (Lia Putriyana, 2018), pada lapangan Dolok Marawa merupakan lapangan dengan *system reservoir* dua fasa, dimana lapangan Dolok Marawa memiliki *temperature reservoir* yang tinggi, yaitu sekitar  $\pm 180^{\circ}\text{C}$  yang terletak pada kedalaman 600m. Pada penelitian ini, terdapat 2 skenario dengan laju produksi yang

sama yaitu 80 kg/s, skenario pertama adalah Sumur produksi yang akan dibuat diletakkan pada tempat yang tidak jauh atau dekat. Sedangkan skenario kedua adalah meletakkan sumur produksi secara berjauhan. Dari kedua skenario yang ada, maka dihitung daya yang dihasilkan pada masing masing skenario yang dibuat. Scenarion 2 merupakan skenario yang memiliki daya pembangkit yang paling tinggi, yaitu sebesar 20.97 MW yang dapat diproduksi selama 30 tahun.

Menurut (Akbar & Khasani, 2017) Software Tough2 berhasil mendapatkan mempresentasikan model *reservoir* panas bumi. Model yang didapatkan berasal dari beberapa integrasi data dan inisialisasi dalam membuat model yang sesuai dengan kondisi lapangan. Dan simulasi dalam menentukan *natural state*, dapat diketahui letak distribusi permeabilitas, *temperature*, dan *pressure*. Dalam menentukan *state condition*, berkisar pada jangka waktu 1 juta tahun.

Menurut (Iqbal, Kurniawan, Sutopo, Heru Berlian Pratama, 2018) Pada lapangan panas bumi Ulumbu, Nusa Tenggara Timur, Penggunaan Software Tough 2 digunakan dalam melakukan penentuan *Initial State* pada lapangan tersebut. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah kondisi lapangan Ulumbu telah berhasil mencerminkan sifat dari kondisi *reservoir* secara lebih tepat dan akurat.

Menurut (Wirawan, 2019) pada lapangan panas bumi Dieng, Jawa Tengah, pada penelitian ini, penggunaan Software Tough 2 digunakan dalam pengaruh sumur injeksi terhadap *reservoir* panas bumi Dieng. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah tekanan yang didapatkan mengalami penurunan yang sangat besar sehingga dapat menyebabkan tekanan di *reservoir* menjadi kecil dan *fluida* tidak dapat diproduksi.

Menurut (Ertunc & Parlaktuna, 2013) pada lapangan Balçova, Turkey, memprediksi tentang kinerja dari *reservoir* pada lapangan tersebut dengan menggunakan Software Tough 2. Langkah awal yang dilakukan adalah mencocokkan kondisi alami *reservoir* dengan riwayat produksi pada lapangan. Setelah dilakukan pencocokan, model yang diperoleh menunjukkan representasi yang baik, yang dapat digunakan untuk memprediksi eksploitasi dari lapangan tersebut. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah lapangan Balçova dapat bertahan hingga 15 tahun kedepan dengan skema produksi/injeksi yang telah diterapkan.

Menurut (Zeyghami, 2010) Kapasitas daya pembangkit menggunakan *flash* merupakan metode yang umum digunakan untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua metode kapasitas daya pembangkit menggunakan *flash*, yaitu *single flash steam* dan *double flash steam*. Kapasitas daya pembangkit di desain mulai dari kapasitas daya pembangkit sebesar 5 hingga 150 MW. Hasil dari penelitian ini adalah penggunaan *double flash steam* menghasilkan kapasitas daya pembangkit yang lebih tinggi yaitu sebesar 19-26% yang meningkat seiring dengan fluida produksi yang didapatkan,

Menurut (Hamdani et al., 2020) lapangan Lumut Balai merupakan lapangan *hydrothermal reservoir* yang ditandai dengan adanya *fumarole* dan mata air panas. Penelitian ini memperbarui model konseptual lapangan. Pengukuran *downhole* menunjukkan bahwa terdapat *reservoir* yang berdominasi air dengan *temperature* sebesar 240 – 260°C. Penelitian ini menggunakan *Software Tough2* dalam melakukan perbaruan model konseptual lapangan Lumut Balai, dimana data yang tersedia dikalibrasikan kedalam bentuk model simulasi. Hasil dari penelitian ini berhasil mendapatkan *update* dari model konseptual lapangan Lumut Balai.

Menurut (Ashat et al., 2019) lapangan panas bumi Dieng telah beroperasi selama 17 tahun dengan kapasitas 60MW. Pada penelitian ini, lapangan Dieng memiliki target dengan menambah kapasitas daya sebesar 2×55MW. Dengan tujuan pengembangan tersebut, model numerik digunakan sebagai bahan evaluasi data permeabilitas awal dan persebaran *temperature* yang berguna untuk mengetahui kinerja dari *reservoir* panas bumi dimasa yang akan datang. Pada penelitian ini, model numerik terbaru menggunakan *Software Tough2* dengan *EOS1*. Hasil studi pada pemodelan *reservoir* menggunakan *Software Tough2* telah berhasil dan sesuai dengan kondisi alami, serta model telah mampu menilai persebaran permeabilitas rekahan mulai dari 30 hingga 100 mD.

Menurut (Mulyadi & Ashat, 2011) *Software Tough2* digunakan dalam melakukan pemodelan lapangan Wayang Windu. Pada penelitian ini, pemodelan lapangan Wayang Windu dilakukan dengan membuat skenario kapasitas pembangkit sebesar 220MW selama 30 tahun. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah pemodelan kondisi lapangan Wayang Windu sesuai dengan model

konseptual. Simulasi numerik yang dilakukan dalam membuat skenario 220MW selama 30 tahun dapat terpenuhi dengan baik.



Dokumen ini adalah Arsip Miik :  
**Perpustakaan Universitas Islam Riau**



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah studi literatur. Dimana penelitian ini digunakan untuk membuat perencanaan pengembangan lapangan dengan melakukan simulasi *reservoir* panas bumi yang menggunakan *Software Tough2* (Lia Putriyana, 2018). *Software Tough2* merupakan *software* atau program simulasi numerik yang digunakan dalam pembuatan model lapangan berbentuk dimensi, aliran *fluida* multi fasa dan multi komponen pada media yang memiliki *fracture* serta digunakan dalam pembuatan sistem non *isothermal* (Pruess, K., Curtis M. Oldenburg, 2012).

Adapun langkah – langkah yang perlu dilakukan dalam proses pembuatan model pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Langkah awal dalam pembuatan model dalam penelitian ini adalah penentuan karakteristik *reservoir* dengan meninjau *reservoir* panas bumi *water dominated* yang berdasarkan data – data dari hasil survei yang kemudian dapat dibangun menjadi model konseptual. Model konseptual digunakan sebagai gambaran awal dalam menggambarkan kondisi *reservoir* secara *actual*.
2. Langkah selanjutnya adalah mengembangkan model konseptual menjadi model *geometri* berupa pemilihan jenis *EOS* dan tipe dari *mesh*.
3. Langkah selanjutnya adalah menentukan jenis properti batuan dan kondisi dari *boundary* (batas) yang ada pada model yang telah dibuat. Dimana langkah ini bertujuan dalam menentukan kondisi *natural state*, yaitu kondisi awal dari proses terbentuknya lapangan panas bumi yang disesuaikan dengan data *pressure* dan *temperature*.

Dalam mendapatkan kondisi *natural state* dan pengimputan data dalam model konseptual sangat rumit, hal ini dikarenakan dibutuhkannya validasi dengan merubah beberapa parameter seperti data penyebaran *pressure* dan *temperature reservoir*, properti batuan dan letak dari sumber panas. Data yang diperlukan tersebut harus diperbarui untuk mendapatkan kondisi model yang akan digunakan

dapat mendeskripsikan kondisi *actual* dari lapangan panas bumi (O'Sullivan et al., 2001).

### 3.2 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan adalah Simulasi *Reservoir* pada lapangan *Hydrothermal Reservoir*. Teknik pengambilan data pada penelitian ini menggunakan data sekunder. Data yang diperlukan selama melakukan simulasi adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1 Pembuatan Model Penelitian

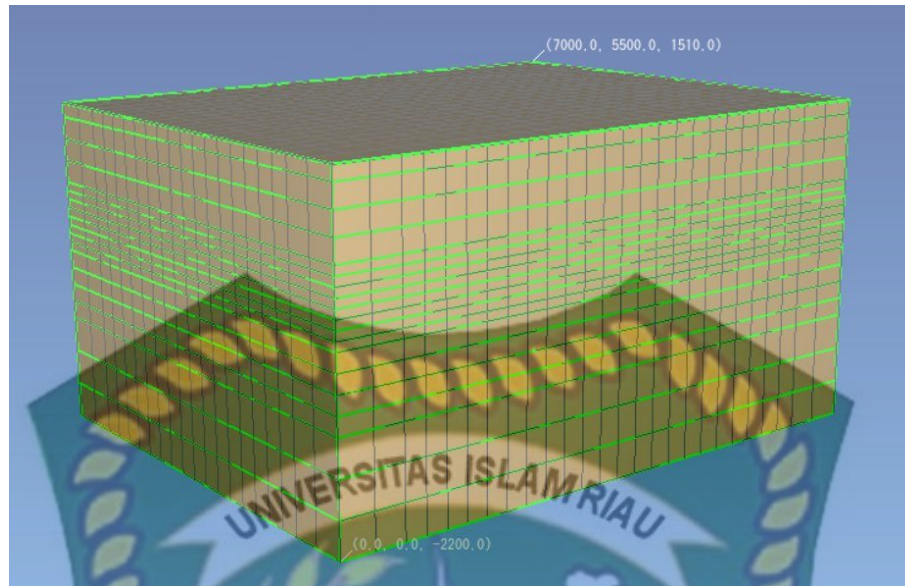
##### 1. Pembuatan *Grid Mesh* Model

Model *grid mesh* ini dikembangkan secara tiga dimensi dengan total luas 38.5 km<sup>2</sup> atau sama dengan 7 km × 5.5 km dengan elevasi kedalaman mulai dari 1510 mdpl sampai dengan -2200 mdpl atau memiliki ketebalan total 3710 m, dan memiliki total *grid blocks* sebanyak 10920 (26×21×20) (Marjuwan et al., 2016). Model ini menggunakan tipe *EOS 1*, dan untuk menyederhanakan model ini menggunakan sistem porositas tunggal (Supijo et al., 2018). Data diatas dapat dilihat dari table 3.1 dibawah ini:

**Tabel 3. 1** *Grid Blocks Properties*

Direction (X, Y)	<i>Grid Blocks</i>	Size (m)
X	1	400
X	1	350
X	22	250
X	1	350
X	1	400
Y	1	400
Y	1	350
Y	16	250
Y	1	350
Y	1	400

*Sumber:* (Hidayat et al., 2016; Nizami et al., 2016)



**Gambar 3. 1** Model Simulasi 3 Dimensi (Marjuwan et al., 2016)

## 2. Pembuatan *Layer Properties*

Pada model penelitian ini memiliki 20 lapisan yang terdiri dari lapisan *atmosfer*, *ground water*, *caprock*, *reservoir*, dan *basement rock*. Pada lapisan *atmosfer* dan *ground water*, masing – masing lapisan memiliki ketebalan 160 m, lapisan *caprock* memiliki 3 lapisan dengan ketebalan 750, lapisan *reservoir* memiliki 12 lapisan dengan ketebalan 16000 m, dan lapisan *basement rock* memiliki ketebalan 1200 m yang diletakkan pada bagian paling bawah dari model. Pada lapisan paling bawah *basement rock*, diletakkan sebagai tempat dari *heat source* (sumber panas), dengan begitu perubahan *pressure* dan *temperature* tidak terjadi (Pratama & Saptadji, 2016). Data *layer properties* secara rinci dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut ini:

**Tabel 3. 2** *Layer Properties*

<i>Layer</i>	<i>Top, Bottom</i> (masl)	<i>Layer</i>	<i>Top, Bottom</i> (masl)
<i>Atmosfer</i>	1510, 1500	<i>Reservoir 6</i>	100, 0
<i>Ground Water</i>	1500, 1350	<i>Reservoir 7</i>	0, -100
<i>Caprock 1</i>	1350, 1100	<i>Reservoir 8</i>	-100, -200
<i>Caprock 2</i>	1100, 850	<i>Reservoir 9</i>	-200, -400

<i>Caprock 3</i>	850, 600	<i>Reservoir 10</i>	-400, -600
<i>Reservoir 1</i>	600, 500	<i>Reservoir 11</i>	-600, -800
<i>Reservoir 2</i>	500, 400	<i>Reservoir 12</i>	-800, -1000
<i>Reservoir 3</i>	400, 300	<i>Basement Rock 1</i>	-1000, -1400
<i>Reservoir 4</i>	300, 200	<i>Basement Rock 2</i>	-1400, -1800
<i>Reservoir 5</i>	200, 100	<i>Basement Rock 3</i>	-1800, -2200

Sumber: (Nizami et al., 2016)

### 3. Pembuatan *Material Properties*

Pada pembuatan *material properties*, permeabilitas merupakan sifat *material* paling utama untuk mengetahui kondisi alami dalam mengembangkan lapangan panas bumi. Pada penelitian ini parameter permeabilitas berfungsi untuk mengontrol aliran *fluida* pada sistem lapangan panas bumi, hal ini disebabkan karena permeabilitas dapat berpengaruh terhadap kemampuan *fluida* untuk dapat mengalir pada batuan yang memiliki pori (*permeable*) (Supijo et al., 2019). *Fluida* yang terdapat pada batuan *permeable* akan memungkinkan proses perpindahan panas melalui proses konveksi yang akan mempengaruhi *pressure* dan *temperature* sumur, arah perpindahan panas, dan penyebaran *temperature* yang ada di *reservoir* (Nizami & Pratama, 2016). Dalam menemukan tahap *natural state*, model ini menggunakan *trial and error* pada parameter permeabilitas (Ashat et al., 2019). Data pembuatan *material properties* dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut:

**Tabel 3. 3** Data *Material Properties*

<i>Material</i>	Warna	Porositas	Permeabilitas (m <sup>2</sup> )			Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Kapasitas Panas Batuan (W/mK)
			X	Y	Z		
<i>Atmosfer</i>		0.99	6.0E-14	6.0E-14	2600	2.0	
<i>Ground Water</i>		0.07	5.0E-15	5.0E-15	2600	2.0	
<i>Caprock</i>		0.05	5.0E-17	5.0E-17	2600	2.0	

<i>Side Boundary</i>		0.05	1.0E-18	1.0E-18	2600	2.0
<i>Reservoir1</i>		0.1	4.0E-14	5.0E-15	2700	2.1
<i>Reservoir2</i>		0.1	3.0E-14	4.0E-15	2700	2.1
<i>Reservoir3</i>		0.1	5.0E-14	3.0E-15	2700	2.0
<i>Basement Rock</i>		0.1	8.0E-14	8.0E-14	2700	2.1
<i>Heat Source</i>		0.15	1.0E-13	1.0E-13	2700	2.1

Sumber: (Pratama & Saptadji, 2018; Supijo et al., 2019)

#### 4. **Boundary Condition**

##### a) *Top Boundary*

Merupakan kondisi lapangan pada bagian atas dari model yang merupakan lapisan *atmosfer* dengan tekanan 1 bar ( $1.01 \times 10^5$  Pa) dan *temperature* 25°C (Iqbal, Kurniawan, Sutopo, Heru Berlian Pratama, 2018; Nizami et al., 2016; Lia Putriyana & Soekarno, 2016).

##### b) *Side Boundary*

Bagian pada model yang memiliki nilai permeabilitas sekitar  $1 \times 10^{-17}$  m<sup>2</sup> atau 0.001 *milidarcy*, dan *volume factor* sebesar  $1 \times 10^{20}$ .

