

PROYEK AKHIR - VM 191879

**ANALISA DAYA DAN EFISIENSI TURBIN VORTEX  
DITINJAU DARI KOMBINASI SUDUT *STAGGER*,  
*CLEARANCE* SUDU DENGAN *OUTLET*, DAN KAPASITAS  
ALIRAN**

**FAIZ RIDHO SYAFRUDDIN**  
NRP 10211810010003

Dosen Pembimbing  
**M. LUKMAN HAKIM, ST., MT.**  
NIP. 1994201911070

Program Studi Sarjana Terapan  
Teknologi Rekayasa Konversi Energi  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



PROYEK AKHIR - VM 191879

**ANALISA DAYA DAN EFISIENSI TURBIN VORTEX  
DITINJAU DARI KOMBINASI SUDUT *STAGGER*,  
*CLEARANCE* SUDU DENGAN *OUTLET*, DAN KAPASITAS  
ALIRAN**

**FAIZ RIDHO SYAFRUDDIN**  
NRP 10211810010003

Dosen Pembimbing  
**M. LUKMAN HAKIM, ST., MT.**  
NIP. 1994201911070

Program Studi Sarjana Terapan  
Teknologi Rekayasa Konversi Energi  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

**LEMBAR PENGESAHAN**

**ANALISA DAYA DAN EFISIENSI TURBIN VORTEX DITINJAU DARI  
KOMBINASI SUDUT *STAGGER*, *CLEARANCE* SUDU DENGAN *OUTLET*,  
DAN KAPASITAS ALIRAN**

**PROYEK AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan  
Teknik pada program studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi  
Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh:  
Faiz Ridho Syafruddin  
10211810010003

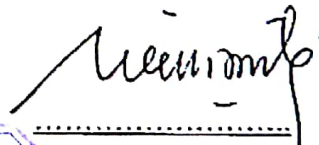
Telah disetujui dan disahkan oleh:  
Dosen Pembimbing

**M. Lukman Hakim, ST., MT.**  
NIP. 1994201911070

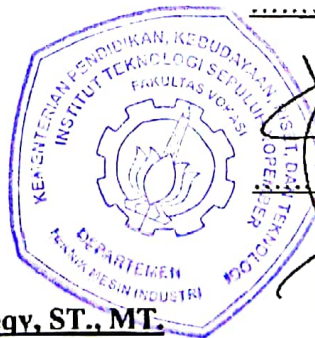


Dosen Penguji

**Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT.**  
NIP. 19620216 199512 1 001



**Ir. Joko Sarsetiyanto, MT.**  
NIP. 19610602 198701 1 001



**Rizaldy Hakim Ash Shiddieqy, ST., MT.**  
NIP. 1993201911071

Surabaya  
Juni, 2022

**APPROVAL SHEET**

**ANALYZING POWER AND EFFICIENCY VORTEX TURBINE BASED ON  
STAGGER ANGLE, RUNNER-OUTLET CLEARANCE, AND FLOW  
CAPACITY COMBINATION**

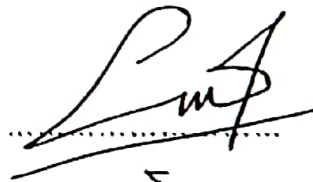
**FINAL PROJECT**

*Submitted to fulfill one requirements for obtaining a degree Bachelor of Applied  
Engineering at undergraduate studi program of Conversion Energy Engineerng  
Technology Departement of Industrial Mechanical Engineering  
Faculty of Vocational  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

*By:*  
**Faiz Ridho Syafruddin**  
10211810010003

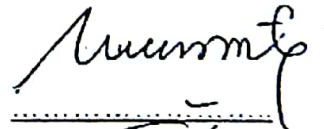
*Approved by Final Project Examiner Team:  
Advisor:*

**M. Lukman Hakim, ST., MT.**  
NIP. 1994201911070



*Examiner:*

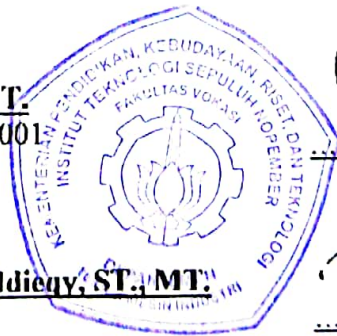
**Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT.**  
NIP. 19620216 199512 1 001



**Ir. Joko Sarsetiyanto, MT.**  
NIP. 19610602 198701 1 001



**Rizaldy Hakim Ash Shiddiqy, ST., MT.**  
NIP. 1993201911071



**Surabaya**  
**June, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Faiz Ridho Syafruddin / 10211810010003

Departemen : Teknik Mesin Industri

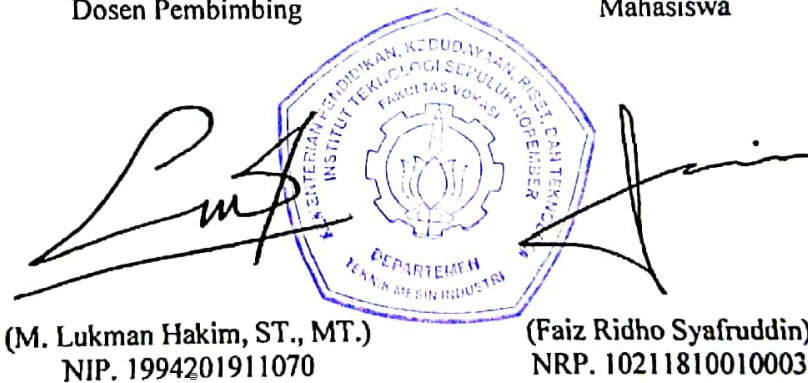
Dosen Pembimbing / NIP : M. Lukman Hakim, ST., MT. / 1994201911070

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul “Analisa Daya dan Efisiensi Turbin Vortex Ditinjau dari Kombinasi Sudut *Stagger*, *Clearance* Sudu Dengan *Outlet*, Dan Kapasitas Aliran” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana dikemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui,  
Dosen Pembimbing

Surabaya, 27 Juni 2022  
Mahasiswa



(M. Lukman Hakim, ST., MT.)  
NIP. 1994201911070

(Faiz Ridho Syafruddin)  
NRP. 10211810010003

## STATEMENT OF ORIGINALITY

*The undersigned below:*


*Name of Student / NRP* : Faiz Ridho Syafruddin / 10211810010003  
*Departement* : *Industrial Mechanical Engineering*  
*Advisor / NIP* : M. Lukman Hakim, ST., MT. / 1994201911070

*Hereby declare that the Final Project with the title of "Analyzing power and Efficiency Vortex Turbine Based on Stagger Angle, Runner-Outlet Clearance, And Flow Capacity Combination" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.*

*If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.*

*Acknowledged,  
Advisor*

*Surabaya, 27 June 2022  
Student*

  
(M. Lukman Hakim, ST., MT.)  
NIP. 1994201911070  
(Faiz Ridho Syafruddin)  
NRP. 10211810010003

# ANALISA DAYA DAN EFISIENSI TURBIN VORTEX DITINJAU DARI KOMBINASI SUDUT *STAGGER*, *CLEARANCE* SUDU DENGAN *OUTLET*, DAN KAPASITAS ALIRAN

Nama : Faiz Ridho Syafruddin  
NRP : 10211810010003  
Departemen : Teknik Mesin Industri FV - ITS  
Dosen Pembimbing : M. Lukman Hakim, ST., MT.

## ABSTRAK

Energi listrik merupakan kebutuhan pokok untuk menunjang produktivitas di berbagai sektor. Namun, 70-80% produksi energi listrik berasal dari pembangkit berbasis energi fosil. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) diklaim sebagai sumber energi bersih dan menjadi salah satu alternatif pembangkit listrik ramah lingkungan karena tidak melibatkan proses pembakaran hidrokarbon. Turbin vortex merupakan salah satu alternative PLTA mikro yang ramah lingkungan dan cocok digunakan untuk aliran sungai dengan karakteristik kapasitas dan *head* yang rendah. Setiap komponen turbin vortex memiliki peran terhadap kinerja turbin vortex. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh beberapa kombinasi faktor turbin vortex terhadap kinerja turbin vortex.

Penelitian ini menguji pengaruh kombinasi variasi sudut *stagger* sudu, *clearance* sudu dengan lubang *outlet*, dan kapasitas aliran terhadap nilai daya turbin dan efisiensi turbin vortex skala laboratorium dengan metode eksperimen faktorial. Adapun setiap variabel independen memiliki 3 variasi, sehingga apabila dikombinasikan akan membentuk 27 kombinasi variasi. Pada pengujian performa turbin vortex pengukuran torsi turbin vortex menggunakan metode *dynamometer* mekanis berupa *ropebrake*. Data yang diperoleh pada saat pengujian adalah beban pengereman (kg), putaran poros (rpm), dan tinggi aliran pada sisi *inlet* (m). Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan penghitungan teoritis untuk mendapatkan nilai daya (Watt) dan efisiensi (%) turbin vortex. Nilai yang didapatkan kemudian dianalisis menggunakan interpretasi komparasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga variabel independen pada penelitian ini saling memengaruhi terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan turbin vortex, dengan nilai efisiensi tertinggi yang dicapai sebesar 9,16 % pada pengujian variasi sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3cm pada kapasitas aliran 4,3131 l/s, serta nilai daya tertinggi dicapai sebesar 0,86 Watt pada pengujian variasi sudu sudut *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm dan pada kapasitas 5,137 l/s. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengkaji dan menguji pengaruh diameter sudu terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin vortex.

Kata kunci: Turbin vortex, daya dan efisiensi turbin, energi terbarukan

**ANALYZING POWER AND EFFICIENCY VORTEX TURBINE BASED ON  
STAGGER ANGLE, RUNNER-OUTLET CLEARANCE, AND FLOW  
CAPACITY COMBINATION**

**Author** : **Faiz Ridho Syafruddin**  
**Student Identity Number** : **10211810010003**  
**Departement** : **Industrial Mechanical Engineering FV - ITS**  
**Advisor** : **M. Lukman Hakim, ST., MT.**

**ABSTRACT**

*Electrical energy is a basic need to support productivity in various sectors. However, 70% -80% of electrical energy production comes from fossil energy-based plants. Aerial power plant (PLTA) is claimed to be a clean energy source and an alternative to environmentally friendly power plants because it does not involve the process of burning energy. Hydropower can take advantage of the potential of river flows scattered in all corners. To take advantage of river flows with low capacity and head characteristics, vortex turbines are the right choice as a microhydro power plant. This study aims to examine the effect of several combinations of turbine factors on the power and efficiency of the vortex turbine.*

*This study examines the effect of the combination of variations in the blade stagger angle, blade clearance with outlet holes, and flow capacity on the value of turbine power and laboratory-scale vortex turbine efficiency with the factorial experimental method. As for each independent variable has 3 variations, so that when combined will form 27 combinations of variations. In testing the performance of the vortex turbine, measuring the torque of the vortex turbine using a mechanical dynamometer method in the form of a ropebrake. The data obtained during the test were braking load (kg), shaft rotation (rpm), and flow height on the inlet side (m). The data is then analyzed using theoretical calculations to obtain the power value (Watt) and efficiency (%) of the vortex turbine. The values obtained are then analyzed using comparative interpretation*