##### c) *Bottom Boundary*

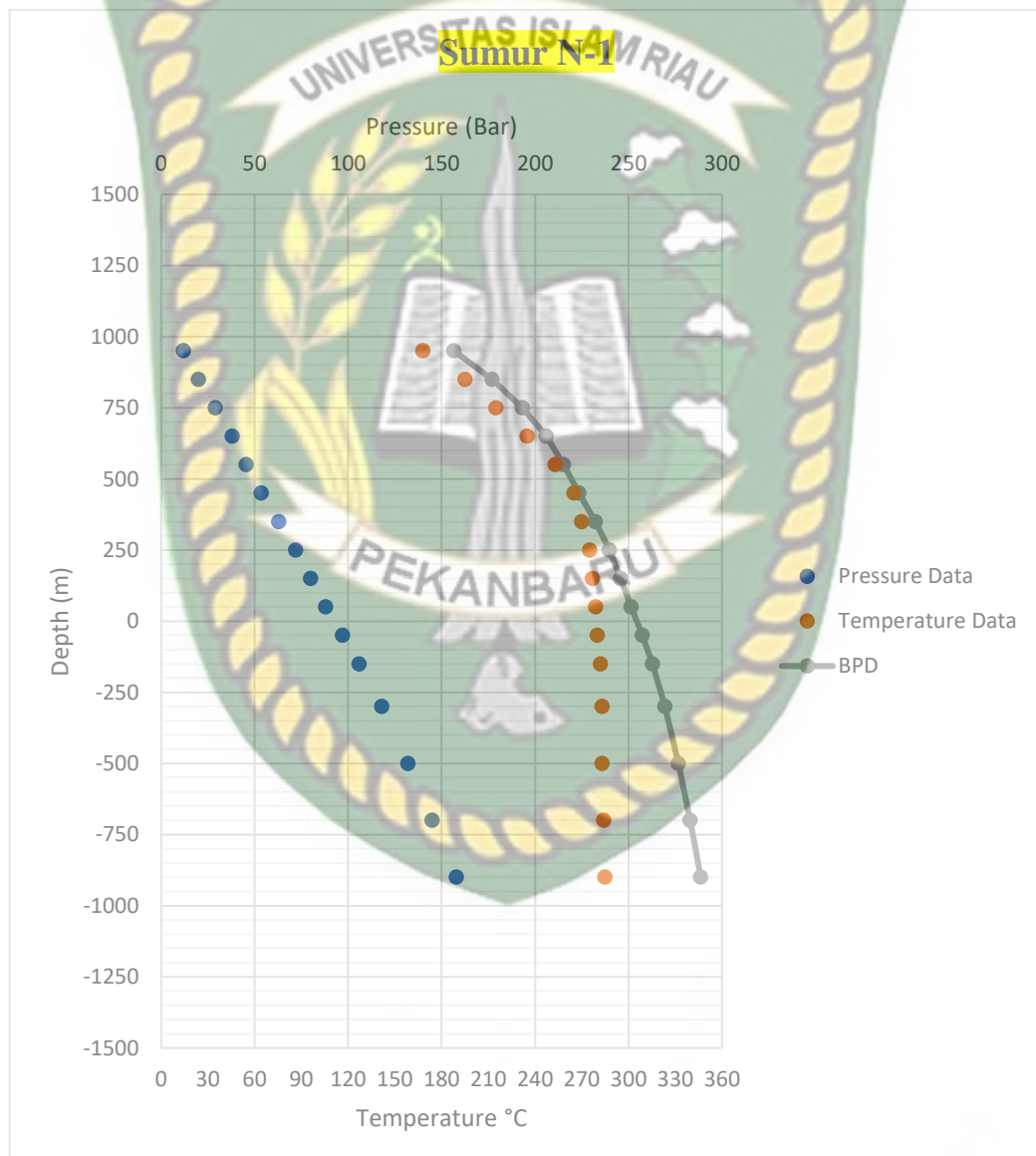
Merupakan kondisi lapangan pada bagian paling bawah dari model yang merupakan tempat sumber panas dan memiliki *pressure* dan *temperature* yang lebih besar daripada daerah sekitarnya. *Pressure* pada lapisan ini diasumsikan sekitar  $2.48 \times 10^7$  Pa (248 bar) dan *temperature* sekitar 300°C.

#### 5. **Natural State**

Tahap *Natural State* merupakan tahap dalam mencari kondisi *actual* lapangan panas bumi. Dimana pada model ini waktu yang di perlukan dalam penentuan *natural state* adalah 1 juta tahun.

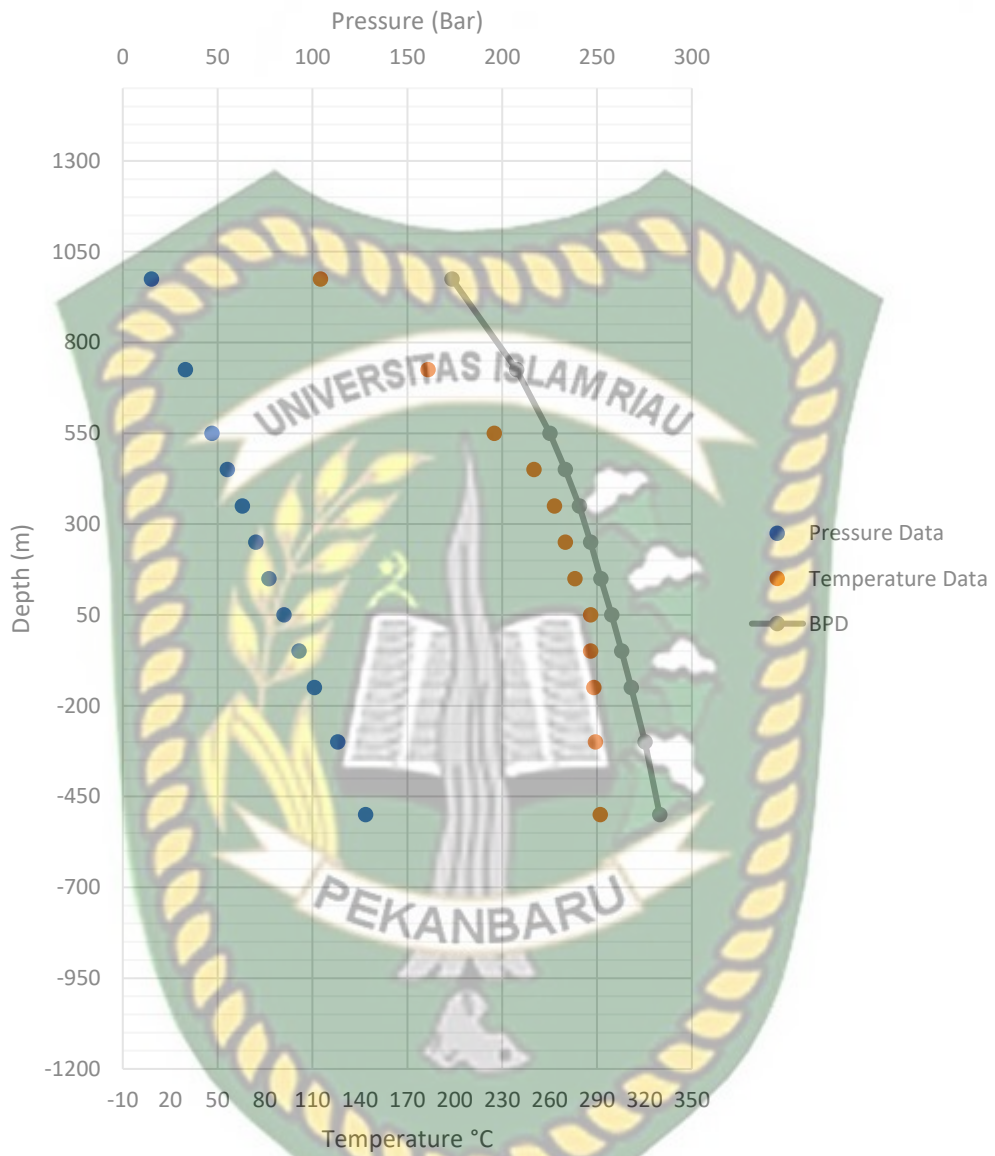
## 6. Matching Pressure and Temperature

Pada penelitian ini, dilakukan tahap pencocokan data *pressure* dan *temperature* yang didapatkan dari beberapa referensi yang berkaitan dengan lapangan *Hydrothermal Reservoir* (Ashat et al., 2019; Nizami & Pratama, 2016). Pada grafik 3.1, 3.2, 3.3, dan 3.4 dapat dilihat data *pressure* dan *temperature* sebagai berikut:



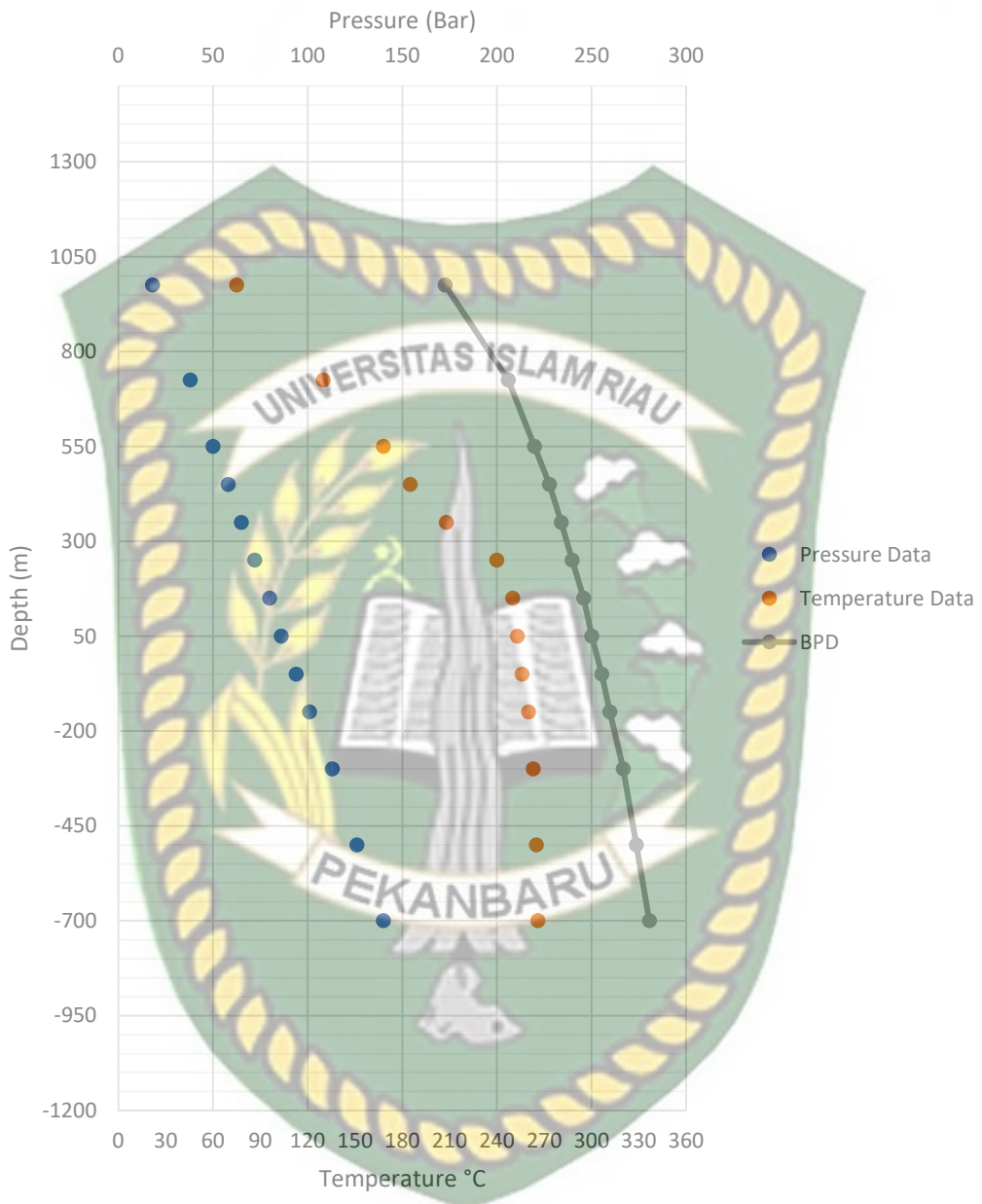
Grafik 3. 1 Data P&T Sumur N-1

**Sumur N-2**



**Grafik 3. 2 Data P&T Sumur N-2**

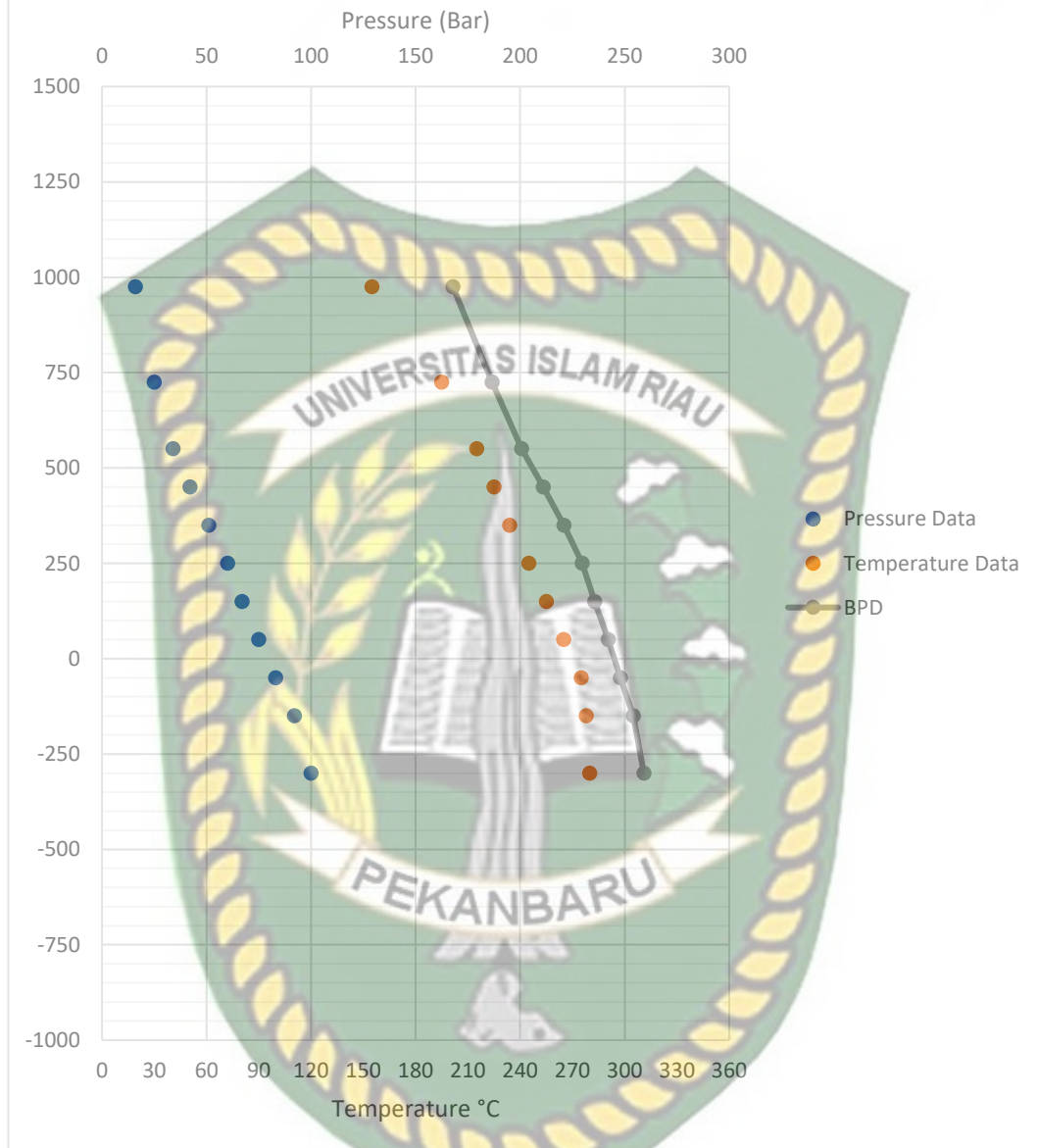
**Sumur N-3**



**Grafik 3. 3** Data P&T Sumur N-3



### Sumur N-4



Grafik 3. 4 Data Sumur N-4

### 3.2.2 Potensi Cadangan Lapangan N

Potensi cadangan panas bumi yang terkandung pada lapangan N dihitung dengan menggunakan metode *volumetric* (Ciriaco et al., 2020; Novriansyah, 2013). Dalam penentuan potensi cadangan menggunakan metode *volumetric* didasari pada kandungan energi panas yang terdapat didalam batuan dan *fluida* (uap dan air), sebagai berikut:

1. Menghitung nilai dari kandungan panas yang terdapat pada *reservoir* pada tahap awal (*Initial*) dan tahap akhir (*Final*) dengan menggunakan persamaan berikut:

$$H_{ei} = A \times h \times [(1 - \Phi) \times \rho_r \times c_r \times T_i + \Phi \times (S_L \times \rho_L \times u_L + S_V \times \rho_V \times u_V)_i] \quad (3.1)$$

$$H_{ef} = A \times h \times [(1 - \Phi) \times \rho_r \times c_r \times T_f + \Phi \times (S_L \times \rho_L \times u_L + S_V \times \rho_V \times u_V)_f] \quad (3.2)$$

2. Menghitung energi maksimum yang dapat digunakan dengan persamaan berikut:

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (3.3)$$

3. Menghitung energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan dengan asumsi *recovery factor* pada waktu tertentu dengan persamaan berikut:

$$H_{de} = R_f \times H_{th} \quad (3.4)$$

$$R_f = \left( \frac{T_i - T_f}{T_i - T_{permukaan}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

4. Menghitung Potensi cadangan panas bumi yang dapat dimanfaatkan dalam waktu tertentu dengan persamaan berikut:

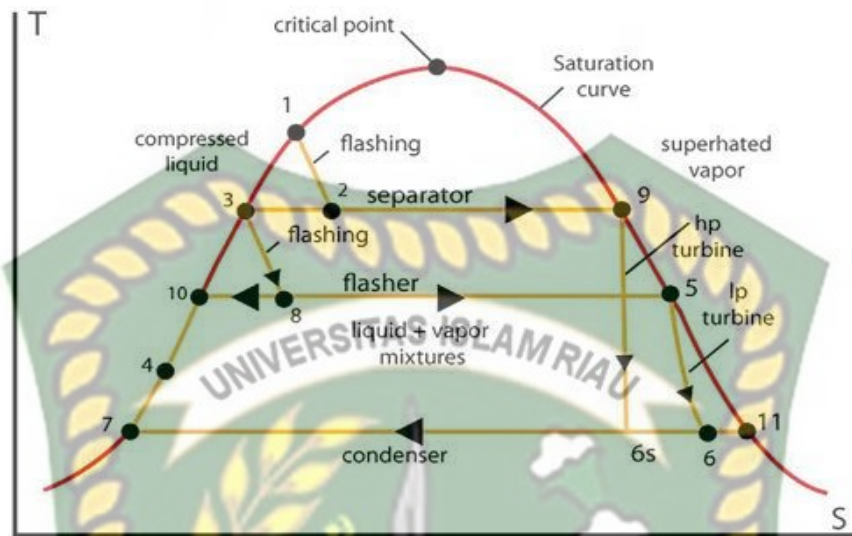
$$H_{thermal} = \frac{H_{de}}{t \times 365 \times 24 \times 3600} \quad (3.6)$$

5. Menghitung Potensi Listrik yang dapat dibangkitkan dalam waktu tertentu dengan persamaan berikut:

$$H_{El} = \frac{\eta \times H_{thermal}}{1000} \quad (3.7)$$

### 3.2.3 Skenario Pengembangan Kapasitas Daya Pembangkit

Pada lapangan N memiliki jenis *reservoir* panas bumi 2 fasa (*hydrothermal reservoir*), maka dalam mendesign model pembangkit menggunakan metode *double flash steam*. Metode ini digunakan karena *hydrothermal reservoir* memproduksi uap dan air, sehingga diperlukan separator untuk memisahkan kedua *fluida* tersebut. Gambar 3.2 merupakan skema umum yang untuk pembangkit *double flash steam*.