*The results showed that the three independent variables in this study mutually influence the power and efficiency of the vortex turbine, with the highest efficiency value achieved at 9.16% in the 30o stagger angle blade variation test with 3cm clearance at a flow capacity of 4.271 l/s, and the highest power value was achieved at 0.86 Watt on testing the variation of the 27o stagger angle blade with a clearance of 5 cm and at a capacity of 5.087 l/s. In future research, it is expected to be able to examine and test the effect of the blade diameter on the power and efficiency produced by the vortex turbine.*

*Keywords: Water vortex turbines, turbine power and efficiency, renewable energi.*



## KATA PENGANTAR

Tidak ada yang lebih dalam yang dapat saya ucapkan selain rasa syukur dan terima kasih kepada Allah SWT. Sebab, rahmat dan hidayahNya telah mengantarkan penulis dalam menyelesaikan proyek akhir ini yang berjudul “Analisa Daya dan Efisiensi Turbin Vortex Ditinjau dari Kombinasi Sudut *stagger*, *Clearance* Sudu dengan *Outlet*, dan Kapasitas Aliran”. Penyusunan proyek akhir ini merupakan syarat menyelesaikan program studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Departemen Teknik Mesin Industri ITS.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membimbing dan memberi dukungan kepada penulis selama selama proses penyusunan laporan proyek akhir ini:

1. Bapak M. Lukman Hakim, ST., MT. selaku dosen pembimbing proyek akhir yang dengan penuh perhatian telah memberikan bimbingan, motivasi, dan masukan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Industri ITS dan sebagai dosen wali penulis.
3. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan baik secara moril dan materi, serta doa yang tak henti-hentinya.
4. Bapak Ibu Dosen dan seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin Industri ITS.
5. Teman-teman D3MITS 2018 yang telah bersama-sama melewati masa perkuliahan dan selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Pada penulisan laporan proyek akhir ini penulis menyadari adanya ketidaksempurnaan. Dengan demikian, penulis mengharapkan adanya masukan sebagai bahan evaluasi penulisan laporan proyek akhir di kemudian hari. Terima kasih.

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| LEMBAR PENGESAHAN   | i    |
| PERNYATAAN ORISINALITAS   | iii  |
| ABSTRAK   | v    |
| KATA PENGANTAR  | vii  |
| DAFTAR ISI  | viii |
| DAFTAR TABEL  | x    |
| DAFTAR GAMBAR   | xi   |
| DAFTAR LAMPIRAN   | xiv  |
| DAFTAR SIMBOL   | xv   |
| BAB I PENDAHULUAN   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang Masalah.....                                   | 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah .....                                       | 2    |
| 1.3 Batasan Masalah.....  | 2    |
| 1.4 Tujuan Penelitian .....                                       | 2    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA   | 3    |
| 2.1 Aliran Vortex .....   | 3    |
| 2.2 Turbin Air .....  | 3    |
| 2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Air .....                              | 3    |
| 2.2.2 Klasifikasi Turbin Air .....                                | 4    |
| 2.3 Turbin Vortex .....   | 7    |
| 2.4 Perhitungan dan Metode Pengukuran Performa Turbin Vortex..... | 9    |
| 2.4.1 Persamaan Kapasitas Aliran.....                             | 9    |
| 2.4.2 Persamaan Daya Air.....                                     | 10   |
| 2.4.3 Persamaan Torsi .....                                       | 11   |
| 2.4.4 Persamaan Kecepatan Angular .....                           | 11   |
| 2.4.5 Persamaan Daya Turbin .....                                 | 12   |
| 2.4.6 Persamaan <i>Tip Speed Ratio</i> .....                      | 12   |
| 2.4.7 Persamaan <i>Coefficient Power</i> .....                    | 12   |
| 2.4.8 Persamaan Efisiensi .....                                   | 12   |
| 2.5 Hubungan Antar Variabel .....                                 | 13   |
| BAB III METODE PENELITIAN   | 14   |
| 3.1 Peralatan Eksperimen Turbin Vortex.....                       | 14   |
| 3.2 Variabel Penelitian .....                                     | 17   |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3 Metode Penelitian.....   | 17        |
| 3.4 Alur Penelitian .....  | 19        |
| 3.5 Langkah Pengujian.....   | 21        |
| 3.6 Teknik Pengumpulan Data.....   | 22        |
| 3.7 Teknik Analisis Data.....  | 23        |
| <b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN</b>   | <b>24</b> |
| 4.1 Hasil Eksperimen .....   | 24        |
| 4.2 Perhitungan Kinerja Turbin Vortex.....                                       | 24        |
| 4.2.1 Kapasitas Air.....   | 24        |
| 4.2.2 Daya Air.....  | 25        |
| 4.2.3 Torsi .....  | 26        |
| 4.2.4 Kecepatan Angular.....   | 26        |
| 4.2.5 Daya Turbin .....  | 26        |
| 4.2.6 <i>Tip Speed Ratio</i> .....   | 27        |
| 4.2.7 <i>Coefficient of Power</i> .....  | 27        |
| 4.2.8 Efisiensi Turbin.....  | 27        |
| 4.3 Analisa Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Kinerja.....                   | 27        |
| 4.3.1 Unjuk Kerja Torsi Terhadap Putaran .....                                   | 28        |
| 4.3.2 Unjuk Kerja Daya Turbin Terhadap Putaran .....                             | 32        |
| 4.3.3 Unjuk Kerja Efisiensi Turbin Terhadap Putaran.....                         | 37        |
| 4.3.4 Unjuk Kerja <i>Coefficient Power</i> Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> ..... | 42        |
| 4.4 Analisa Penelitian.....  | 47        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>  | <b>51</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....  | 51        |
| 5.2 Saran.....   | 51        |
| <b>JADWAL KEGIATAN</b>   | <b>52</b> |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>  | <b>53</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>  | <b>64</b> |
| <b>BIODATA PENULIS</b>   | <b>97</b> |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabel 3.1</b> Dimensi basin .....  | 15 |
| <b>Tabel 3.2</b> Dimensi sudu turbin .....                                  | 16 |
| <b>Tabel 3.3</b> Spesifikasi pompa air .....                                | 17 |
| <b>Tabel 3.4</b> Variabel Independen.....                                   | 18 |
| <b>Tabel 3.5</b> Interaksi kombinasi eksperimen .....                       | 18 |
| <b>Tabel 4.1</b> Parameter pengujian turbin vortex .....                    | 24 |
| <b>Tabel 4.2</b> Pengambilan data contoh perhitungan .....                  | 24 |
| <b>Tabel 4.3</b> Ranking variabel independen fungsi daya turbin (Watt)..... | 49 |
| <b>Tabel 4.4</b> Ranking variabel independen fungsi efisiensi (%).....      | 50 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2.1</b> (a) aliran vortex bebas, (b) aliran vortex paksa .....  | 3  |
| <b>Gambar 2.2</b> Turbin Pelton .....   | 5  |
| <b>Gambar 2.3</b> Turbin Crossflow .....  | 5  |
| <b>Gambar 2.4</b> Turbin Francis .....  | 6  |
| <b>Gambar 2.5</b> Turbin Kaplan .....   | 7  |
| <b>Gambar 2.6</b> Gravitational Vortex Water Turbine power Plant .....  | 8  |
| <b>Gambar 2.7</b> Basin Spiral .....  | 8  |
| <b>Gambar 2.8</b> Sudu Turbin .....   | 9  |
| <b>Gambar 2.9</b> V-Notch Weir .....  | 9  |
| <b>Gambar 2.10</b> Grafik coefficient discharge V-Notch Weir .....  | 10 |
| <b>Gambar 2.11</b> Analisis head aliran saluran terbuka .....   | 10 |
| <b>Gambar 2.12</b> Ilustrasi pengukuran ketinggian pada sisi inlet basin .....  | 11 |
| <b>Gambar 2.13</b> Prinsip <i>rope brake</i> .....  | 11 |
| <b>Gambar 2.14</b> Ilustrasi pengukuran luas penampang pada sisi inlet .....  | 12 |
| <b>Gambar 3.1</b> Turbin vortex skala laboratorium .....  | 14 |
| <b>Gambar 3.2</b> Komponen penyusun peralatan eksperimen .....  | 14 |
| <b>Gambar 3.3</b> Rancangan Basin .....   | 15 |
| <b>Gambar 3.4</b> Geometri sudu turbin .....  | 16 |
| <b>Gambar 3.5</b> Pompa air .....   | 17 |
| <b>Gambar 3.6</b> Diagram alir penelitian .....   | 20 |
| <b>Gambar 4.1</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 28 |
| <b>Gambar 4.2</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut <i>stagger</i> 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi <i>clearance</i> 3cm, 5cm, dan 7 cm ..... | 28 |
| <b>Gambar 4.3</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut <i>stagger</i> 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi <i>clearance</i> 3cm, 5cm, dan 7 cm ..... | 29 |
| <b>Gambar 4.4</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 29 |
| <b>Gambar 4.5</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut <i>stagger</i> 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi <i>clearance</i> 3cm, 5cm, dan 7 cm ..... | 30 |
| <b>Gambar 4.6</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 30 |
| <b>Gambar 4.7</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 31 |
| <b>Gambar 4.8</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 31 |
| <b>Gambar 4.9</b> Grafik torsi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7 cm .....               | 32 |
| <b>Gambar 4.10</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7cm .....              | 33 |
| <b>Gambar 4.11</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....             | 33 |
| <b>Gambar 4.12</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7cm .....                | 34 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 4.13</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7cm .....              | 34 |
| <b>Gambar 4.14</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....           | 35 |
| <b>Gambar 4.15</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7cm .....            | 35 |
| <b>Gambar 4.16</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7cm .....            | 36 |
| <b>Gambar 4.17</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7cm .....            | 36 |
| <b>Gambar 4.18</b> Grafik daya terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3cm, 5cm, dan 7cm .....              | 37 |
| <b>Gambar 4. 19</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 38 |
| <b>Gambar 4. 20</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7cm .....      | 38 |
| <b>Gambar 4. 21</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 39 |
| <b>Gambar 4. 22</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 39 |
| <b>Gambar 4. 23</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 40 |
| <b>Gambar 4. 24</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 40 |
| <b>Gambar 4.25</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....      | 41 |
| <b>Gambar 4.26</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....      | 41 |
| <b>Gambar 4. 27</b> Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm .....     | 42 |
| <b>Gambar 4. 28</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 43 |
| <b>Gambar 4. 29</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 43 |
| <b>Gambar 4. 30</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 44 |
| <b>Gambar 4. 31</b> Grafik Coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 44 |
| <b>Gambar 4. 32</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 45 |
| <b>Gambar 4. 33</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 45 |
| <b>Gambar 4. 34</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 46 |
| <b>Gambar 4. 35</b> Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... | 46 |

**Gambar 4. 36** Grafik coefficient power terhadap TSR pada sudut stagger  $33^\circ$  kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi clearance 3 cm, 5 cm, dan 7 cm ..... 47