**Gambar 3. 2** Diagram *Temperature-Entropi (T-s)* dari siklus *Double Flash Steam* (Ronald DiPippo, 2015)

Menurut (R. DiPippo, 2012), pada gambar 3.3, pada titik 1 dan 2 merupakan proses *fluida* masuk dari sumur ke separator, kondisi *fluida* adalah dua fasa (uap dan air), proses yang terjadi adalah *isentropic*,  $h_{well\ head} = h_{separator}$ .  $H_{well\ head} = h_{fg} = enthalpy$  pada tekanan kepala sumur ( $h_1$ ). Karena *enthalpy* separator sama dengan *enthalpy* kepala sumur ( $h_1$ ). Sedangkan *enthalpy fluida* separator =  $h_{f2}$ , dan *enthalpy* dua fas separator =  $h_{fg2}$ , maka jumlah Fraksi uap ( $X_2$ ) dari separator yang masuk ke HP turbin dengan menggunakan persamaan berikut :

1. Mencari Nilai  $X_2$ :

$$X_2 = \frac{h_2 - h_{f2}}{h_{fg2}} \quad (3.7)$$

2. Kemudian Menghitung jumlah uap yang masuk ke HP turbin ( $mv_1$ ) dan jumlah air yang masuk ke *flasher* ( $mw_2$ ) dengan persamaan berikut:

$$mv_1 = mT \times X_2 \quad (3.8)$$

$$mw_2 = mT \times (1 - X_2) \quad (3.9)$$

Pada proses dari titik 2 ke titik 4 adalah tahap *fluida* dari separator masuk ke HP turbin. Prosesnya disebut *Isentalpic*, yaitu *enthalpy* uap separator sama dengan *enthalpy* uap di turbin ( $h_2 = h_4$ ). Sedangkan nilai *entropy* pada titik 4 adalah *entropy* uap pada condenser ( $S_4$ ) sama dengan *entropy* pada separator ( $S_2$ ), dengan persamaan berikut:

3. Mencari Nilai  $X_4$ :

$$X_4 = \frac{S_4 - S_{fCond}}{S_{fgCond}} \quad (3.10)$$

4. Hitung Nilai  $h_4$  dengan persamaan berikut:

$$h_4 = h_{fCond} + (X_4 \times h_{fgCond}) \quad (3.11)$$

5. Hitung Daya Listrik HP Turbin dengan persamaan berikut:

$$\text{Daya HP Turbin} = \eta \times mv_1 \times (h_2 - h_4) \quad (3.12)$$

Kemudian dari titik 2 ke titik 3 (dari separator ke *flasher*), nilai *enthalpy* pada *flasher* sama dengan nilai *enthalpy* air pada separator ( $h_3 = h_{separator}$ ). Prosesnya yaitu *Isenthalpic* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

6. Hitung fraksi uap pada *flasher* ( $X_3$ ):

$$X_3 = \frac{h_3 - h_{fseparator}}{h_{fgflasher}} \quad (3.13)$$

7. Kemudian menghitung jumlah uap yang masuk ke LP Turbin ( $mv_2$ ) dengan persamaan berikut:

$$mv_2 = X_3 \times (1 - X_2) \times mw_1 \quad (3.14)$$

Besar nilai *enthalpy* uap yang masuk ke LP turbin sama dengan *enthalpy* uap yang masuk ke *flasher*.

8. Hitung Fraksi uap yang masuk ke condenser ( $X_8$ ) dengan persamaan berikut:

$$X_8 = \frac{S_{f4} - S_{fCond}}{S_{fgCond}} \quad (3.15)$$

9. Hitung nilai *enthalpy* pada condenser ( $h_8$ ) dengan persamaan berikut:

$$h_8 = h_{fCond} + (X_8 \times h_{fgCond}) \quad (3.16)$$

10. Hitung Daya Listrik LP Turbin dengan persamaan berikut:

$$\text{Daya LP Turbin} = \eta \times mv_2 \times (h_5 - h_8) \quad (3.17)$$

11. Menghitung Daya Total dengan persamaan berikut:

$$\text{Daya Total} = \text{Daya HP Turbin} + \text{Daya LP Turbin} \quad (3.18)$$

### 3.3 Skenario Penentuan Strategi Produksi Lapangan N

Pada penelitian ini, strategi produksi yang akan dilakukan adalah mendesign 1 kapasitas daya pembangkit energi panas bumi dengan daya sebesar 30MW. Dalam menentukan strategi produksi yang tepat pada penelitian ini, peneliti menggunakan 2 skenario strategi produksi dengan kedalaman sumur yang berbeda serta penempatan sumur produksi dibedakan dari skenario 1 dan 2 untuk menentukan strategi produksi terbaik yang akan digunakan.

#### A. Skenario 1

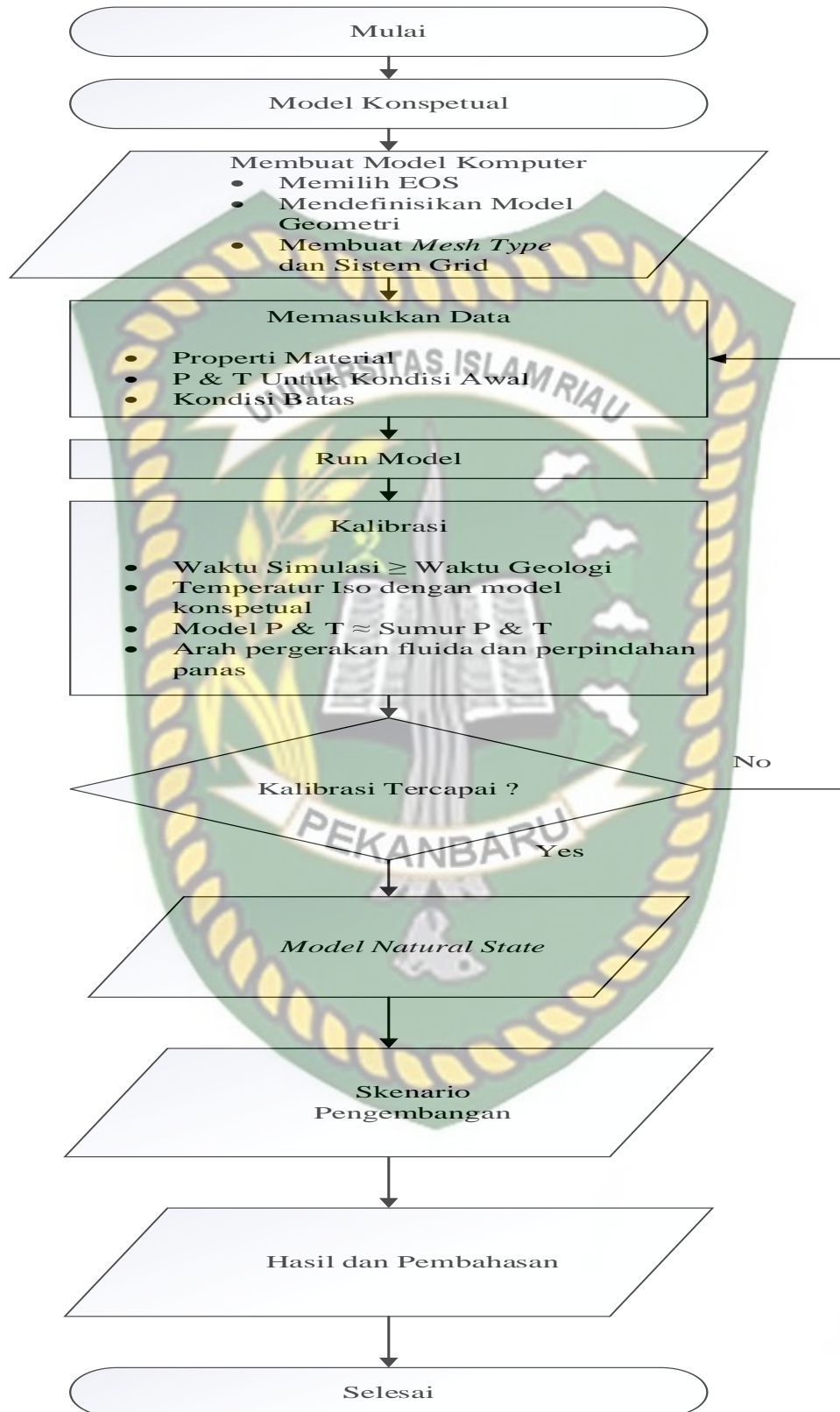
Pada skenario 1, tahap pengembangan lapangan *hydrothermal reservoir*, peneliti membuat strategi produksi, yaitu dengan membuat sumur pada kedalaman -300mdpl s/d -900 (Reservoir 9 s/d Reservoir 12).

#### B. Skenario 2

Pada skenario 2, peneliti membuat strategi produksi dengan membuat sumur pada kedalaman 300mdpl s/d -200mdpl (Reservoir 4 s/d Reservoir 8). Parameter dalam menentukan strategi produksi yang tepat dalam membuat kapasitas daya pembangkit dilihat dari beberapa hal, sebagai berikut:

1. Kapasitas Daya yang dihasilkan
2. Penurunan *Pressure*
3. Penurunan *Temperature*

### 3.4 Flow Chart



Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

### 3.5 Tempat Penelitian dan Teknik Pengambilan data

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Simulasi *Reservoir* Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau. Teknik Pengambilan data pada penelitian ini adalah menggunakan data sekunder.

### 3.6 Jadwal Penelitian

Dalam melaksanakan Tugas Akhir ini diperoleh hasil penelitian Simulasi *Reservoir* panas bumi selama 4 bulan, dari bulan Agustus – November 2021 yang dapat dilihat pada 3.4 berikut:

Tabel 3. 4 Jadwal Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Waktu Pelaksanaan															
		Agustus				September				Oktober				November			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur																
2	Pembuatan Model																
3	History Matching																
4	Perencanaan Skenario																
5	Analisis Hasil Skenario																
6	Pembuatan Laporan Akhir																

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 *Natural State*

Pada tahap pembuatan *natural state*, didapatkan kondisi alamiah dari model penelitian yang telah dirun selama 1jt tahun, hal ini dilakukan agar persebaran dari data *pressure* dan *temperature* yang telah didapatkan tidak mengalami perubahan (Iqbal, Kurniawan, Sutopo, Heru Berlian Pratama, 2018). Dalam gambar 4.1, dapat dilihat bentuk dari tahap *natural state* pada model sebagai berikut:



**Gambar 4. 1** Kondisi *Natural State* Lapangan N

Setelah proses *natural state* telah berhasil dilakukan, maka proses *matching Pressure* dan *temperature* dapat dilakukan.

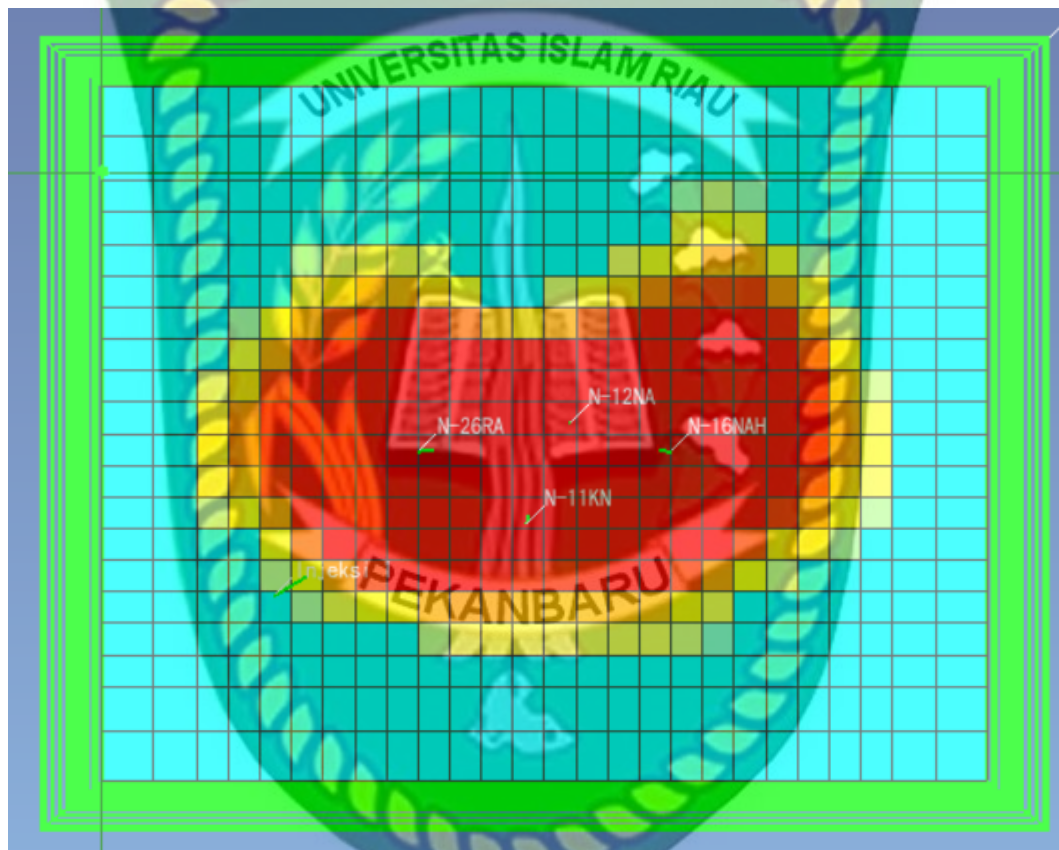
#### 4.2 *Matching Pressure and Temperature*

Penelitian ini memiliki tahap pencocokan data *Pressure* dan *Temperature* antara data yang diambil dari referensi terkait *Hydrothermal Reservoir* (Ashat et al., 2019; Nizami & Pratama, 2016) dengan data yang dihasilkan oleh model simulasi. Pencocokan data *pressure* dan *temperature* yang ada pada model didapatkan dengan melakukan proses pembuatan sumur eksplorasi sebanyak 4 sumur dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut:



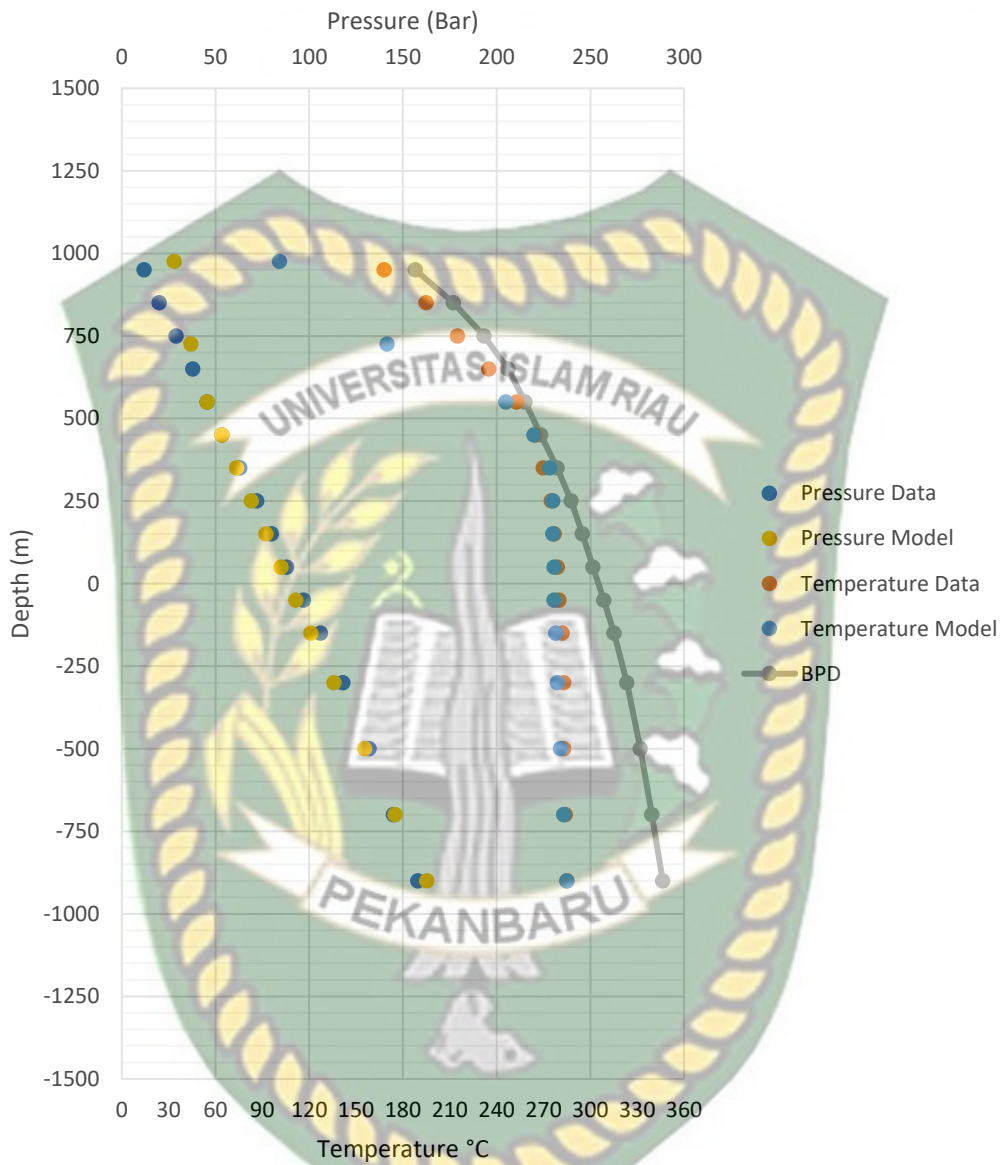
**Tabel 4. 1** Letak Sumur Eksplorasi Lapangan N

Sumur	X	Y	Z	Perforasi
N – 16NAH	2625	2625	-900	-800, -900
N – 26RA	4375	2625	-500	-400, -500
N – 11KN	3375	2125	-700	-600, -700
N – 12NA	3675	2825	-300	-200, -300

**Gambar 4. 2** Lokasi Sumur Eksplorasi

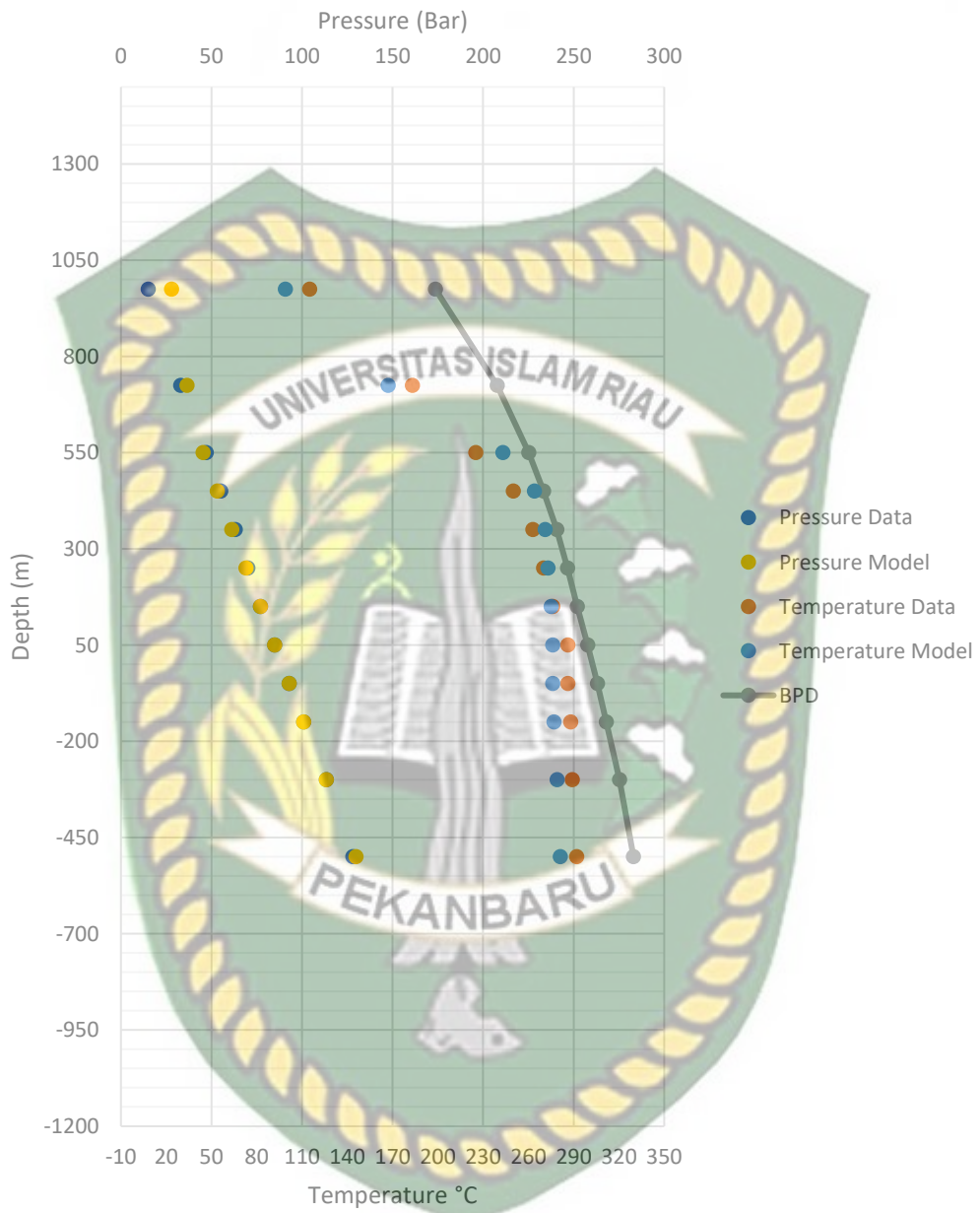
Pada keempat sumur eksplorasi yang telah dibuat, dihasilkan grafik data *pressure* dan *temperature* yang sesuai dengan data yang diambil dari referensi terkait dengan *Hydrothermal Reservoir*. Pencocokan data tersebut dapat dilihat pada grafik 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4, sebagai berikut:

**Sumur N-16NAH**

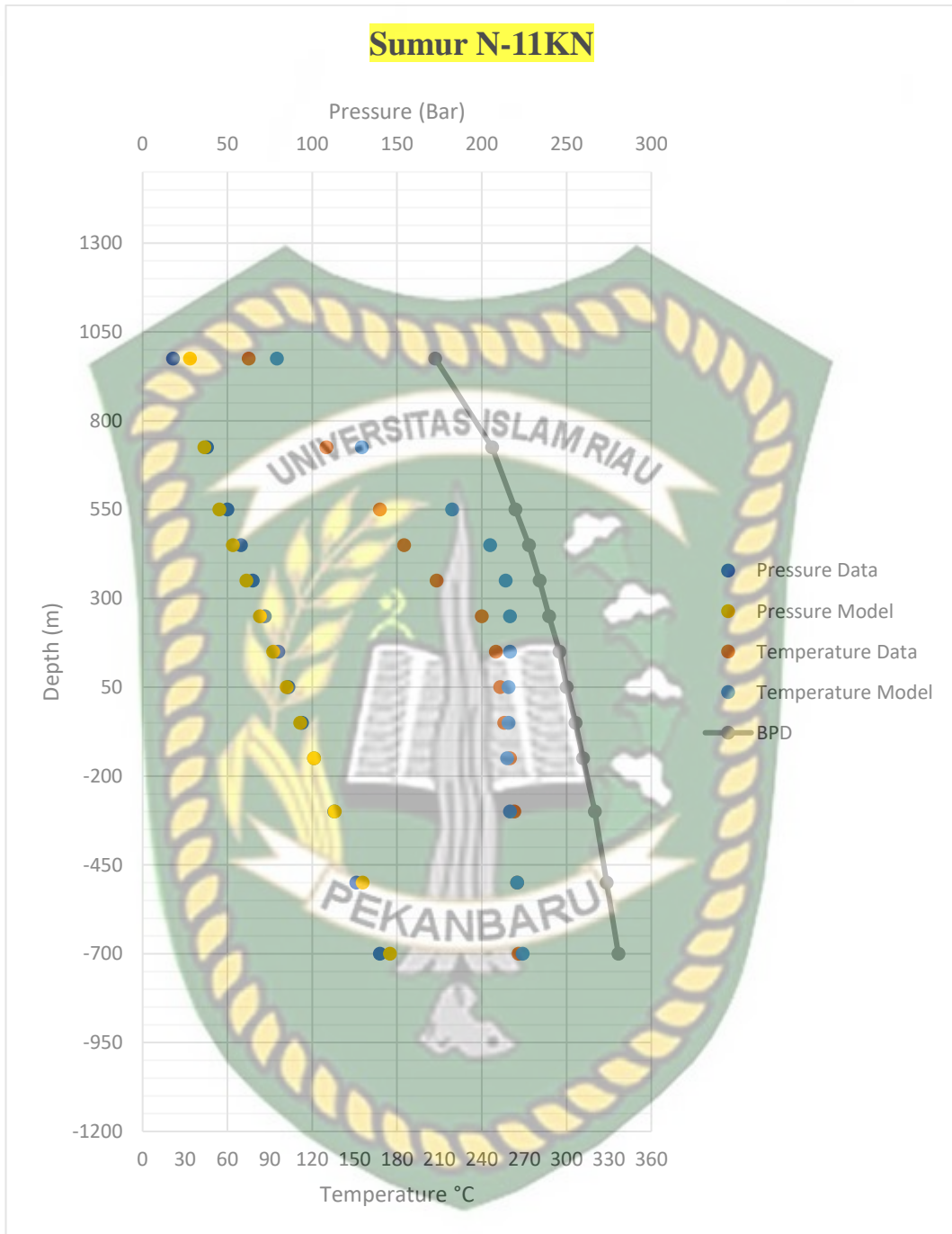


**Grafik 4. 1** Data P&T Sumur N-16NAH

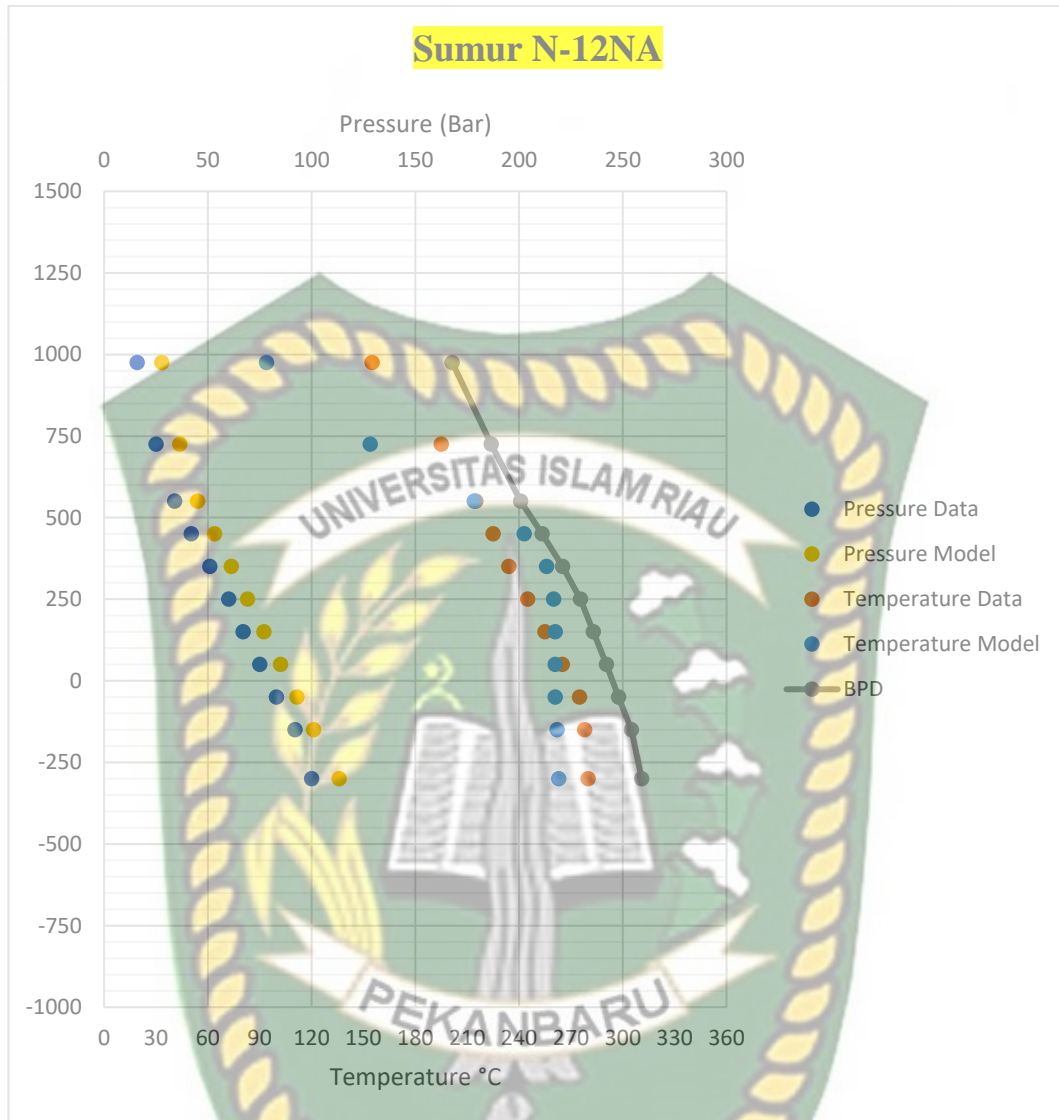
**Sumur N-26RA**



**Grafik 4. 2** Data P&T Sumur N-26RA



**Grafik 4.3** Data P&T Sumur N-11KN



**Grafik 4. 4 Data P&T Sumur N-12NA**

Berdasarkan grafik *matching pressure* dan *temperature* diatas, hasil kalibrasi antara hasil pengukuran dan hasil simulasi sudah bagus. Berdasarkan hasil simulasi yang didapatkan pada sumur N-16NAH zona reservoir memiliki *temperature* sebesar 264 – 285°C dengan elevasi kedalaman 550 hingga -900 mdpl. Pada sumur N-26RA zona reservoir memiliki *temperature* sebesar 243 – 281°C dengan elevasi kedalaman 550 hingga -500 mdpl. Pada sumur N-11KN zona reservoir memiliki *temperature* sebesar 219 – 269°C dengan elevasi kedalaman 550 hingga -700mdpl. Pada sumur N-12NA zona reservoir memiliki *temperature* sebesar 219 – 263°C dengan elevasi kedalaman 550 hingga -300 mdpl (Ashat et al., 2019; Nizami et al., 2016; Pratama & Saptadji, 2015).