## DAFTAR LAMPIRAN

|  |    |
|--|----|
| <b>Lampiran 1.</b> Rancangan turbin vortex skala laboratorium .....  | 64 |
| <b>Lampiran 2.</b> Rancangan desain basin .....  | 65 |
| <b>Lampiran 3.</b> Dimensi sudu turbin dengan sudut stagger $27^\circ$ .....   | 66 |
| <b>Lampiran 4.</b> Dimensi sudu turbin dengan sudut stagger $30^\circ$ .....   | 67 |
| <b>Lampiran 5.</b> Sudu turbin dengan sudut stagger $33^\circ$ .....   | 68 |
| <b>Lampiran 6.</b> Dimensi <i>Pulley</i> .....   | 69 |
| <b>Lampiran 7.</b> Data hasil pengujian sudu dengan sudut stagger $27^\circ$ .....   | 70 |
| <b>Lampiran 8.</b> Data hasil pengujian sudu dengan sudut stagger $30^\circ$ .....   | 71 |
| <b>Lampiran 9.</b> Data hasil pengujian sudu dengan sudut stagger $33^\circ$ .....   | 73 |
| <b>Lampiran 10.</b> Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger $27^\circ$ .....              | 75 |
| <b>Lampiran 11.</b> Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger $30^\circ$ .....              | 76 |
| <b>Lampiran 12.</b> Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut stagger $33^\circ$ .....        | 78 |
| <b>Lampiran 13.</b> Tabel hasil perhitungan daya turbin (Watt) terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger $27^\circ$ ..... | 79 |
| <b>Lampiran 14.</b> Tabel hasil perhitungan daya turbin (Watt) terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger $30^\circ$ ..... | 81 |
| <b>Lampiran 15.</b> Tabel hasil perhitungan daya turbin terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut stagger $33^\circ$ .....  | 82 |
| <b>Lampiran 16.</b> Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut stagger $27^\circ$ .....    | 84 |
| <b>Lampiran 17.</b> Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut stagger $30^\circ$ .....    | 86 |
| <b>Lampiran 18.</b> Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger $33^\circ$ .....          | 88 |
| <b>Lampiran 19.</b> Tabel hasil perhitungan coefficient power terhadap TSR variasi sudu dengan sudut stagger $27^\circ$ .....      | 90 |
| <b>Lampiran 20.</b> Tabel hasil perhitungan coefficient power terhadap TSR variasi sudu dengan sudut stagger $30^\circ$ .....      | 91 |
| <b>Lampiran 21.</b> Tabel hasil perhitungan coefficient power terhadap TSR variasi sudu dengan sudut stagger $33^\circ$ .....      | 93 |
| <b>Lampiran 22.</b> Sudu turbin vortex skala laboratorium variasi sudut stagger $27^\circ$ , $30^\circ$ , $33^\circ$ .....         | 95 |
| <b>Lampiran 23.</b> Dokumentasi pengujian turbin vortex di Departemen Teknik Mesin Industri. ....                                  | 96 |



## DAFTAR SIMBOL

| Simbol    | Keterangan                     | Satuan / Unit        |
|-----------|--------------------------------|----------------------|
| $A$       | Luas penampang                 | $m^2$                |
| $B$       | Lebar saluran air <i>inlet</i> | $m$                  |
| $Cd$      | Koefisien Debit                |                      |
| $Cp$      | Koefisien <i>power</i>         |                      |
| $d$       | Diameter                       | $m$                  |
| $E_p$     | Energi Potensial               | Joule                |
| $E_k$     | Energi Kinetik                 | Joule                |
| $F$       | Gaya                           | N                    |
| $g$       | Percepatan gravitasi           | $m/s^2$              |
| $h$       | Tinggi air sisi <i>inlet</i>   | $m$                  |
| $H$       | Tinggi basin                   | $m$                  |
| $m$       | Massa                          | kg                   |
| $\dot{m}$ | Laju aliran massa              | kg/s                 |
| $n$       | Putaran                        | rpm                  |
| $\eta$    | Efisiensi                      | %                    |
| $P$       | Daya                           | Watt ( $kgm^2/s^3$ ) |
| $Q$       | Kapasitas aliran               | $m^3/s$              |
| $R$       | Radius Sudu                    | $m$                  |
| $r$       | Radius <i>Pulley</i>           | $m$                  |
| $t$       | Waktu (detik)                  | S                    |
| $T$       | Torsi                          | N.m                  |
| $u$       | Kecepatan keliling             | $m/s$                |
| $\bar{v}$ | Kecepatan aliran               | $m/s$                |
| $V_w$     | Kecepatan air masuk sudu gerak | $m/s$                |
| $\theta$  | Sudut <i>V-Notch Weir</i>      | ( $^\circ$ )         |
| $\rho$    | Massa jenis air                | $kg/m^3$             |
| $\omega$  | Kecepatan Angular              | rad/s                |
| $\pi$     | <i>phi</i>                     | 3,14                 |
| $\lambda$ | <i>Tip Speed Ratio</i>         |                      |

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Penyediaan energi nasional masih bergantung pada energi fosil, di antaranya yakni batubara, gas bumi, dan minyak bumi. Terbukti pada 2019, tercatat 90,7% penyediaan energi nasional didominasi oleh energi fosil (BPPT, 2021). Hal ini menjadi ancaman bagi ketersediaan energi apabila fosil terus dieksploitasi tanpa ada pengendalian, serta tidak ada rencana strategis penggunaan energi alternatif. Di samping itu, penggunaan energi fosil yang berlebihan juga berisiko merusak lingkungan dan menyebabkan pemanasan global. Untuk mengurangi ketergantungan energi fosil, pemerintah melalui PP No. 79 tahun 2014 mengenai kebijakan energi nasional menetapkan target capaian energi baru terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (BPPT, 2021). Percepatan transisi menuju energi bersih juga menjadi salah satu isu dari tiga isu prioritas pada gelaran acara G20 Indonesia 2022. Penggunaan energi terbarukan pada pembangkit listrik secara progresif dapat menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Dari beberapa pembangkit listrik energi baru terbarukan, pembangkit listrik tenaga air mendominasi produksi energi listrik dengan kapasitas terpasang sebesar 4.621 MW (BPPT, 2021). Dengan demikian, pemanfaatan sumber daya air sangat berpotensi sebagai sumber konversi energi fluida menjadi energi mekanis yang dapat menghasilkan energi listrik. Sebagian besar wilayah Indonesia didominasi oleh perairan, dibuktikan oleh 13 provinsi dengan 68 induk sungai yang mengalir ke pelosok desa.

Aliran anak sungai di pelosok desa cenderung memiliki karakteristik *head* dan laju aliran yang rendah. Turbin vortex merupakan sebuah pilihan yang tepat untuk pembangkit energi listrik di pelosok desa karena turbin vortex dapat beroperasi dengan *head* dan laju aliran yang rendah (Nishi et al., 2020). Turbin vortex merupakan pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi potensial air yang diubah menjadi energi kinetik tangensial dengan mengalirkan air ke basin. Kemudian, aliran tersebut akan membentuk pusaran air yang energinya dapat diekstraksi oleh sudu turbin. Beberapa penelitian terhadap komponen turbin vortex telah dilakukan untuk mencapai daya dan efisiensi turbin terbaik. Fitroh and Adiwibowo (2018) melakukan penelitian pengaruh sudut *stagger* dan kapasitas aliran terhadap daya dan efisiensi turbin. Hasilnya, sudut *stagger* sebesar  $22,5^\circ$  pada kapasitas 13,44350 l/s menghasilkan daya turbin yang lebih optimal dibandingkan dengan sudut  $0^\circ$ ,  $7,5^\circ$ , dan  $15^\circ$ . Dengan demikian, kapasitas aliran juga memengaruhi daya dan efisiensi turbin vortex. Di sisi lain, penelitian Suwoto, Sunarwo and Supriyo, (2014) menunjukkan bahwa sudut *stagger* sebesar  $30^\circ$  menghasilkan efisiensi yang lebih optimal dibandingkan dengan sudut *stagger* sebesar  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Kedua penelitian eksperimen tersebut (Fitroh & Adiwibowo, 2018; Suwoto et al., 2014) menunjukkan sudut *stagger* optimal yang berbeda. Untuk mengetahui sudut *stagger* yang paling optimal, perlu adanya penelitian lebih lanjut yang menguji sudut *stagger* sebesar  $22,5^\circ$  hingga  $30^\circ$  dengan rentang sudut *stagger* yang lebih kecil.

Gibran et al., (2017) melakukan perancangan turbin vortex dengan variasi jarak antara sudu dengan lubang *outlet*. Dari pengujian tersebut, diperoleh efisiensi

maksimum sebesar 76,02% pada jarak antara sudu dengan lubang *outlet* sebesar 6 cm dan tinggi silinder basin sebesar 100 cm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *clearance* sudu dengan lubang *outlet* memengaruhi efisiensi dan daya turbin, optimalnya pada rasio 6%.

Berbagai penelitian telah menguji pengaruh komponen turbin aliran vortex terhadap kinerja turbin. Namun, penelitian-penelitian tersebut hanya menguji satu atau dua faktor saja. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian kombinasi pengaruh beberapa variabel terhadap kinerja turbin vortex secara simultan. Metode eksperimen digunakan untuk mengetahui pengaruh sudut *stagger*, *clearance* sudu dengan lubang *outlet*, dan kapasitas aliran terhadap daya dan efisiensi turbin vortex skala laboratorium.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini yakni;

Bagaimana pengaruh sudut *stagger* sudu sebesar  $27^\circ$ ,  $30^\circ$ , dan  $33^\circ$ , *clearance* sudu dengan *outlet* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm, serta kapasitas aliran terhadap daya dan efisiensi turbin vortex?

### **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan kontruksi turbin vortex dengan skala laboratorium.
2. Penelitian ini menguji pengaruh kombinasi variabel independen terhadap variabel dependen berupa daya dan efisiensi turbin vortex.
3. Mekanika kekuatan material sudu diabaikan.
4. Torsi turbin diukur menggunakan *rope brake dynamometer* dan koefisien gesek tali diabaikan.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian turbin vortex skala laboratorium ini adalah:

Menganalisa pengaruh sudut *stagger* sudu sebesar  $27^\circ$ ,  $30^\circ$ , dan  $33^\circ$ , *clearance* sudu dengan *outlet* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm, serta kapasitas aliran terhadap daya dan efisiensi turbin vortex.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Aliran Vortex

Vortex merupakan sebuah fenomena umum pada massa fluida yang sebagian besar partikel-partikelnya bergerak di sepanjang jalur lengkung atau aliran fluida berputar membentuk lingkaran konsentris. Vortex merupakan salah satu jenis aliran permukaan bebas yang dapat dibentuk oleh fluida. Aliran vortex dapat berputar karena terdapat perbedaan antara kecepatan dan lapisan fluida yang berdekatan. Pada pusaran air atau aliran vortex terdapat momentum sudut, energi, dan massa. Secara umum, Herbhakti (2020) membagi dua jenis aliran vortex yakni:

1. Aliran Vortex Paksa

Aliran vortex paksa merupakan aliran yang massa fluidanya terbentuk karena adanya faktor eksternal berupa torsi konstan diberikan pada massa fluida. Kemudian dari aliran tersebut mengeluarkan energi dan membentuk fluida yang bergerak berputar (Rajput, 2011).

2. Aliran Vortex Bebas

Aliran vortex bebas adalah pusaran yang terbentuk akibat fenomenal natural dan fluida tidak terpengaruh gaya dari luar sistem. Karakteristik dari vortex bebas yakni kecepatan tangensial dari partikel fluida berputar pada jarak tertentu dari inti pusaran (Herbhakti, 2020). Aliran vortex bebas terbentuk karena adanya lubang *outlet* pada dasar basin atau penampang (Nishi et al., 2020; Rajput, 2011)



**Gambar 2.1** (a) aliran vortex bebas, (b) aliran vortex paksa  
(uta.pressbooks.pub)

### 2.2 Turbin Air

Turbin air merupakan mesin fluida putar yang menyerap energi dari pergerakan aliran air. Turbin air memiliki dua komponen utama yaitu *stationary blade* dan *rotary blade*. *Stationary blade* atau *guide* berfungsi untuk mengarahkan aliran fluida ke *rotary blade* (Lihat Gambar 2.3). Sementara itu, *rotary blade* atau sudu putar berfungsi mengubah arah dan kecepatan aliran fluida sehingga timbul gaya yang memutar poros (Gibran et al., 2017).

#### 2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Air

Prinsip kerja turbin air memanfaatkan energi potensial dan energi kinetik air kemudian diubah menjadi energi (torsi). Energi potensial air merupakan energi yang terkandung pada air yang didasarkan pada perbedaan ketinggian jatuh air,

sehingga diperlukan perbedaan ketinggian agar turbin dapat memanfaatkan energi potensial menjadi energi yang membangkitkan gerak. Di sisi lain, energi kinetik berhubungan dengan suatu objek benda yang bergerak. Energi kinetik dihasilkan oleh massa benda dan kecepatan dari benda tersebut bergerak. Oleh karena itu, apabila suatu objek menerima energi potensial dan energi kinetik dapat menghasilkan energi mekanik ( $E_m$ ).

### 2.2.2 Klasifikasi Turbin Air

Pada kondisi tertentu diperlukan perencanaan mengenai penggunaan turbin air yang cocok untuk disesuaikan dengan potensi sumber air, arah aliran memasuki turbin, dan beda ketinggian. Secara umum, berdasarkan model aliran air masuk ke dalam runner, turbin air dikategorikan menjadi tiga tipe, yaitu:

#### A. Turbin aliran tangensial

Pada jenis turbin ini aliran air melewati nozzle kemudian menghantam runner secara tangensial atau tegak lurus dengan poros turbin (Rajput, 2011). Contoh turbin aliran tangensial yaitu turbin pelton.

#### B. Turbin aliran aksial

Pada turbin aliran aksial aliran air masuk ke dalam turbin secara aksial atau sejajar dengan sumbu poros turbin (Rajput, 2011). Contoh turbin aliran aksial adalah turbin kaplan.

#### C. Turbin aliran campuran (radial dan aksial)

Pada turbin aliran campuran aliran air masuk secara radial kemudian keluar turbin secara aksial sejajar dengan poros turbin (Rajput, 2011). Contoh turbin aliran campuran yaitu, turbin francis dan turbin vortex.

Berdasarkan prinsip kerja dalam mengubah energy potensial air menjadi energy mekanis, turbin air dibagi menjadi 2 macam yakni turbin air impuls dan turbin air reaksi.

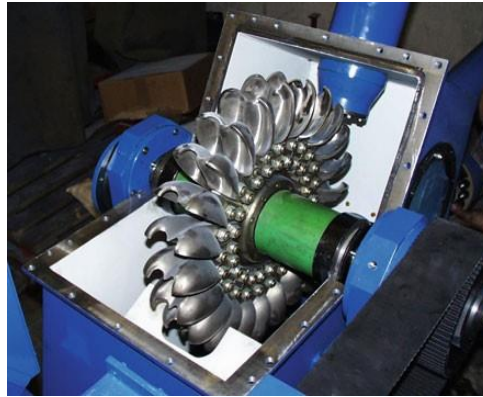
#### A. Turbin Air Impuls

Turbin impuls digerakkan oleh satu atau lebih pancaran air bebas berkecepatan tinggi. Contoh umum dari turbin impuls adalah kincir air. Pada suatu kincir air, pancaran air bergerak karena didorong oleh gravitasi; energi kinetik air dipindahkan ke roda yang kemudian menghasilkan gerak. Dalam bentuk turbin impuls yang lebih modern, pancaran air dipercepat dalam nozzle di luar roda turbin. Jika gesekan dan gravitasi diabaikan, maka tekanan fluida maupun kecepatan relatif terhadap runner juga tidak berubah saat fluida melewati *buckets* turbin. Oleh karena itu pada turbin impuls, percepatan fluida dan penurunan tekanan terjadi pada nozzle di luar sudu, dan runner tidak dialiri fluida secara penuh. Kemudian, gerak turbin merupakan ekstraksi akibat dari perubahan momentum yang besar dari fluida (Pritchard & Leylegian, 2011).

##### 1. Turbin Pelton

Turbin Pelton tergolong sebagai turbin impuls, turbin ini pertama kali dikembangkan oleh Lester Allan Pelton (1829– 1908), dan sangat cocok untuk pembangkit listrik dengan karakteristik *head* yang tinggi. Aliran bertekanan tinggi memasuki *runner* melalui komponen *nozzle* atau multi jet. Kapasitas aliran yang masuk ke turbin dapat diatur menggunakan *needle valve* untuk

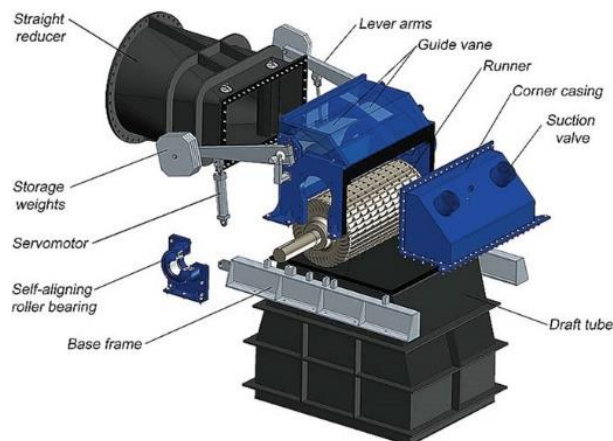
mengatur daya output turbin. Turbin pelton memiliki *runner* yang terdiri dari beberapa *bucket* yang didesain khusus untuk menangkap energy dari pancaran air. Pancaran air yang keluar dari *nozzle* akan menghantam tepat di tengah *bucket* dan air akan keluar ke arah samping *bucket* (Carravetta et al., 2018).



**Gambar 2.2** Turbin Pelton  
(Carravetta et al., 2018)

## 2. Turbin Crossflow

Turbin Crossflow adalah salah satu turbin impuls dan pertama kali dikembangkan oleh Anthony Michell, Donát Bánki, dan Fritz Ossberger. Turbin ini telah banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga air kecil, dengan rata-rata *head* 2 hingga 400 meter dan kapasitas aliran sebesar 20 hingga 2000 l/s. Pada turbin crossflow, air mengalir dari saluran masuk menuju guide vane kemudian menyebrangi runner dan keluar melalui saluran *outlet*. Turbin crossflow dapat digunakan secara vertikal maupun horizontal (Carravetta et al., 2018).



**Gambar 2.3** Turbin Crossflow  
(Carravetta et al., 2018)

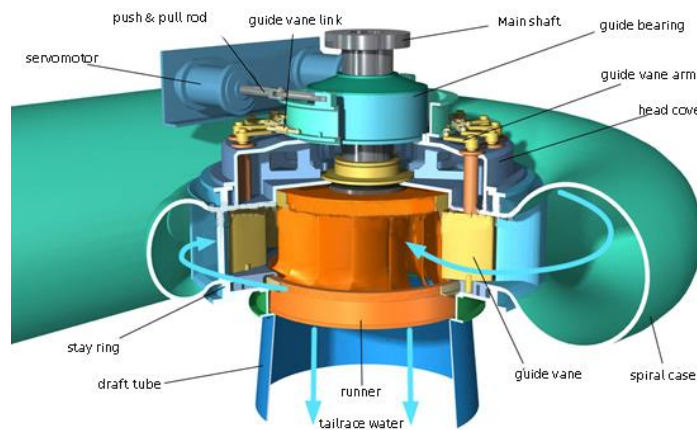
## B. Turbin Air Reaksi

Pada turbin reaksi, sebagian dari perubahan tekanan terjadi secara eksternal dan sebagian terjadi di dalam sudu-sudu yang bergerak. Percepatan eksternal terjadi

dan aliran diputar untuk memasuki *runner* ke arah yang seharusnya saat melewati nozel atau bilah stasioner, yang disebut *guide vanes* atau *wicket gates*. Percepatan fluida tambahan relatif terhadap rotor terjadi di dalam sudu-sudu yang bergerak, sehingga kecepatan relatif dan tekanan aliran berubah saat melintasi runner. Oleh karena turbin reaksi mengalir penuh oleh fluida, turbin ini umumnya dapat menghasilkan daya yang lebih besar untuk ukuran keseluruhan tertentu daripada turbin impuls (Pritchard & Leylegian, 2011). Beberapa turbin yang tergolong dalam jenis turbin reaksi antara lain adalah:

1. Turbin Francis

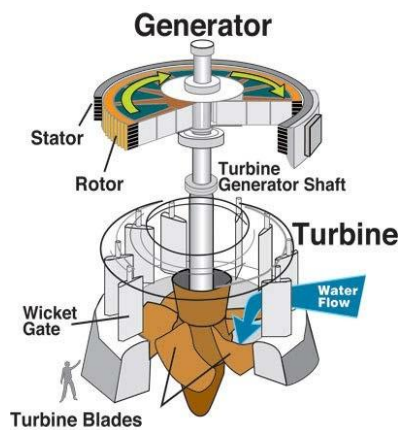
Pada turbin reaksi tipe Francis, air masuk mengalir secara melingkar melalui casing turbin. Kemudian, air memasuki pinggiran *guide vanes* secara stasioner dan mengalir ke arah *runner*. Air memasuki *runner* hampir secara radial dan diputar ke bawah untuk keluar hampir secara aksial. Selanjutnya, pola aliran dapat dianggap sebagai pompa sentrifugal secara terbalik. Air yang meninggalkan *runner* mengalir melalui *diffuser* yang dikenal sebagai *draft tube* sebelum memasuki *tailrace* (Pritchard & Leylegian, 2011).



**Gambar 2.4** Turbin Francis  
(Carravetta et al., 2018)

2. Turbin Kaplan

Pada tipe Turbin Kaplan, cara kerja masuknya air mirip dengan yang ada di turbin Francis, tetapi aliran air diputar untuk mengalir hampir secara aksial sebelum bertemu dengan runner turbin. Aliran yang meninggalkan runner dapat melewati draft tube (Pritchard & Leylegian, 2011).