### 4.3 Potensi Cadangan Lapangan N

Pada perhitungan potensi cadangan lapangan N, didapatkan parameter dari simulasi *reservoir* yang telah dilakukan. Dapat dilihat pada tabel 4.2 sebagai berikut:

**Tabel 4. 2** Parameter Potensi Cadangan Lapangan N

Reservoir			
Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	2700	Porositas	0.1
h Reservoir (km)	1	Luas Area (km <sup>2</sup> )	15.18
Panas Spesifik			(kJ/kg.C)
Temperature	Initial	Final	°C
	287	180	
Steam Table			
Densitas Air Initial	737.5544		Kg/m <sup>3</sup>
Densitas Uap Initial	37.23671		Kg/m <sup>3</sup>
Densitas Air Final	887.0053		Kg/m <sup>3</sup>
Densitas Uap Final	5.158319		Kg/m <sup>3</sup>
Energi Dalam Air <i>Initial</i>	1264.023		kJ/Kg
Energi Dalam Uap <i>Intial</i>	2579.71		kJ/Kg
Energi Dalam Air <i>Final</i>	762.0576		kJ/Kg
Energi Dalam Uap Final	2582.847		kJ/Kg
Estimasi Project			
Saturasi Air	1		
Saturasi Uap	0		
Faktor Konversi Listrik	10		%
Recovery Factor	41		%
Project Time	30		Tahun

Dari data yang tersedia diatas, potensi cadangan pada lapangan N dihitung menggunakan metode *volumetric* (Novriansyah, 2013), maka hasil perhitungan potensi listrik pada lapangan N dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut:

**Tabel 4. 3** Perhitungan Cadangan Lapangan N

$H_{ei}$	$9.60626E^{15}$
$H_{ef}$	$6.13569E^{15}$
$H_{th}$	$3.47057E^{15}$ kJ
$H_{de}$	$1.41737E^{15}$
$H_{thermal}$	1498150.832 MW <sub>thermal</sub>
$H_{electrical}$	149.82 MW <sub>e</sub>

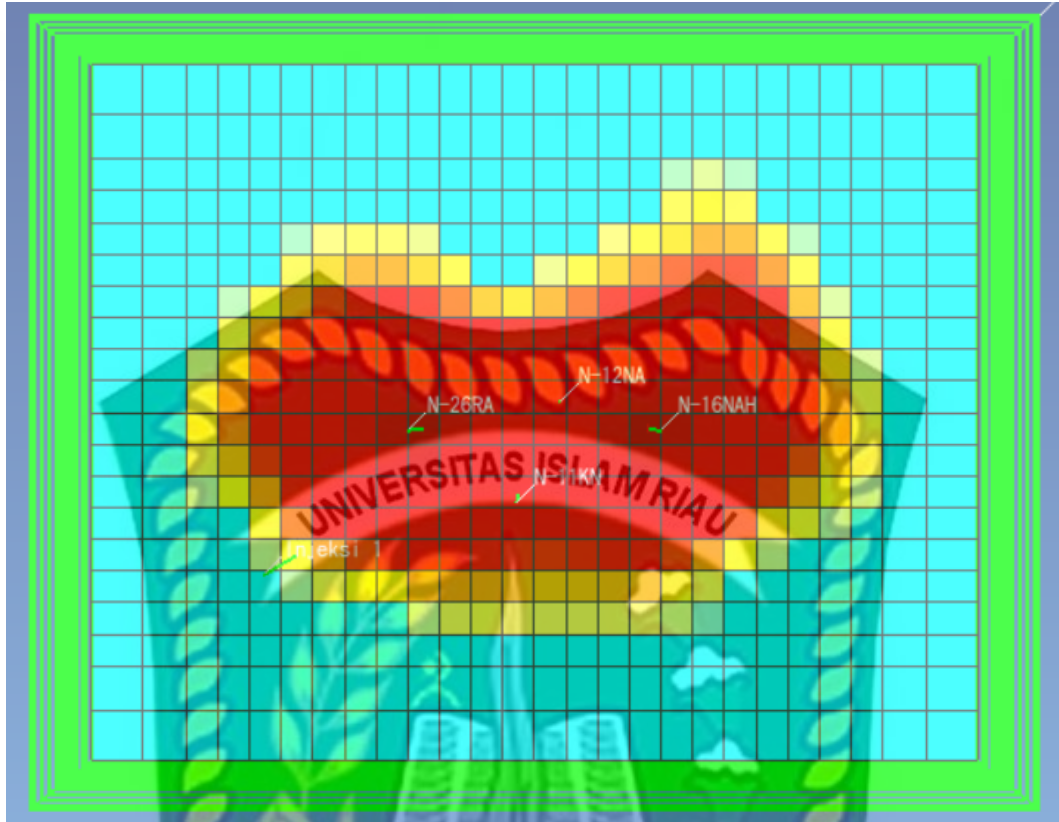
Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa lapangan N memiliki potensi cadangan sebesar 149.82 MW.

#### 4.4 Penentuan Strategi Produksi terhadap Kapasitas Daya Pembangkit

##### 4.4.1 Desain Kapasitas Daya Pembangkit

Setelah proses *natural state* telah tervalidasi, yaitu dengan melihat kecocokan dari data *pressure* dan *temperature* yang diperoleh dari hasil simulasi reservoir dengan hasil pengukuran sumur, maka lapangan N dapat digunakan sebagai model pengembangan skenario produksi untuk membangkitkan 30 MW. Skenario produksi dilakukan dengan membedakan kedalaman dan posisi dari sumur produksi (Pratama & Saptadji, 2015).

Pada tahap ini, sumur eksplorasi yang telah dibuat akan ditambah dengan 1 sumur injeksi yang kemudian akan dirubah menjadi sumur produksi untuk dijadikan strategi produksi dalam mendesain kapasitas daya pembangkit. Sumur produksi pada tahap ini memiliki elevasi kedalaman -300 s/d -900 mdpl. Pemodelan sumur produksi dapat dilihat pada gambar 4.3 sebagai berikut:



**Gambar 4. 3** Lokasi 4 Sumur Produksi + 1 Sumur Injeksi

Kapasitas daya pembangkit yang didesain menggunakan metode *Double Flash Steam*. Untuk dapat mengembangkan pembangkit berkapasitas 30 MW, maka diperlukan data yang disajikan pada tabel 4.4 sebagai berikut:

**Tabel 4. 4** Data Perhitungan Metode *Double Flash Steam*

Data Sumur		
Tekanan Kepala Sumur	12	Bar
Laju Alir	204.436	Kg/s
Enthalpy	1198.15	Kj/Kg
Desain Pembangkit		
Tekanan Separator	10	Bar
Tekanan HP Turbin	9	Bar
Tekanan LP Turbin	0.8	Bar
Tekanan Kondensor	0.1	Bar
Efisiensi Turbin	0.8	Fraksi
Tekanan Flasher	1.4	Bar



SteamTable			
Separator	$h_f$	762.6828	kJ/Kg
	$h_g$	2777.12	kJ/Kg
	$h_{fg}$	2014.437	kJ/Kg
HP Turbin	$h_f$	742.7246	kJ/Kg
	$h_g$	2773.038	kJ/Kg
	$h_{fg}$	2030.313	kJ/Kg
LP Turbin	$h_f$	391.6388	kJ/Kg
	$h_g$	2665.178	kJ/Kg
	$h_{fg}$	2273.539	kJ/Kg
Kondensor	$h_f$	191.8123	kJ/Kg
	$h_g$	2583.887	kJ/Kg
	$h_{fg}$	2392.075	kJ/Kg
	$S_f$	0.649218	kJ/Kg <sup>°K</sup>
	$S_g$	8.148893	kJ/Kg <sup>°K</sup>
	$S_{fg}$	7.499675	kJ/Kg <sup>°K</sup>
Flasher	$h_f$	458.3666	kJ/Kg
	$h_g$	2689.99	kJ/Kg
	$h_{fg}$	2231.624	kJ/Kg

Dari data yang tersedia, maka kapasitas daya pembangkit dapat di hitung menggunakan metode *double flash steam* (Ronald DiPippo, 2015). Hasil dari perhitungan dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

Perhitungan *High Pressure Turbine*:

- Menghitung nilai  $X_2$  :

$$X_2 = \frac{1198.15 - 762.6828}{2014.437}$$

$$X_2 = 0.21617 \%$$

- Menghitung nilai  $mv_1$  :

$$mv_1 = 204.436 \times 0.21617$$

$$mv_1 = 44.193 \text{ Kg/s}$$

- Menghitung nilai  $mw_1$  :

$$mw_1 = 204.436 \times (1 - 0.21617)$$

$$mw_1 = 160.242 \text{ Kg/s}$$

- Menghitung nilai  $X_4$  :

$$X_4 = \frac{6.621238 - 0.643218}{7.499675}$$

$$X_4 = 0.796304 \%$$

- Menghitung nilai  $h_4$  :

$$h_4 = 191.8123 + (0.796304 \times 2392.075)$$

$$h_4 = 2096.631 \text{ kJ/Kg}$$

- Menghitung Daya pada HP Turbin :

$$\text{Daya HP Turbin} = 0.8 \times 44.193 \times (2773.038 - 2096.631)$$

$$\text{Daya HP Turbin} = 23914.278 \text{ kW}$$

$$\text{Daya HP Turbin} = 23.914 \text{ MW}$$

Perhitungan *Low Pressure Turbine*:

- Menghitung nilai  $X_3$  :

$$X_3 = \frac{762.6828 - 458.3666}{2231.624}$$

$$X_3 = 0.1363\%$$

- Menghitung nilai  $mv_2$  :

$$mv_2 = 0.1363 \times (1 - 0.21617) \times 160.242$$

$$mv_2 = 17.127 \text{ Kg/s}$$

- Menghitung nilai  $X_8$  :

$$X_8 = \frac{7.433893 - 0.649218}{7.499675}$$

$$X_8 = 0.904662505 \%$$

- Menghitung nilai  $h_8$  :

$$h_8 = 191.8123 + (0.904662505 \times 2392.075)$$

$$h_8 = 2355.832534 \text{ Kg/s}$$

- Menghitung Daya pada LP Turbin :

$$\text{Daya LP Turbin} = 0.8 \times 17.127 \times (2665.178 - 2355.832534)$$

$$\text{Daya LP Turbin} = 4238.723 \text{ kW}$$

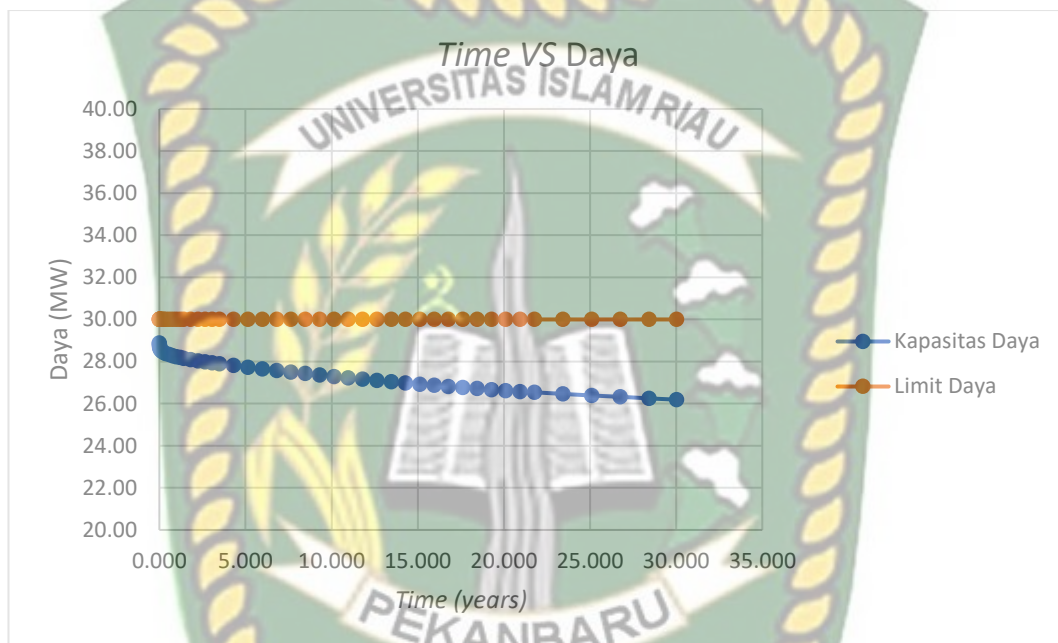
$$\text{Daya LP Turbin} = 4.238 \text{ MW}$$

- Menghitung Daya Total :

$$\text{Daya Total} = 23.914 + 4.238$$

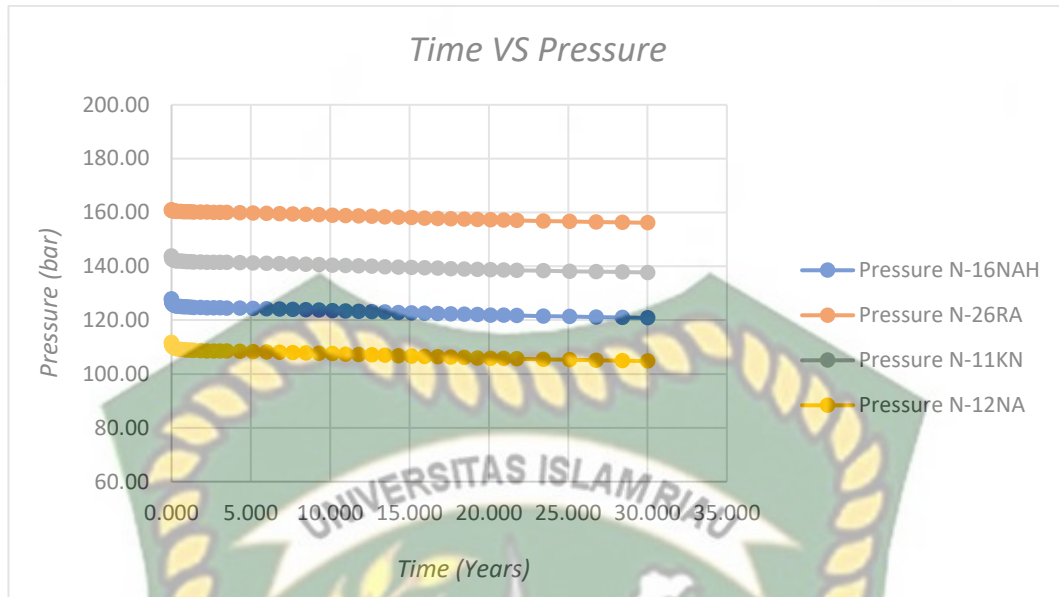
$$\text{Daya Total} = 28.153 \text{ MW}$$

Grafik perolehan daya pada 4 sumur produksi dapat dilihat pada grafik 4.5 sebagai berikut:

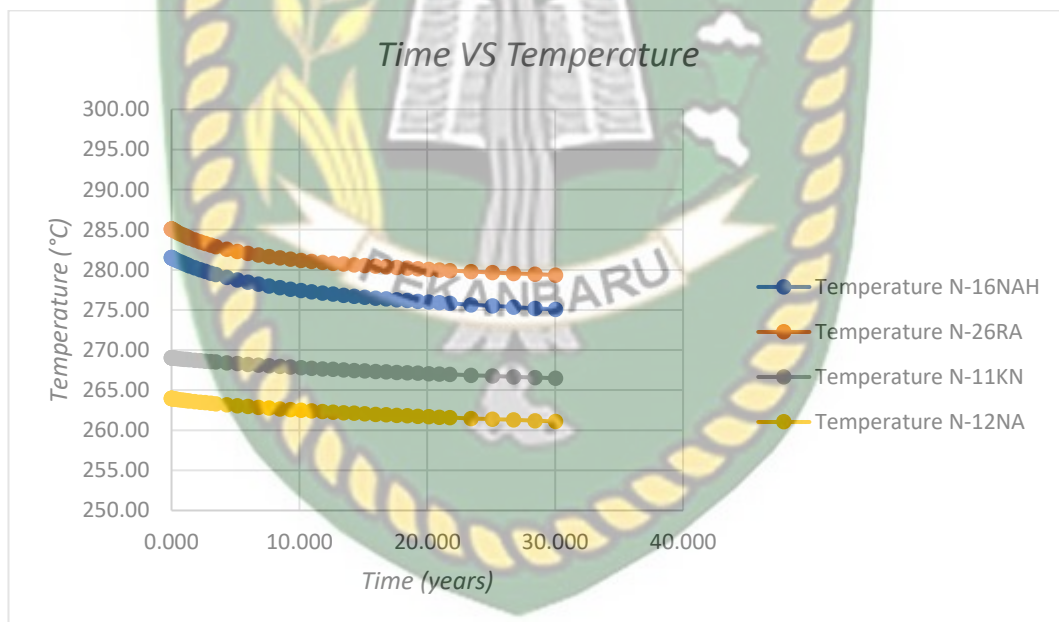


**Grafik 4.5** Kapasitas Daya Pembangkit (4 Sumur Produksi)

Pada skenario menggunakan 4 sumur ini, dengan rata rata daya yang dihasilkan sebesar yaitu 28.153MW selama 30 tahun. Penurunan daya yang terjadi selama 30 tahun sebesar 2.69 MW. Penurunan *pressure* yang terjadi pada skenario ini sebesar 6 bar sedangkan penurunan *temperature* sebesar 4°C selama 30 tahun. Grafik penurunan *pressure* dan *temperature* dapat dilihat pada grafik 4.6, dan 4.7 sebagai berikut:



**Grafik 4. 6** Penurunan *Pressure* (4 Sumur Produksi)

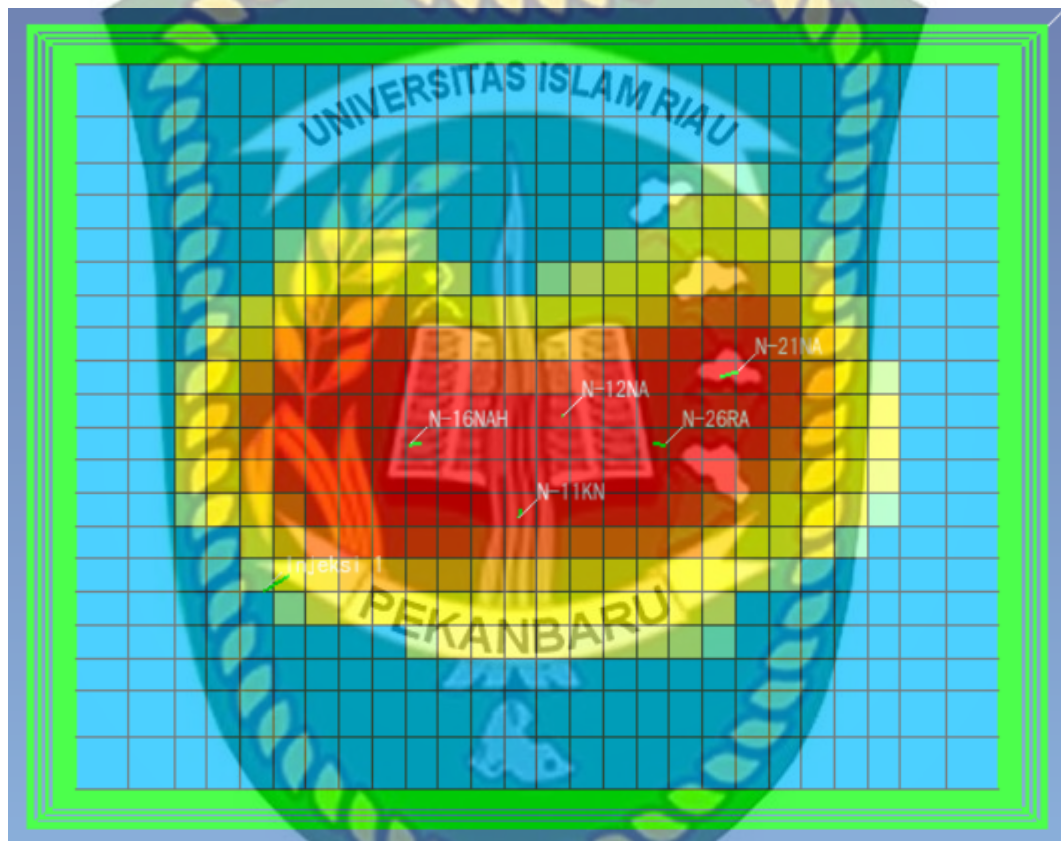


**Grafik 4. 7** Penurunan *Temperature* (4 Sumur Produksi)

Dari grafik diatas, kapasitas daya pembangkit yang dihasilkan oleh sumur eksplorasi tidak dapat memenuhi kebutuhan kapsitas daya pembangkit. Maka daripada itu tahap pengembangan lapangan N dimodelkan dengan penambahan 1 sumur produksi.

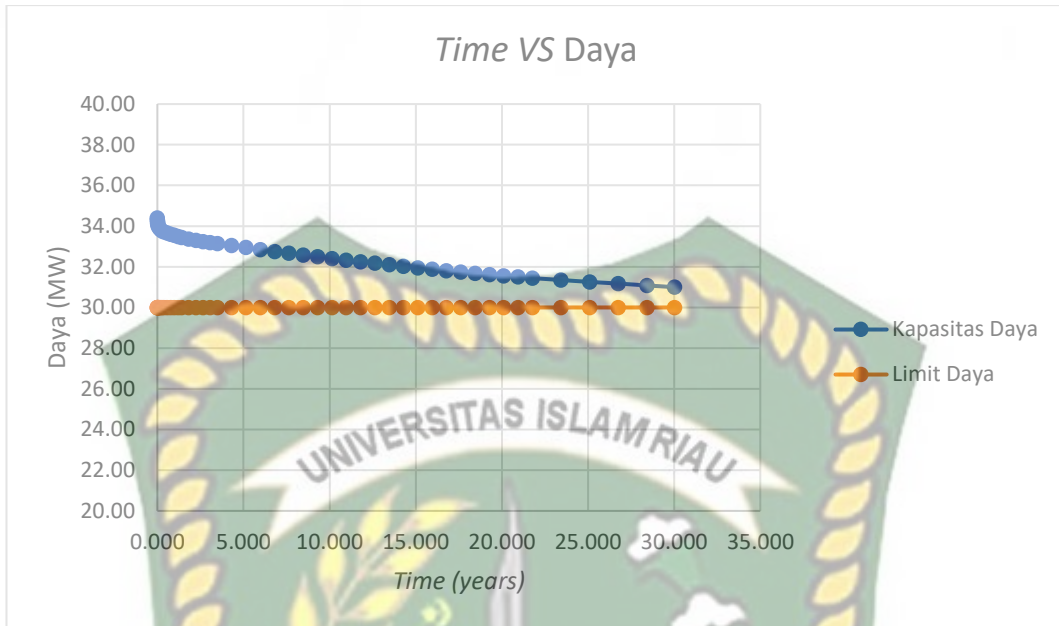
### A. Skenario 1

Pada skenario 1, pengembangan lapangan N memiliki strategi produksi dengan membuat 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi. Sumur produksi memiliki kedalaman sumur -300mdpl s/d -900mdpl (Pratama & Saptadji, 2018; L Putriyana & Soekarno, 2015). Pemodelan sumur produksi skenario dapat dilihat pada gambar 4.4 sebagai berikut:

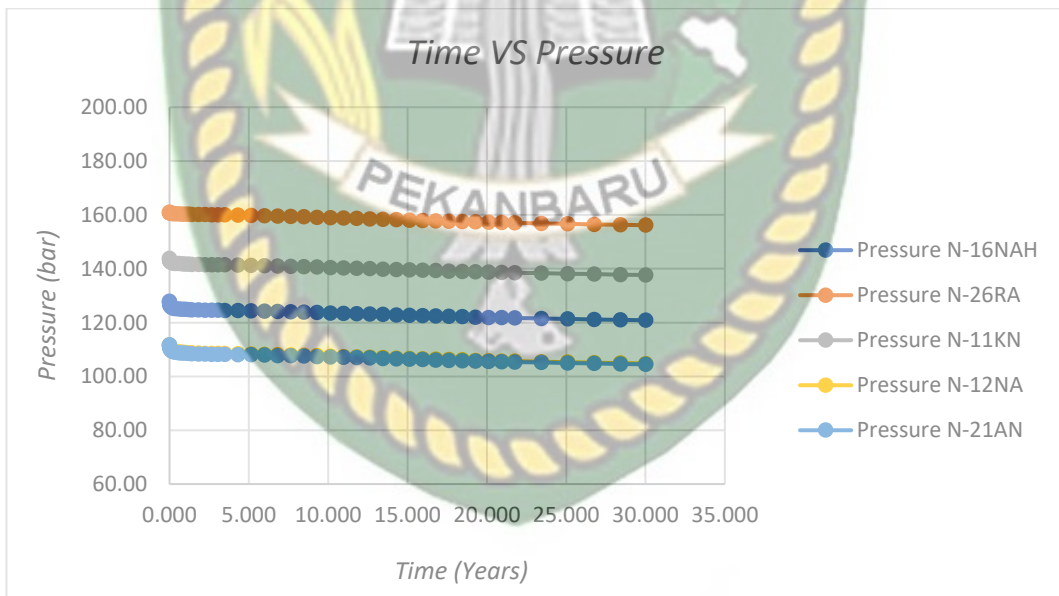


**Gambar 4. 4** Lokasi 5 Sumur Produksi (Skenario 1)

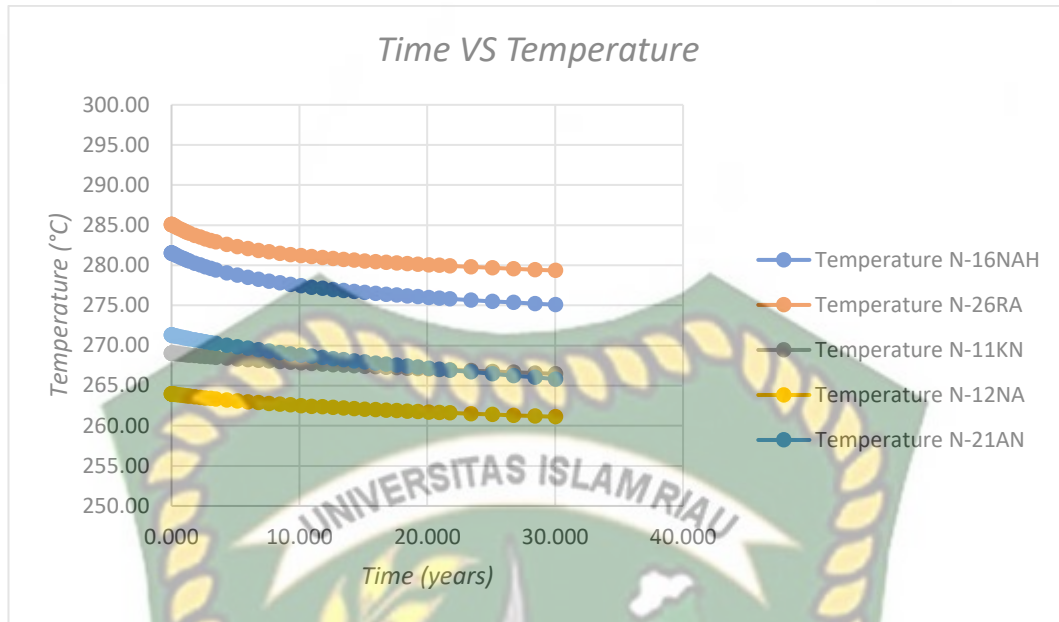
Pada skenario 1, Kapasitas daya pembangkit yang didesain menggunakan metode *Double Flash Steam*. Untuk dapat mengembangkan pembangkit berkapasitas 30 Mw. Dengan 5 sumur produksi, diperoleh daya dengan rata rata daya yang dihasilkan sebesar yaitu 32.841MW selama 30 tahun (Zeyghami, 2010). Penurunan daya yang terjadi selama 30 tahun sebesar 3.4 MW. Penurunan *pressure* yang terjadi pada skenario ini sebesar 6 bar sedangkan penurunan *temperature* sebesar 5°C selama 30 tahun. Grafik daya dan penurunan *pressure* dan *temperature* dapat dilihat pada grafik 4.6, 4.7, dan 4.8 sebagai berikut:



**Grafik 4.8** Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 1 (5 Sumur Produksi)



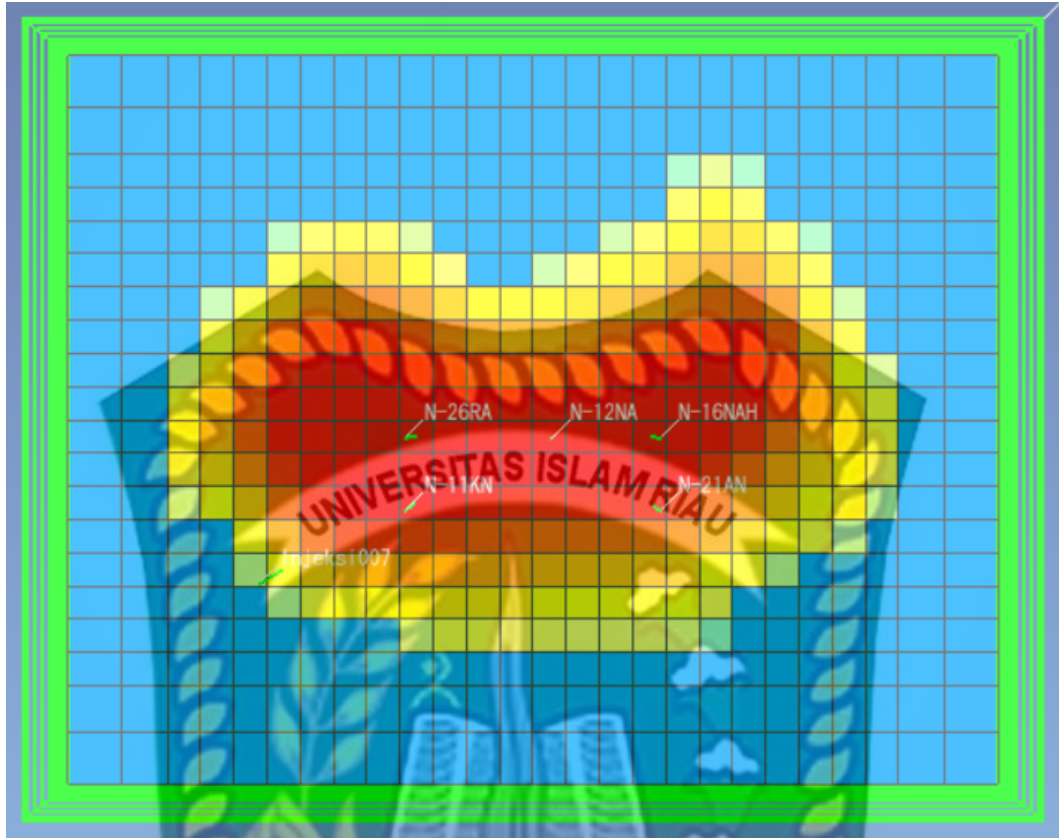
**Grafik 4.9** Penurunan Pressure Skenario 1 (5 Sumur Produksi)



**Grafik 4.10** Penurunan *Temperature* Skenario 1 (5 Sumur Produksi)

#### B. Skenario 2

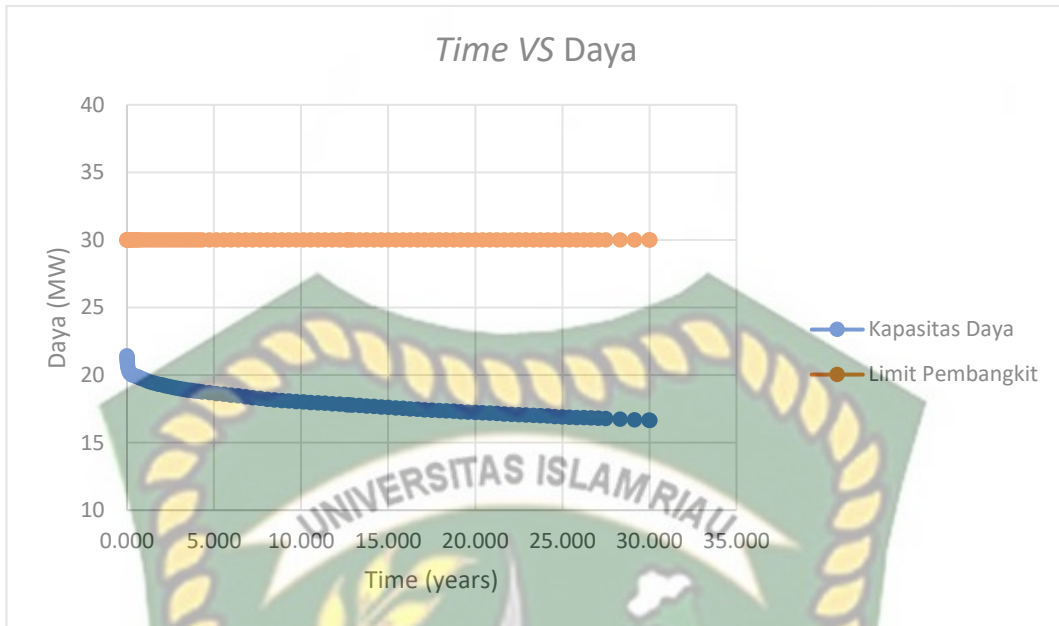
Pada skenario 2, pengembangan lapangan N dimodelkan dengan membedakan elevasi kedalaman dan lokasi sumur produksi dari skenario pertama. Dimana skenario ini membuat 5 sumur produksi dan 1 sumur injeksi. Dengan elevasi kedalaman sumur produksi terletak pada kedalaman 600 s/d -200 mdpl (Pratama & Saptadji, 2018; L Putriyana & Soekarno, 2015). Pemodelan sumur produksi dapat dilihat pada gambar 4.5 sebagai berikut:



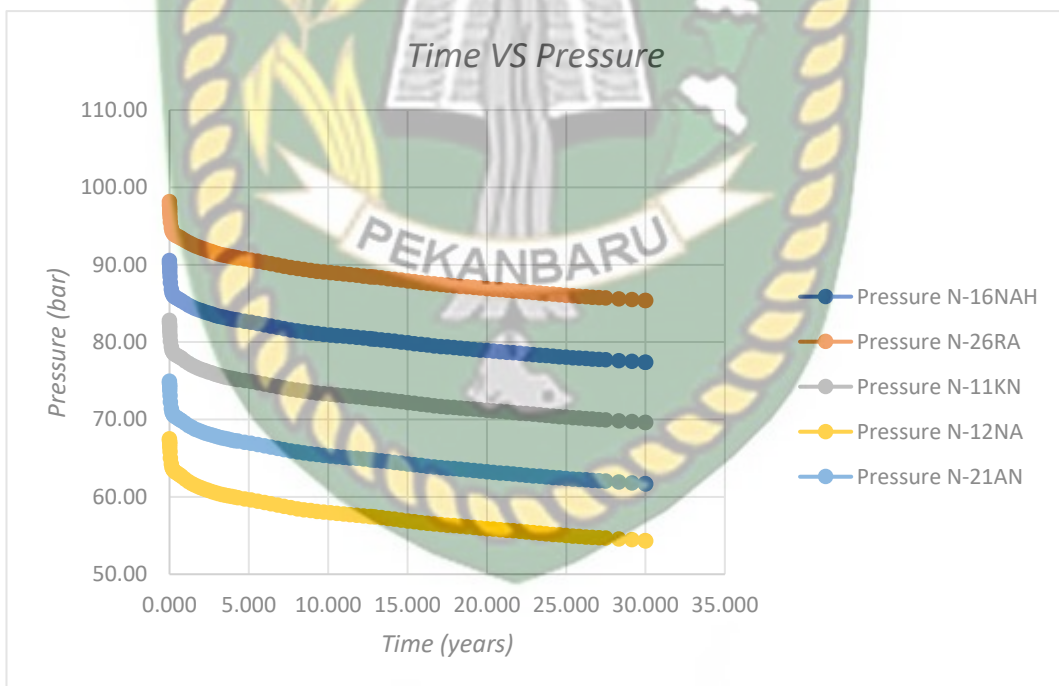
**Gambar 4. 5** Lokasi Sumur Produksi Skenario 2 (5 Sumur Produksi)