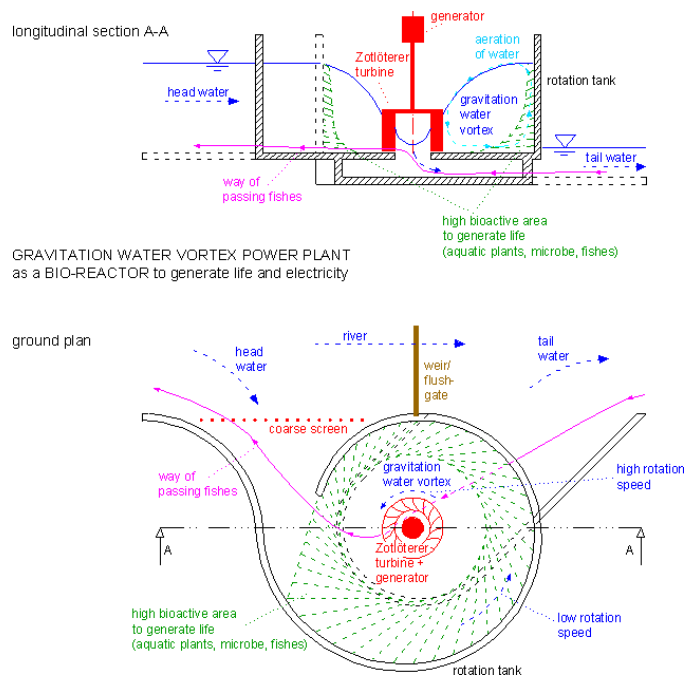
**Gambar 2.5** Turbin Kaplan  
(Carravetta et al., 2018)

### 2.3 Turbin Vortex

Tenaga pusaran air pertama kali dikenalkan oleh Viktor Schaubberger, seorang pengamat fenomena alam sekaligus pelopor ekoteknologi berkebangsaan Austria. Inspirasi desain Schaubberger berasal dari pengamatannya pada aliran sungai deras yang membentuk dinamika fluida dengan sendirinya (Bartholomew, 2005 dalam Timilsina et al, 2018). Pada tahun 1930, Schaubberger memperkenalkan prototipe *suction turbine* dimana air dialirkan masuk ke *vessel* berbentuk kubah (telur) dan menghasilkan pusaran permukaan bebas dimana tenaga air diekstraksi dari aliran rotasi tinggi yang dihasilkan oleh bidang *vessel* (Timilsina et al, 2018). Hingga pada tahun 2004, *Gravitational Water Vortex power Plant* atau yang lebih dikenal sebagai turbin vortex mulai dikembangkan oleh Frans Zotloeterer, peneliti berkebangsaan Austria. Turbin vortex mulai berkembang dan banyak digunakan pada tahun 2005 di Obergrafendorf, Austria.

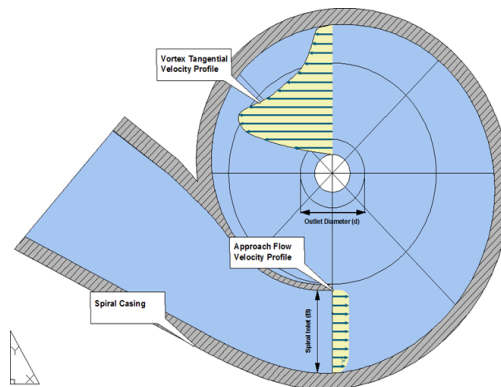
Turbin air vortex atau *Gravitational Water Vortex power Plant* (GWVPP) pertama kali dikembangkan oleh Frans Zoeloterer. Turbin Vortex merupakan turbin air yang memanfaatkan energi kinetik pusaran gravitasi kemudian menghasilkan energi mekanik (torsi) yang diubah menjadi energi listrik oleh generator. Pusaran gravitasi diciptakan oleh dinding basin dan lubang *outlet* pada bagian dasar basin. Turbin vortex dapat menghasilkan daya dengan *head* dan laju aliran yang rendah (Nishi et al., 2020). *Head* yang diperlukan untuk menggerakkan turbin ini relatif sangat rendah yaitu berkisar antara 0,7 - 2 meter (Herbhakti, 2020). Selain itu, turbin vortex juga memiliki konstruksi dan sistem yang sederhana, sehingga memudahkan perawatan turbin air.





**Gambar 2.6** *Gravitational Vortex Water Turbine power Plant* (Zotloeterer (2002, dalam Bath, 2014))

Komponen utama pada GWVPP terdiri atas kanal, basin dengan lubang *outlet*, dan rotor turbin (R. Dhakal et al., 2017). Basin adalah sebuah tabung yang berfungsi untuk membentuk dan meningkatkan pusaran air, serta berperan sebagai penggerak rotasi turbin.

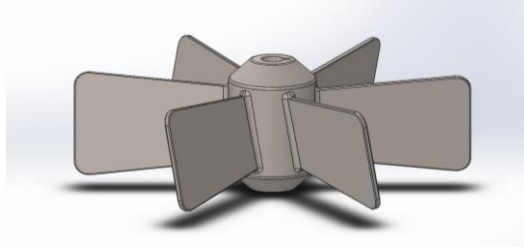


**Gambar 2.7** *Basin Spiral* (Mulligan & Hull, 2010)

Sudu turbin adalah komponen yang berperan untuk mengekstraksi energi kinetik dengan efisiensi yang wajar kemudian diubah menjadi energi mekanik dengan torsi dan kecepatan rotasi (Carravetta et al., 2018). Tinggi sudu turbin direncanakan menggunakan persamaan berikut. Rasio tinggi sudu turbin terhadap tinggi basin optimal pada 0,31-0,32 (Bajracharya et al.,2020).

$$height\ ratio = \frac{runner\ height}{basin\ height} \dots\dots\dots(2.1)$$

(Bajracharya et al., 2020)



**Gambar 2.8** Sudu Turbin

**2.4 Perhitungan dan Metode Pengukuran Performa Turbin Vortex**

Berikut merupakan alat ukur yang dipakau untuk mengambil data pada penelitian ini dan persamaan yang digunakan untuk mencapai nilai daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin vortex.

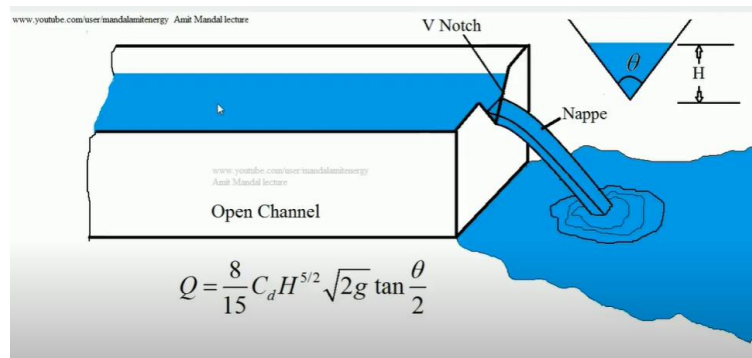
**2.4.1 Persamaan Kapasitas Aliran**

Kapasitas aliran merupakan laju aliran air dalam bentuk satuan volume yang melewati suatu penampang air per satuan waktu. Untuk mengetahui nilai kapasitas aliran, dapat menggunakan alat ukur *V-Notch Weir*. *V-Notch Weir* adalah sebuah bendungan yang menahan air sehingga mengatakik segitiga V yang digunakan untuk mengukur kapasitas aliran dan cocok digunakan untuk kapasitas aliran kecil, namun *V-Notch Weir* juga dapat mengukur secara wajar kapasitas aliran yang besar pula (Pritchard & Leyelegian, 2011). dengan persamaan berikut:

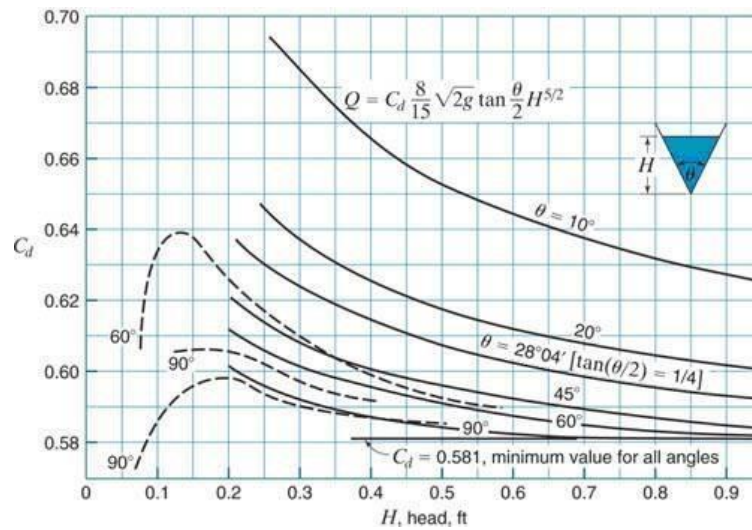
$$Q = Cd \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot tg \frac{\theta}{2} \cdot H^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots(2.2)$$

(Pritchard & Leyelegian, 2011:648)

Untuk mengetahui koefisien discharge (Cd) pada persamaan *V-Notch Weir* tersebut dapat diperoleh dengan grafik fungsi head dan *coefficient angle V-Notch Weir*.



**Gambar 2.9** *V-Notch Weir*  
(Pritchard & Leyelegian, 2011)



**Gambar 2.10** Grafik *coefficient discharge V-Notch Weir* (Pritchard & Leylegian, 2011)

### 2.4.2 Persamaan Daya Air

Untuk dapat mengetahui daya (Watt) yang terkandung pada aliran air, dapat menggunakan persamaan berikut.

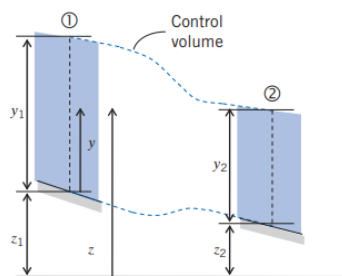
$$P_{air} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots(2.3)$$

(Pritchard & Leylegian, 2011)

Sementara itu, total head atau energy head dalam aliran saluran terbuka didefinisikan sebagai persamaan berikut.

$$H = z + y + \frac{\bar{V}^2}{2g} \dots\dots\dots(2.4)$$

(Pritchard & Leylegian, 2011)

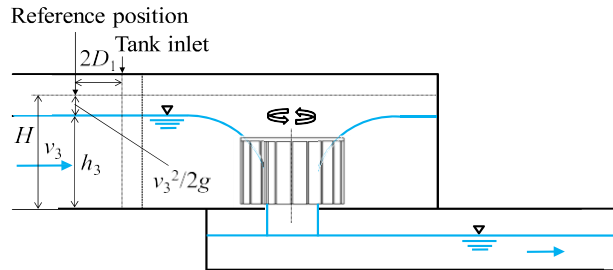


**Gambar 2.11** Analisis *head* aliran saluran terbuka (Pritchard & Leylegian, 2011)

Dimana  $y$  dan  $z$  masing-masing adalah tinggi permukaan aliran (kedalaman) aliran lokal dan elevasi dasar saluran. Ini adalah ukuran dari energi mekanik (kinetik dan potensial) aliran. Oleh karena itu, dapat dilihat bahwa perubahan spesifik head bergantung pada ketinggian. *Head* spesifik dapat berkurang,

bertambah, atau tetap konstan, tergantung pada ketinggian *bed elevation*. (Pritchard & Leylegian, 2011). Sehingga pada penelitian ini, menggunakan persamaan sebagai berikut (Nishi et al., 2020).

$$H = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} \dots\dots\dots(2.5)$$