Dengan 5 sumur produksi, diperoleh daya dengan rata rata yang dihasilkan sebesar yaitu 18.31MW selama 30 tahun. Penurunan daya yang terjadi selama 30 tahun sebesar 4.77MW. Penurunan *pressure* yang terjadi pada skenario ini sebesar 13 bar sedangkan penurunan *temperature* sebesar 3°C selama 30 tahun. Grafik daya dan penurunan *pressure* dan *temperature* dapat dilihat pada grafik 4.11, 4.12, dan 4.13 sebagai berikut:

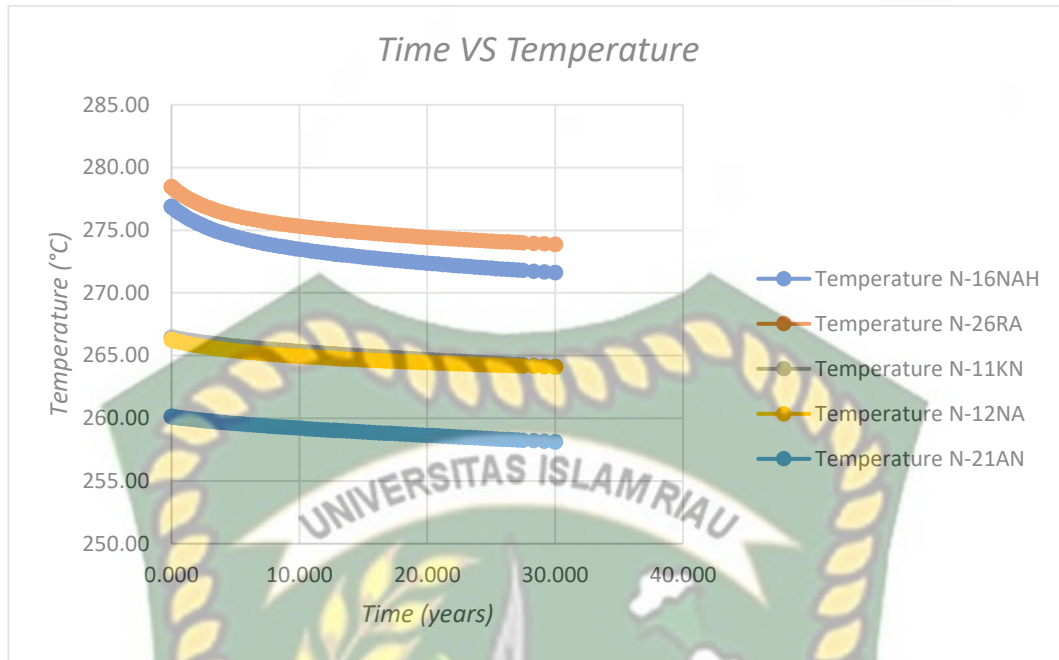




**Grafik 4. 11** Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 2 (5 Sumur Produksi)

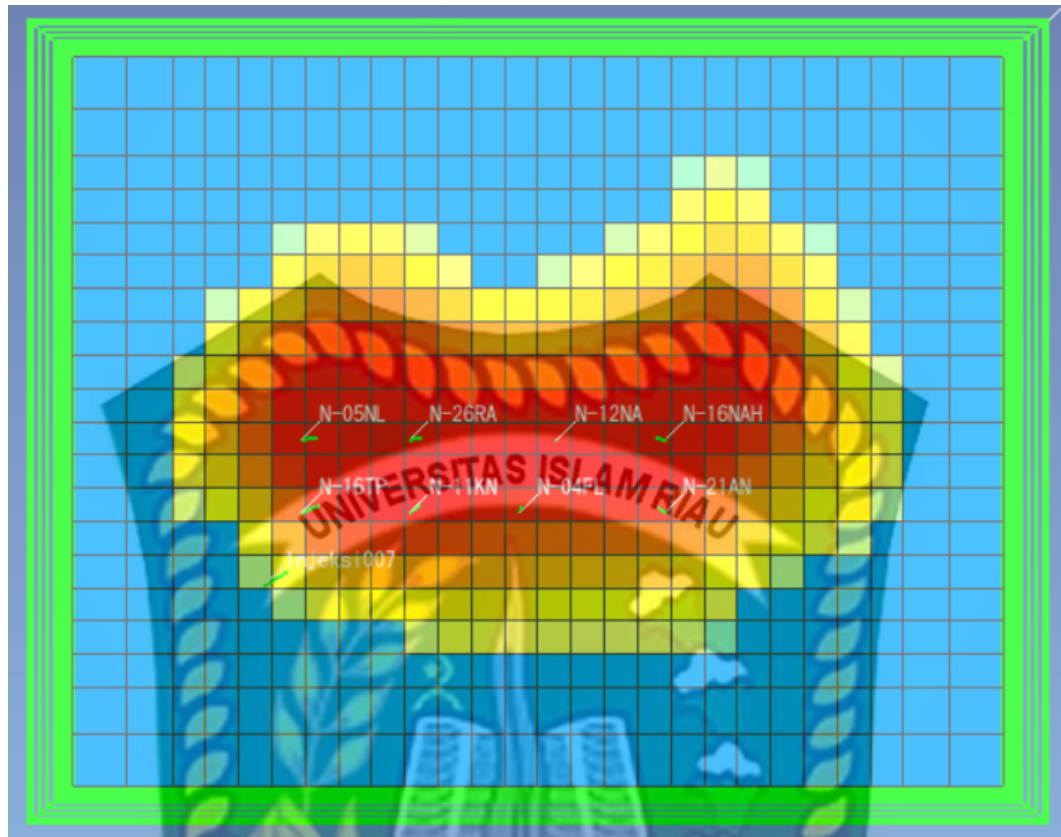


**Grafik 4. 12** Penurunan Pressure Skenario 2 (5 Sumur Produksi)



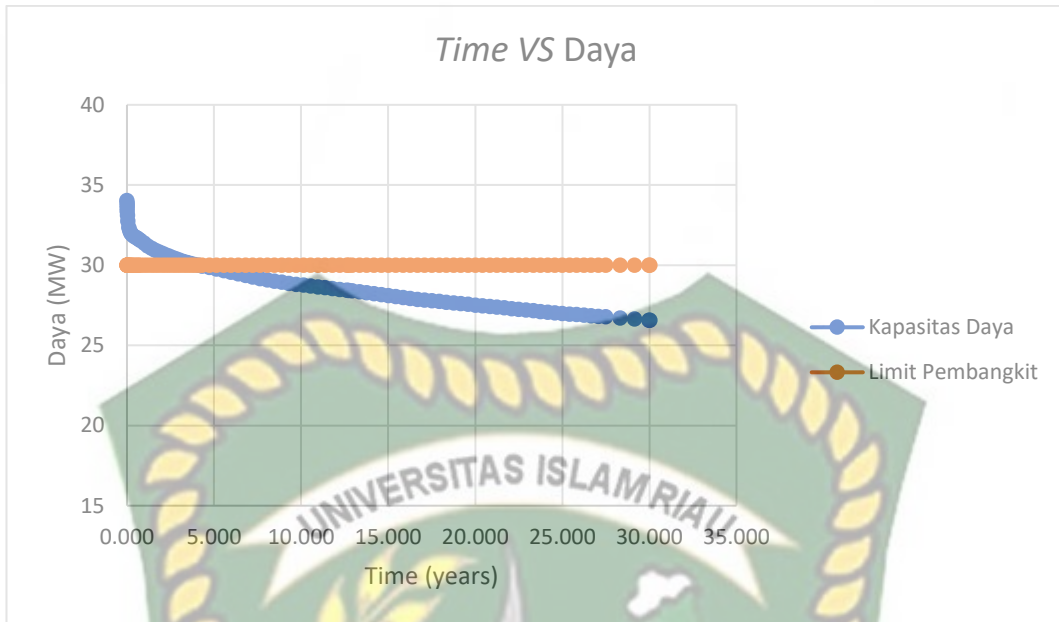
**Grafik 4. 13** Penurunan Temperature Skenario 2 (5 Sumur Produksi)

Dari grafik diatas, kapasitas daya pembangkit yang dihasilkan oleh 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi tidak dapat memenuhi kebutuhan kapasitas daya pembangkit. Maka daripada itu tahap pengembangan lapangan N dimodelkan dengan penambahan 3 sumur produksi pada kedalaman yang sama. Lokasi penambahan 3 sumur produksi dapat dilihat pada gambar 4.6 sebagai berikut:

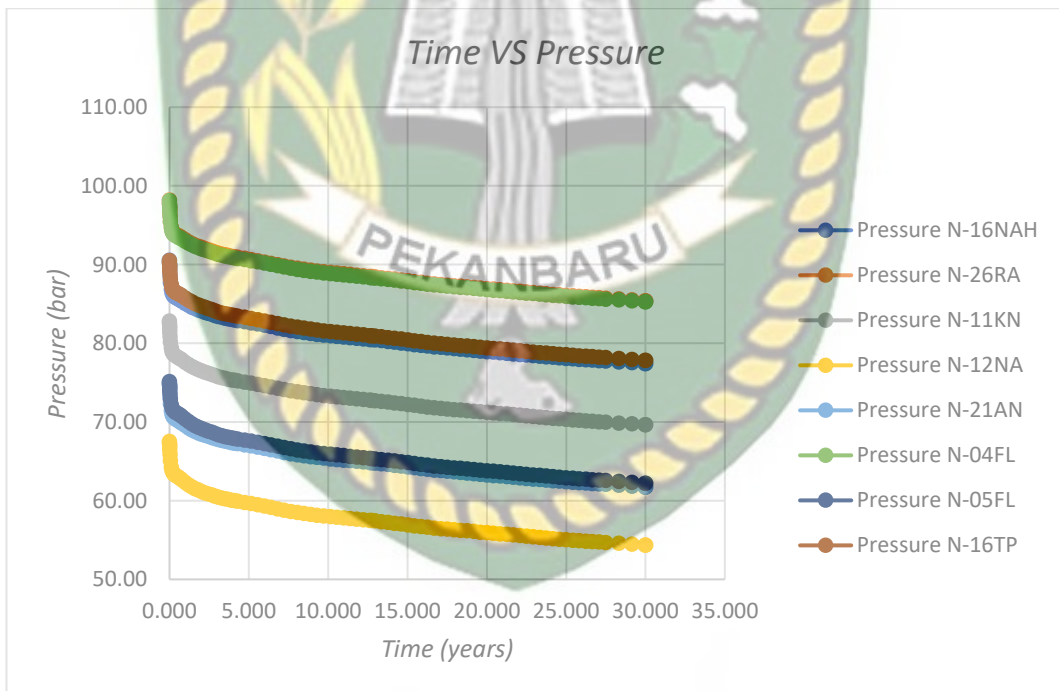


**Gambar 4. 6** Lokasi Penambahan (3 Sumur Produksi)

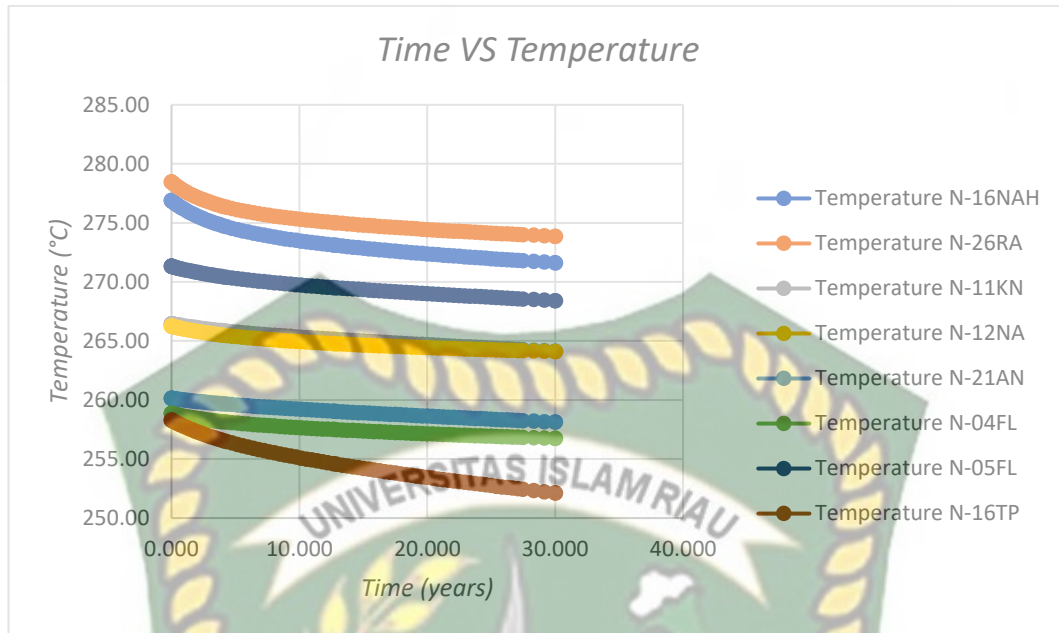
Setelah dilakukan simulasi dengan 8 sumur produksi selama 30 tahun, berdasarkan hasil dari grafik 4.14 terlihat bahwa penurunan daya yang dihasilkan mencapai batas minimum daya pada tahun ke 3 produksi. Untuk mengatasi Penurunan daya yang terjadi pada tahun ke 3 maka dilakukan penambahan 1 sumur makeup untuk menaikkan daya yang dihasilkan (Ashat et al., 2019; Zeyghami, 2010). Penurunan *pressure* yang terjadi pada 8 sumur produksi + 1 sumur injeksi ini sebesar 13 bar selama 30 tahun, sedangkan penurunan *temperature* sebesar 3°C selama 30 tahun. Grafik daya dan penurunan *pressure* dan *temperature* dapat dilihat pada grafik 4.14, 4.15, dan 4.16 sebagai berikut:



**Grafik 4.14** Kapasitas Daya Pembangkit Skenario 2 (8 Sumur Produksi)

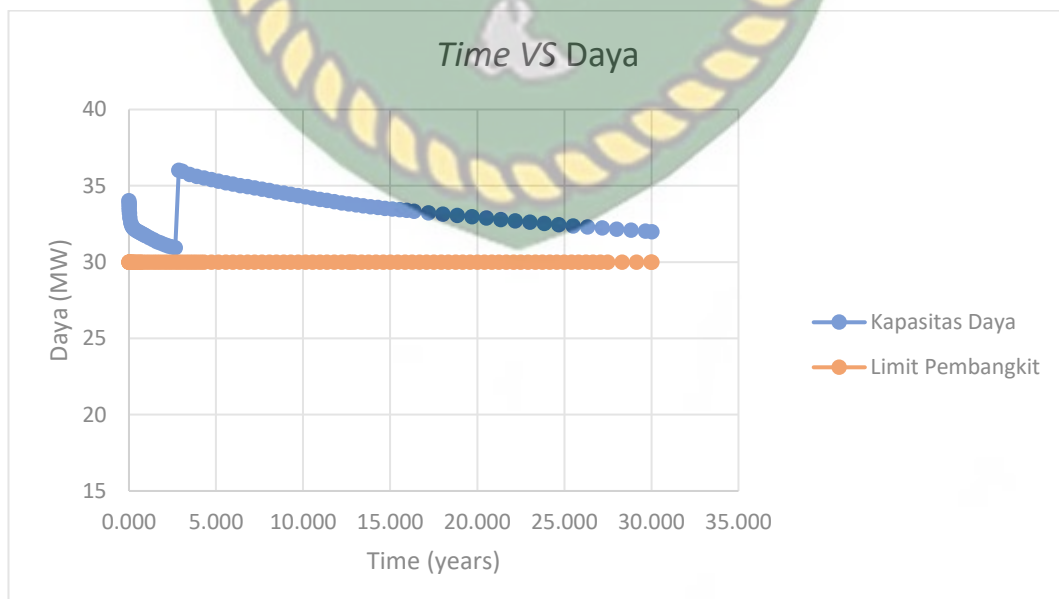


**Grafik 4.15** Penurunan *Pressure* Skenario 2 (8 Sumur Produksi)

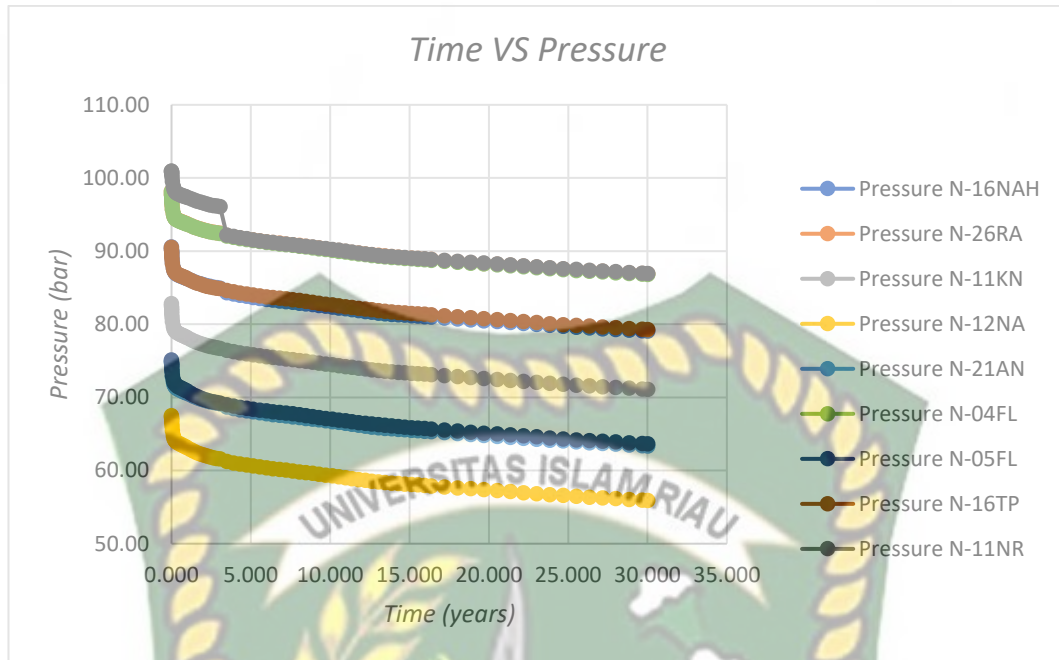


**Grafik 4. 16** Penurunan *Temperature* Skenario 2 (8 Sumur Produksi)

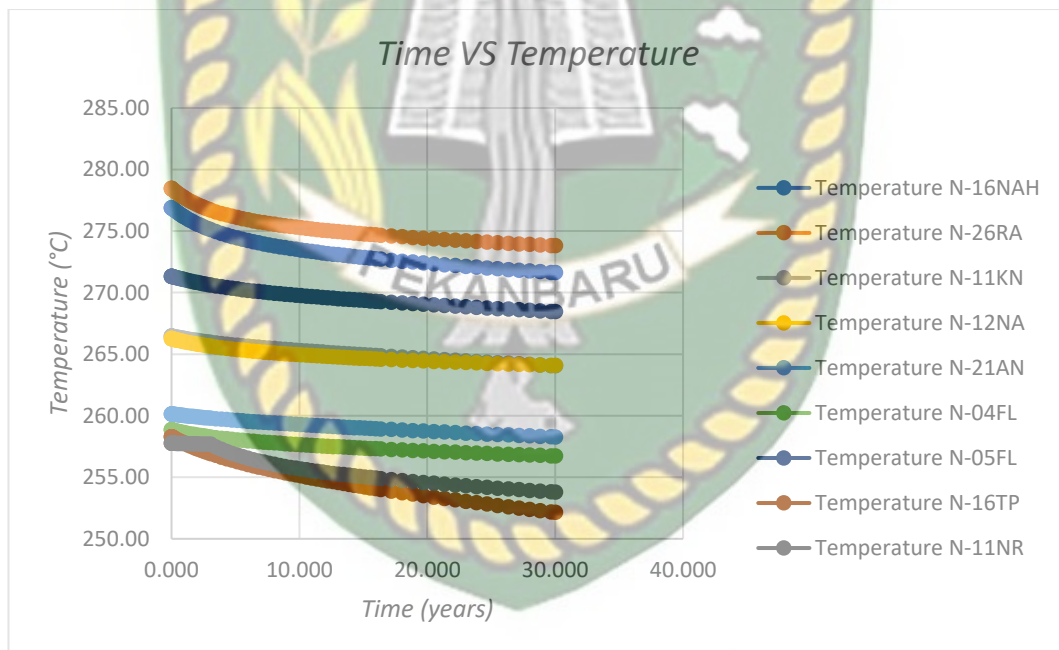
Perlu diketahui jika ingin menambahkan sumur produksi baru, dapat dilakukan apabila laju alir total pada lapangan N berada pada batas minimum daya yang dihasilkan. Setelah dilakukan simulasi dengan menambahkan 1 sumur makeup pada tahun ke 3, Penurunan *pressure* yang terjadi pada penambahan 1 sumur makeup ini sebesar 12 bar selama 30 tahun, sedangkan penurunan *temperature* sebesar 4°C selama 30 tahun. Didapatkan hasil simulasi pada grafik 4.17, 4.18, dan 4.19 sebagai berikut:



**Grafik 4. 17** Kapasitas Daya Pembangkit (1 Sumur Makeup)



**Grafik 4. 18** Penurunan *Pressure* (1 Sumur Makeup)



**Grafik 4. 19** Penurunan *Temperature* (1 Sumur Makeup)

Dari grafik 4.17 dengan melakukan penambahan 1 sumur makeup dapat mempertahankan atau bahkan melebihi batas minimum daya yang dihasilkan selama 30 tahun (Ashat et al., 2019). Sumur makeup yang dibuat mulai beroperasi dari tahun ke 3 produksi, dan penambahan produksi uap menyebabkan peningkatan daya pembangkit sebesar 20% selama 1 tahun produksi. Sampai akhir simulasi,

daya yang dibutuhkan oleh pembangkit masih terjaga pada batas minimum kapasitas daya pembangkit yang telah didesain.

Dari analisis yang telah dilakukan diatas, dapat disimpulkan bahwa skenario 1 dengan 5 sumur produksi + 1 sumur injeksi merupakan strategi produksi terbaik yang dapat dilakukan pada lapangan N. Skenario produksi yang dilakukan pada elevasi kedalaman -300 s/d -900 mdpl. Hal ini dikarenakan jumlah sumur produksi yang ada dapat menghasilkan kapasitas daya pembangkit yang telah didesain serta desain pembangkit *double flash steam* juga cocok dengan penggunaan sumur produksi yang sedikit (Zeyghami, 2010). Selain itu, apabila melakukan banyak penambahan sumur produksi, maka biaya penambahan sumur produksi juga akan semakin besar.

Kemudian pengaruh dari kedalaman produksi juga berpengaruh dalam menentukan strategi produksi yang baik. Hal ini terjadi karena pada zona reservoir produksi yang dalam, fluida yang dihasilkan memiliki *temperature* yang baik sehingga produksi uap yang dihasilkan dapat mencukupi kapasitas daya pembangkit yang telah di desain. Lokasi pada penempatan sumur produksi juga sangat berpengaruh dalam penentuan strategi produksi. Hal ini disebabkan karena lokasi penempatan sumur produksi yang tidak baik akan berpengaruh terhadap laju alir produksi yang dihasilkan. Lokasi sumur produksi dapat dilihat pada tahap *matching pressure* dan *temperature* (Pratama & Saptadji, 2015). Dari grafik penurunan *pressure* dan *temperature* yang telah dibuat menunjukkan bahwa kinerja dari *reservoir* pada lapangan N masih terjaga dengan baik sehingga masih dapat dikembangkan.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada lapangan yang diteliti, lapangan N memiliki potensi cadangan panas bumi sebesar 149.82MW
2. Dengan menggunakan metode *Double Flash Steam* kapasitas daya pembangkit yang didesain adalah 30MW, Skenario 1 (5 sumur Produksi dan 1 Sumur Injeksi) pada elevasi kedalaman -300 s/d -900 mdpl merupakan skenario produksi terbaik dengan daya yang dihasilkan sebesar 32.481, penurunan *pressure* sebesar 6 bar, penurunan *temperature* sebesar 5°C, dan penurunan daya sebesar 3.4MW.
3. Kondisi dari reservoir pada lapangan N dapat bertahan selama proses pengembangan dilakukan, hal ini disebabkan karena penurunan *pressure* dan *temperature* tidak terlalu signifikan.

#### 5.2. Saran

Setelah penelitian dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan oleh peneliti selanjutnya, antara lain sebagai berikut:

1. Melakukan Analisis Pengembangan Lapangan *Hydrothermal Reservoir* dengan melakukan perbandingan antara metode *Single Flash Steam* dengan *Double Flash Steam* dalam mendesign kapasitas daya pembangkit
2. Melakukan simulasi pemodelan desain *power plant* dari sumur produksi ke kapasitas daya pembangkit.
3. Melakukan Studi pengaruh sumur Injeksi terhadap kinerja reservoir panas bumi *Hydrothermal Reservoir*.
4. Menghitung Keekonomian pada penelitian tersebut.



## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, R., & Khasani. (2017). Pemodelan Lapangan Panasbumi Dieng , Indonesia Dengan Software Petrasim. *Seminar Nasional XII “Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi 2017.”*
- Arias, A., Dini, I., Casini, M., Fiordelisi, A., Perticone, I., & Dell’aiuto, P. (2010). Geoscientific Feature Update of the Larderello-Travale Geothermal System (Italy) for a Regional Numerical Modeling. *Proceedings World Geothermal Congress, April, 25–29.*
- Armstead, H. C. H. (2014). *Geothermal energy. Second edition.*
- Ashat, A., Ridwan, R., Prabata, T., Situmorang, J., Adityawan, S., & Ibrahim, R. (2019). NUMERICAL SIMULATION UPDATE of DIENG GEOTHERMAL FIELD, CENTRAL JAVA, INDONESIA. *Proceeding 41st New Zealand Geothermal Workshop 2019, 75.*
- Ciriaco, A. E., Zarrouk, S. J., & Zakeri, G. (2020). Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119*(February 2019), 109515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109515>
- Colpan, C. O. (2021). Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants. In *Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants*. <https://doi.org/10.1016/c2019-0-02799-9>
- Diaz, A. R., Kaya, E., & Zarrouk, S. (2015). Reinjection in geothermal fields, a worldwide review and analysis. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, April, 19–25.*
- DiPippo, R. (2012). Geothermal power plants. In *Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00708-3>
- DiPippo, Ronald. (2015). Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact: Fourth Edition. In *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02885-7>
- Ertunc, G., & Parlaktuna, M. (2013). Numerical modeling and performance prediction of Balcova geothermal field, Turkey. *Proceedings of 38th Stanford Geothermal Workshop*. [https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Ertunc.pdf%5Cnhttp://esd.lbl.gov/files/research/projects/tough/events/symposia/toughsymposium12/Ertunct\\_Goker-Balcova.pdf](https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Ertunc.pdf%5Cnhttp://esd.lbl.gov/files/research/projects/tough/events/symposia/toughsymposium12/Ertunct_Goker-Balcova.pdf)
- Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). Geothermal Reservoir Engineering. In *Geothermal Reservoir Engineering*. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64792-4>
- Hamdani, M. R., Pratama, H. B., & Sutopo. (2020). Updating the Conceptual Model of Lumut Balai Geothermal Field, South Sumatera, Indonesia Using Numerical Simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 417*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/417/1/012023>

- Hanano, M., Kajiwara, T., Hishi, Y., Arai, F., Asanuma, M., & Sato, K. (2005). Overview of Production at the Mori Geothermal Field, Japan. *World Geothermal Congress, April*, 1–10.
- Hidayat, I., Sutopo, & Pratama, H. B. (2016). Numerical Modelling of Kerinci Geothermal Field, Jambi, Indonesia. *The 4th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2016 Proceedings, August*.
- Iqbal, Kurniawan, Sutopo, Heru Berlian Pratama, R. A. (2018). *AN IMPROVED NATURAL STATE MODEL OF ULUMBU GEOTHERMAL FIELD, EAST NUSA TENGGARA, INDONESIA*. 17(1996).
- Lukmana, A. H. (2019). Skenario Pengembangan Sumur Injeksi pada Sumber Daya Panas Bumi Sistem Dominasi Air dengan Pemodelan Reservoir 3D Dinamik. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 3(1), 43. <https://doi.org/10.30588/jo.v3i1.493>
- Lund, J. W. (2007). Development and utilization of geothermal resources. *ISES Solar World Congress 2007, ISES 2007*, 1, 87–95. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_13)
- Mansoer, W. R., & Idral, A. (2015). Geothermal Resources Development in Indonesia: A History. *World Geothermal Congress 2015, April*, 19–25. [www.starenergy.co.id](http://www.starenergy.co.id)
- Marjuwan, O. D., Sutopo, & Pratama, H. B. (2016). A Natural State Reservoir Modelling of Silangkitang Geothermal Field in North Sumatra Using TOUGH-2 Simulator A Natural State Reservoir Modelling of Silangkitang Geothermal Field in North Sumatra Using TOUGH-2 Simulator. *The 4th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2016 Proceedings, 10-12 August*.
- Melysa, R., & Fitrianti, F. (2017). Analisis Potensi Daya Listrik Pada Sumur Produksi Panas Bumi Dengan Menggunakan Metode Back Pressure Pada Unit XY. *Journal of Earth Energy Engineering*, 6(1), 30–37. <https://doi.org/10.22549/jeee.v6i1.627>
- Mulyadi, & Ashat, A. (2011). Reservoir Modeling of the Northern Vapor-Dominated Two-Phase Zone of the Wayang Windu Geothermal Field, Java, Indonesia. *Proceedings of 36th Stanford Geothermal Workshop*, 1–7.
- Nizami, M., & Pratama, H. B. (2016). *Numerical Modelling of Namora-I-Langit Geothermal System , Sarulla , Indonesia Numerical Modelling of Namora-I-Langit Geothermal System , Sarulla , Indonesia*. February 2017.
- Nizami, M., Sutopo, & Heru. (2016). Numerical Modelling of Namora-I-Langit Geothermal System , Sarulla , Indonesia. *The 4th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2016 Proceedings, February 2017*.
- Novriansyah, A. (2013). Perkiraan Luas Reservoir Panas Bumi dan Potensi Listrik Pada Tahap Eksplorasi (Studi Kasus Lapangan X). *Journal of Earth Energy Engineering*, 2(2), 19–23. <https://doi.org/10.22549/jeee.v2i2.938>

- O’Sullivan, M. J., Pruess, K., & Lippmann, M. J. (2000). Geothermal reservoir simulation: the state-of-practice and emerging trends. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, May*, 4065–4070.
- O’Sullivan, M. J., Pruess, K., & Lippmann, M. J. (2001). State of the art geothermal reservoir simulation. *Geothermics*, 30(4), 395–429. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(01\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(01)00005-0)
- Pratama, H. B., & Saptadji, N. M. (2015). *Study of Production-Injection Strategies of Synthetic Geothermal Reservoir Liquid-Dominated Model With Numerical Study of Production-Injection Strategies of Synthetic Geothermal Reservoir Liquid-Dominated Model. January 2017.*
- Pratama, H. B., & Saptadji, N. M. (2016). Numerical Simulation for Natural State of Two-Phase Liquid Dominated Geothermal Reservoir with Steam Cap Underlying Brine Reservoir. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 42(1), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012006>
- Pratama, H. B., & Saptadji, N. M. (2018). Study of sustainable production in two-phase liquid dominated with steam cap underlying brine reservoir by numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 103(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/103/1/012005>
- Pruess, K., Curtis M. Oldenburg, dan G. M. (2012). TOUGH2 User’s Guide, Version 2.0. *Data Base*, 3304(January), 1–148.
- Putriyana, L., & Soekarno, H. (2015). Simulasi Pengembangan Lapangan Panas Bumi Lainea; the Development Simulation of Lainea Geothermal Field. ... *Energi Terbarukan*, 14(2), 117–134. <http://ketjurnal.p3tkebt.esdm.go.id/index.php/ket/article/view/47>
- Putriyana, Lia. (2018). *Simulasi Natural State Lapangan Panas Bumi Dolok Marawa Di Sumatera Utara Natural State Simulation of the Dolok Marawa Geothermal. 17(1)*, 9–18.
- Putriyana, Lia, & Soekarno, H. (2016). Simulasi Pengembangan Lapangan Panas Bumi Di Sumatera Barat. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*, 15(1), 33–44.
- Rashid, M. H. (2015). Electric Renewable Energy Systems. In *Electric Renewable Energy Systems*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14432-7>
- Richard, F., Suharsono, H., & Nandiwardhana, D. (2013). Model numerikal reservoir sistem panasbumi untuk mencari kondisi Natural State dan menganalisa sesitivitas panas pada reservoir menggunakan software TOUGH2. *Seminar Nasional Informatika 2013 UPN "Veteran" Yogyakarta, 2013(semnasIF)*, 62–71.
- Saptadji, N. . (2018). *Teknik Geothermal* (1st ed.). ITB Press.
- Supijo, M. C., Pratama, H. B., & Sutopo. (2019). Leapfrog 3D Temperature Distribution Based on Tough2 Numerical Modelling: a New Approach.

*Proceedings 41st New Zealand Geothermal Workshop, 25-27 November.*

Supijo, M. C., Wahjono, A. D., Lesmana, A., Harahap, A. H., Sutopo, Pratama, H. B., & Prabata, T. W. (2018). Updating Conceptual Model Using Numerical Modelling for Geothermal Green Field Prospect Area in Atadei , East Nusa Tenggara , Indonesia. *The 6th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2018 Proceedings, 5-8 September.*

Wirawan, A. Y. (2019). Pengaruh Sumur Injeksi Terhadap Reservoir Panas Bumi Dominasi Air pada Simulasi Lapangan Panas Bumi Dieng Unit II Menggunakan Software Tough-2. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.30588/jo.v3i1.489>

Yunita, L., Ratnaningsih, D. R., & Budiharjo, H. (2019). *Pengembangan Lapangan Panas Bumi “ S ” Water Dominated Menggunakan Software Tough2.* 3(2), 86–93.

Zeyghami, M. (2010). Thermo-economic Optimization of Geothermal Flash Steam Power Plants. *Proceedings World Geothermal Congress, April.* <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/2612.pdf>