**Gambar 2.12** Ilustrasi pengukuran ketinggian pada sisi *inlet* basin (Nishi et al., 2020)

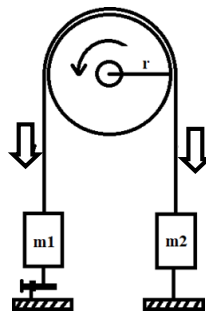
**2.4.3 Persamaan Torsi**

Perhitungan torsi (N.m) pada penelitian ini menggunakan *dynamometer* jenis mekanis yaitu *rope brake* atau pengereman dengan tali (Lihat Gambar 2.11). Dalam hal ini, *dynamometer rope brake* menggunakan *pulley* yang dililit dengan tali. Gaya gesek yang terjadi pada keliling *pulley* menghasilkan torsi yang mengacu dari titik tengah *brake drum* atau *pulley* (Silaen, 2015).

$$\tau = F \cdot r \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\tau = ((m_2 - m_1) \cdot g) \cdot r \dots\dots\dots(2.7)$$

(R.S Khurmi & J.K. Gupta, 2005)



**Gambar 2.13** Prinsip *rope brake*

**2.4.4 Persamaan Kecepatan Angular**

Persamaan kecepatan angular dapat dicapai dengan menggunakan persamaan berikut. Nilai rpm (*n*) didapatkan dengan menggunakan alat ukur tachometer.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \dots\dots\dots(2.8)$$

### 2.4.5 Persamaan Daya Turbin

Daya turbin (Watt) merupakan daya yang dihasilkan oleh putaran turbin. Secara konseptual, laju kerja yang dilakukan pada rotor adalah diberikan oleh produk titik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) dan torsi yang diterapkan ( $\tau$ ) (Pritchard & Leylegian, 2011). Sehingga untuk mencapai nilai daya turbin dapat dengan mengalikan torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin dengan kecepatan sudut rotor turbin.

$$P_{turbin} = \tau \cdot \omega \dots \dots \dots (2.9)$$

### 2.4.6 Persamaan Tip Speed Ratio

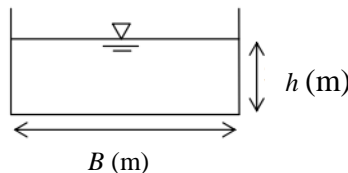
Tip Speed Ratio atau TSR ( $\lambda$ ) adalah perbandingan kecepatan putaran keliling turbin terhadap kecepatan aksial fluida, berikut merupakan persamaan untuk mengetahui TSR (Silaen, 2015).

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{\bar{v}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Sementara itu, untuk mengetahui kecepatan aliran ( $v$ ) dapat membagi kapasitas aliran dengan luas penampang saluran *inlet*, yakni dengan persamaan berikut.

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\bar{v} = \frac{Q}{B \cdot h} \dots \dots \dots (2.12)$$



**Gambar 2.14** Ilustrasi pengukuran luas penampang pada sisi *inlet*

### 2.4.7 Persamaan Coefficient Power

coefficient of power ( $C_p$ ) atau koefisien daya adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin dengan daya fluida air, dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$C_p = \frac{P_{turbin}(Watt)}{P_{air}(Watt)} \dots \dots \dots (2.13)$$

(Silaen, 2015)

### 2.4.8 Persamaan Efisiensi

Efisiensi turbin merupakan daya terpakai ditinjau melalui perbandingan daya turbin dengan daya air. Efisiensi turbin menunjukkan kinerja turbin air; semakin besar

efisiensi yang dihasilkan, maka semakin besar kinerja turbin, begitu juga sebaliknya.

$$\eta_{turbin} = Cp \times 100\% \dots\dots\dots(2.14)$$

## 2.5 Hubungan Antar Variabel

Salah satu faktor yang memengaruhi kinerja turbin air adalah kapasitas aliran, pada kapasitas aliran yang sama, luas penampang yang mengecil akan meningkatkan kecepatan aliran air. Dengan demikian, untuk meningkatkan kecepatan aliran air maka perlu merancang *inlet width* dengan ukuran yang kecil. Pada penelitian Dhakal et al., 2014 yang berjudul “*Effect of Dominant Parameters for Conical Basin: Gravitational Water Vortex power Plant*” menyimpulkan bahwa dimensi optimal pada *inlet width* (lebar saluran inlet) yakni 100 mm. Selain dimensi lebar inlet, dimensi lubang *outlet* pada basin memengaruhi bentuk pusaran air secara natural. Dhakal et al., (2014) dan Mulligan & Hull, (2010) menyimpulkan bahwa kekuatan optimal pusaran air terbentuk pada lubang *outlet* dengan diameter 14-18% dari diameter basin ( $d/D$ ). Perbandingan tersebut berlaku untuk turbin dengan *head* rendah maupun tinggi.

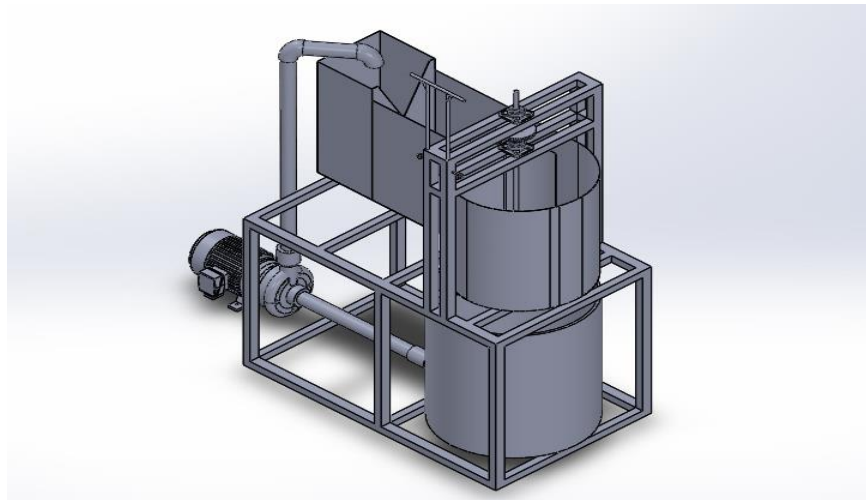
Selain dimensi pada basin, geometri sudu turbin juga memengaruhi kinerja turbin vortex, Dhakal et al. (2014), menyimpulkan bahwa dengan bertambahnya jumlah bilah sudu turbin dari 6 hingga 12 efisiensi yang dihasilkan oleh turbin vortex akan menurun. Daya output dan efisiensi yang dihasilkan turbin vortex meningkat dengan bertambahnya bilah sudu hingga berjumlah 5 bilah sudu, selebihnya akan menurun seiring pertambahan jumlah bilah sudu (Bajracharya et al., 2020). Selain jumlah sudu turbin, sudut kemiringan bilah sudu dengan *hub* – sudut *stagger* juga dapat memengaruhi performa turbin. Fitroh & Adiwibowo, (2018) melakukan penelitian eksperimen yang berjudul “Uji Eksperimental Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Tipe Sudu Melengkung dengan Variasi Sudut Kemiringan”, pada penelitian tersebut menguji pengaruh variabel independen sudut kemiringan sudu dan kapasitas aliran. Hasilnya sudut *stagger* sebesar  $22,5^\circ$  menghasilkan daya terbesar pada kapasitas aliran sebesar 13,44350 l/s dan efisiensi paling optimal pada kapasitas 7,99867 l/s. Di sisi lain, Suwoto et al., (2014) juga melakukan penelitian eksperimen yang sama dengan variabel independen berupa sudut kemiringan sudu dan jumlah bilah sudu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut *stagger* sebesar  $30^\circ$  menghasilkan efisiensi yang lebih optimal dibandingkan sudut *stagger* sebesar  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ .

Selain sudut *stagger*, jarak sudu dengan lubang *outlet* basin atau dapat disebut juga dengan *clearance* sudu dengan lubang *outlet* juga akan memengaruhi kinerja turbin vortex. Subash Dhakal et al., (2014) menyimpulkan bahwa jarak terbaik sudu turbin dengan lubang *outlet* berada pada posisi paling bawah mendekati dasar basin. Hal ini disebabkan oleh peningkatan *head* dan kecepatan aliran seiring bertambahnya kedalaman.

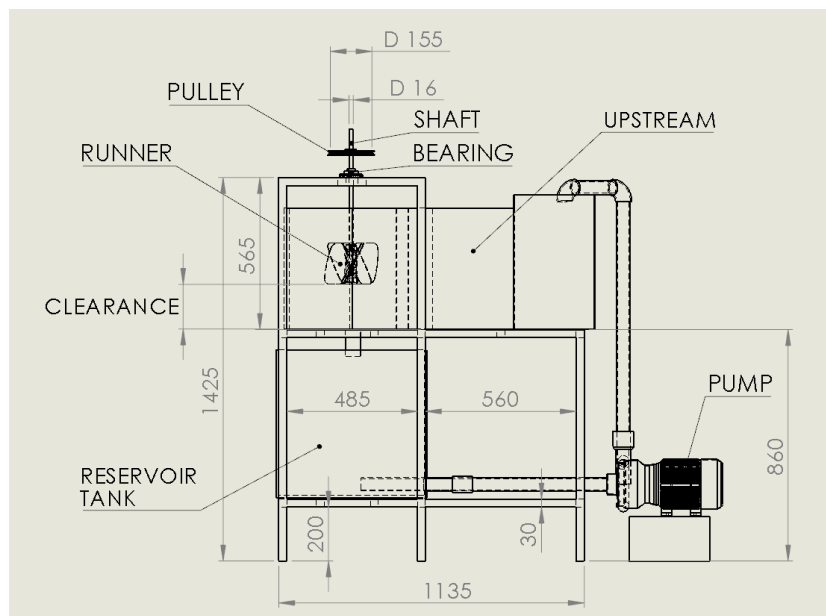
## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Peralatan Eksperimen Turbin Vortex

Pada studi eksperimen ini, turbin vortex dibuat dengan skala laboratorium dan didesain menggunakan *software* Solidworks versi 2016. Berikut gambar rancangan turbin vortex skala laboratorium.



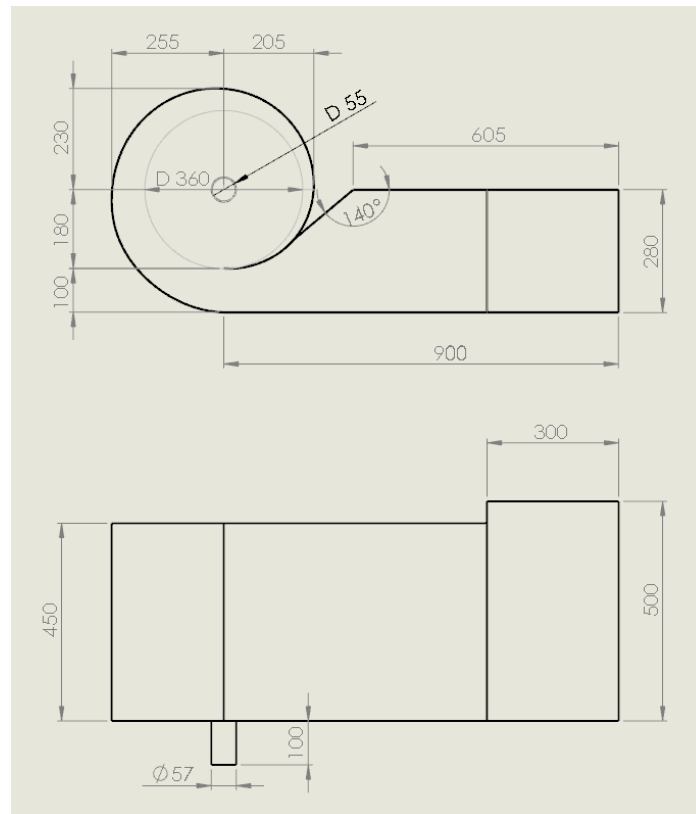
**Gambar 3.1** Turbin vortex skala laboratorium



**Gambar 3.2** Komponen penyusun peralatan eksperimen

Berikut ini komponen-komponen yang menyusun rancangan turbin vortex diatas Pada gambar diatas:

## 1. Basin



**Gambar 3.3** Rancangan Basin

Pada turbin vortex skala laboratorium ini, basin dirancang berbentuk spiral dengan menggunakan pemodelan *Archimedean spiral* untuk membentuk *inlet* tangensial. Pada bagian kanal terdapat *V-Notch Wier* untuk menghitung kapasitas aliran air yang masuk ke basin (Lampiran 2).

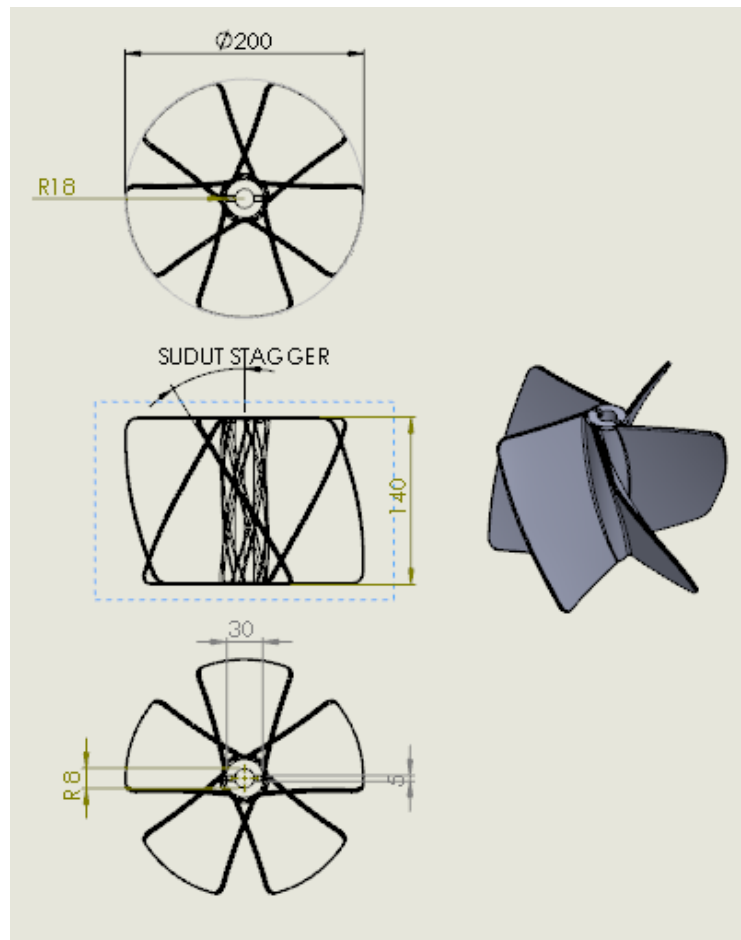
**Tabel 3. 1** Dimensi basin

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Diameter efektif basin        | 360 mm |
| Tinggi basin                  | 450 mm |
| Lebar <i>inlet</i>            | 100 mm |
| Diameter <i>outlet</i>        | 55 mm  |
| Dropshaft / <i>flow chute</i> | 100 mm |

## 2. Sudu turbin

Sudu turbin memiliki profil lurus dan didesain menggunakan *software Solidworks 2016* kemudian dicetak menggunakan *3D printer*. Sudut *stagger* sudu dibentuk terhadap sumbu vertikal atau sumbu x aksial (Lihat gambar 3.4).





**Gambar 3.4** Geometri sudu turbin

**Tabel 3. 2** Dimensi sudu turbin

| Aspek                | Variasi 1 | Variasi 2 | Variasi 3 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Diameter <i>hub</i>  | 40 mm     | 50 mm     | 50 mm     |
| Tinggi <i>hub</i>    | 140 mm    | 140 mm    | 140 mm    |
| Diameter sudu        | 200 mm    | 200 mm    | 200 mm    |
| Tinggi sudu          | 155 mm    | 155 mm    | 155 mm    |
| Tebal bilah sudu     | 3,5 mm    | 3,5 mm    | 3,5 mm    |
| Jumlah bilah sudu    | 5         | 5         | 5         |
| Sudut <i>stagger</i> | 27°       | 30°       | 33°       |

### 3. Pompa air



**Gambar 3.5** Pompa air

Pada penelitian ini menggunakan pompa air untuk mengalirkan air ke kanal turbin. Pompa air yang dipakai jenis sentrifugal dengan spesifikasi sebagai berikut.

**Tabel 3. 3** Spesifikasi pompa air

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Mesin                  | GX 200 – 2 Stroke    |
| Bahan bakar            | Gasoline             |
| Kapasitas              | 60 m <sup>3</sup> /H |
| Kecepatan              | 3600 rpm             |
| Diameter hisap & buang | 3" / 80 mm           |

#### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel pada penelitian ini yakni sebagai berikut,

- 1) Variabel independen;
  - a. Sudut *stagger* sudu turbin, pada penelitian ini sudut *stagger* sudu turbin divariasikan sebesar 27°, 30°, dan 33° terhadap sumbu vertikal *hub* sudu turbin (lihat Gambar 3.4).
  - b. *Clearance*, sementara itu untuk variasi *clearance* merupakan jarak antara sudu turbin dengan lubang *outlet* atau dasar basin divariasikan sebesar 3 cm, 5 cm, dan 7 cm (Lihat Gambar 3.2)
  - c. Kapasitas aliran, pada penelitian ini variasi kapasitas aliran air yang masuk ke dalam basin diatur menggunakan *ball valve* dan atau bukaan gas pompa air. Kapasitas aliran divariasikan sebesar 6,475 l/s, 5,137 l/s, dan 4,313 l/s.
- 2) Variabel dependen; daya *output* turbin vortex (Watt) dan efisiensi turbin vortex (%).
- 3) Variabel kontrol; jumlah bilah sudu, geometri basin, material sudu, kondisi fluida air, dan beban *rope brake* (0-850 gram).

#### 3.3 Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimen untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi variasi variabel independen terhadap variabel dependen. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali iterasi di setiap kombinasi variasi variabel independen.

**Tabel 3. 4** Variabel Independen

| Variabel Independen                     | Variasi 1 | Variasi 2 | Variasi 3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| <i>Sudut stagger</i> (A)                | 27°       | 30°       | 33°       |
| <i>Clearance sudu dengan outlet</i> (B) | 3 cm      | 5 cm      | 7 cm      |
| <i>Kapasitas aliran</i> (C)             | 6,475 l/s | 5,137 l/s | 4,313 l/s |

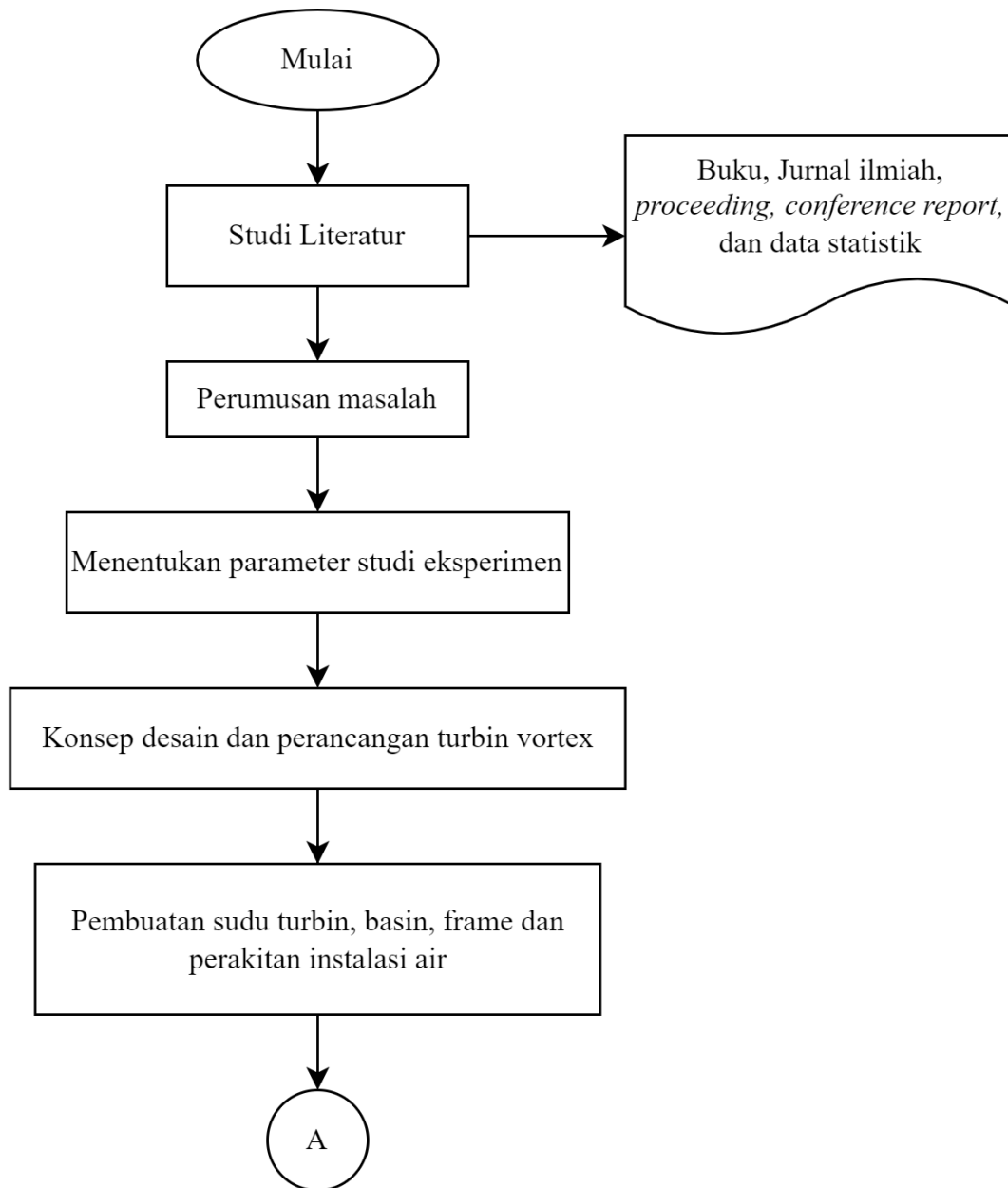
Ketiga variabel independen tersebut akan menghasilkan 27 kombinasi eksperimen (Lihat tabel 3.5).

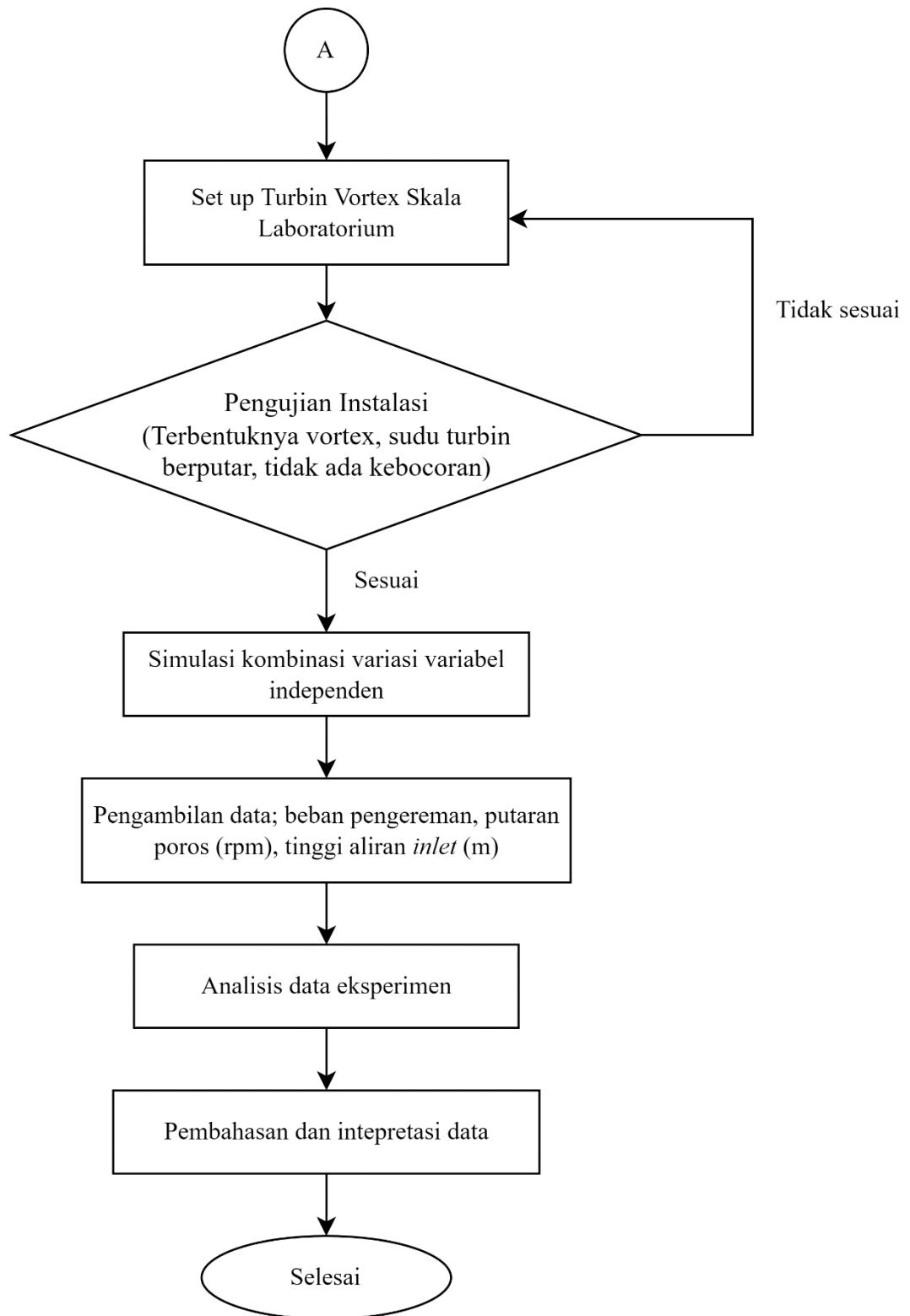
**Tabel 3. 5** Interaksi kombinasi eksperimen

|                | A <sup>1</sup> B <sup>1</sup>                | A <sup>1</sup> B <sup>2</sup>                | A <sup>1</sup> B <sup>3</sup>                | A <sup>2</sup> B <sup>1</sup>                | A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>                | A <sup>2</sup> B <sup>3</sup>                | A <sup>3</sup> B <sup>1</sup>                | A <sup>3</sup> B <sup>2</sup>                | A <sup>3</sup> B <sup>3</sup>                |
|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| C <sup>1</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>1</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>2</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>3</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>1</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>2</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>3</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>1</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>2</sup> C <sup>1</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>3</sup> C <sup>1</sup> |
| C <sup>2</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>1</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>2</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>3</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>1</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>2</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>3</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>1</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>2</sup> C <sup>2</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>3</sup> C <sup>2</sup> |
| C <sup>3</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>1</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>2</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>1</sup> B <sup>3</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>1</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>2</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>2</sup> B <sup>3</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>1</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>2</sup> C <sup>3</sup> | A <sup>3</sup> B <sup>3</sup> C <sup>3</sup> |

### 3.4 Alur Penelitian

Dibawah ini merupakan tahapan studi eksperimen pada turbin vortex skala laboratorium. Eksperimen ini memiliki tujuan untuk menguji pengaruh tiga variabel independen terhadap daya dan efisiensi turbin vortex sehingga mendapat geometri turbin vortex dengan efisiensi optimum.



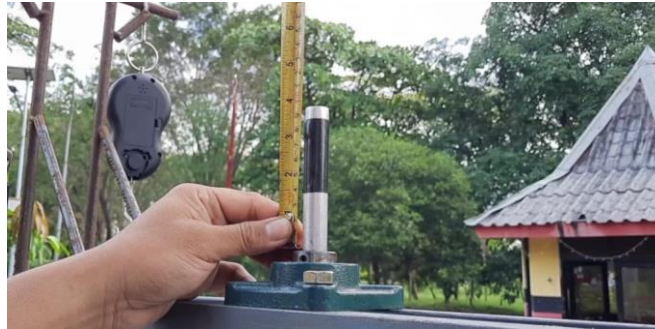


**Gambar 3.6** Diagram alir penelitian

### 3.5 Langkah Pengujian

Dalam pengujian turbin vortex skala laboratorium ada beberapa hal yang perlu dipersiapkan. Berikut langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk pengambilan data turbin vortex skala laboratorium

- 1) Siapkan turbin vortex skala laboratorium dan alat ukur.
- 2) Pasangkan sudu turbin ( $27^\circ$  atau  $30^\circ$  atau  $33^\circ$ ).
- 3) Atur posisi *clearance* sudu dengan lubang *outlet* (3 cm atau 5 cm atau 7 cm).



Mengukur dan menentukan *clearance* sudu dengan lubang *outlet*

- 4) Nyalakan pompa air, atur bukaan gas pompa agar stabil. Kemudian atur *ball valve* untuk mengatur kapasitas aliran.

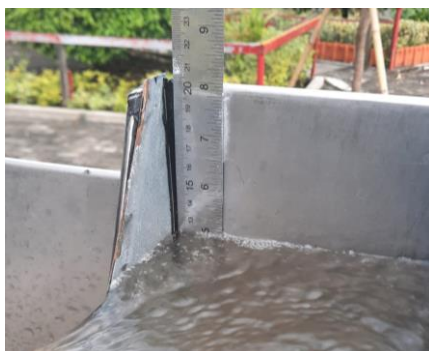


Menyalakan pompa



Mengatur *ball valve*

- 5) Ukur tinggi permukaan air pada *V-Notch Weir*, pastikan kapasitas aliran sesuai variasi yang telah ditentukan (6,475 l/s, atau 5,137 l/s, atau 4,313 l/s).



Mengukur permukaan tinggi aliran dan pengambilan data

- 6) Ambil data tinggi aliran pada sisi *inlet* basin.
- 7) Ambil data putaran poros dengan menembakkan laser *tachometer* pada poros turbin.



Mengukur rpm menggunakan tachometer

- 8) Ambil data beban pengereman pada nilai yang muncul di neraca digital, dari tanpa pembebanan hingga turbin vortex berhenti berputar.



Mengatur neraca untuk pembebanan



Melakukan pengambilan data

- 9) Setelah pengambilan data pada percobaan kombinasi telah selesai, atur *clearance* dengan lubang *outlet* untuk kombinasi variasi berikutnya.
- 10) Lakukan pengambilan data seperti langkah poin ke 5,6, dan 7.
- 11) Setelah dilakukan pengambilan data, atur katup air kemudian ulangi langkah pengujian poin ke 5,6,7,8, dan 9.
- 12) Matikan pompa, hingga turbin vortex berhenti berputar.
- 13) Pasang sudu dan atur *clearance* sudu dengan lubang *outlet* untuk kombinasi variasi selanjutnya, kemudian ulangi langkah-langkah pengujian hingga seluruh kombinasi variasi variabel independen teruji tiga kali iterasi pengujian.

### 3.6 Teknik Pengumpulan Data

Data diambil pada saat simulasi eksperimen turbin vortex sebanyak 27 kombinasi variabel independen dengan tiga kali iterasi. Data yang diambil untuk menganalisa performa turbin vortex diantaranya adalah (1) putaran poros, (2) tinggi aliran *inlet*, dan (3) beban pengereman. Ketiga data tersebut akan didapatkan menggunakan alat ukur, yaitu tachometer, *V-Notch Weir*, mistar, dan dua neraca digital. Neraca digital digunakan untuk mengukur massa dengan pembebanan 0 hingga 850 gram. Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putar pada poros turbin. Sementara itu, mistar digunakan untuk mengukur ketinggian air pada

saluran *inlet* dan neraca pegas digunakan untuk mengukur beban pengereman poros turbin.

### **3.7 Teknik Analisis Data**

Penelitian ini menggunakan analisis data deskriptif kuantitatif. Data yang dikumpulkan kemudian diolah menggunakan penghitungan teoritis untuk mendapatkan nilai daya dan efisiensi daya turbin vortex. Setelah didapatkan nilai daya dan efisiensi turbin vortex, kemudian data diinterpretasi kualitatif komparasi untuk membandingkan kinerja yang dihasilkan oleh masing-masing kombinasi variasi eksperimen. Interpretasi data komparasi ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik yang telah diolah menggunakan *trend line* polynomial 2<sup>o</sup>



## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Eksperimen

Pengambilan data penelitian dilakukan pada tanggal 14 Mei 2022 hingga 5 Juni 2022 di Departemen Teknik Mesin Industri dengan parameter sebagai berikut.

**Tabel 4.1** Parameter pengujian turbin vortex

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Kapasitas aliran (l/s)               | 6,475 l/s, 5,137 l/s, 4,313 l/s  |
| Kapasitas aliran (m <sup>3</sup> /s) | 0,006475 m <sup>3</sup> /s, 0,005137 m <sup>3</sup> /s, 0,004313 m <sup>3</sup> /s |
| Sudut <i>stagger</i>                 | 27°, 30°, 33°  |
| <i>Clearance</i>                     | 3 cm, 5 cm, 7 cm   |
| Diameter Sudu                        | 0,2 m ( <i>r</i> = 0,1 m)  |
| Diameter <i>Pulley</i>               | 0,12 m ( <i>r</i> = 0,06 m)  |
| Beban                                | 0-850 gram   |

### 4.2 Perhitungan Kinerja Turbin Vortex

Berikut merupakan contoh perhitungan pada variasi sudu dengan sudut *stagger* 27° dengan *clearance* sebesar 5 cm, dan kapasitas aliran sebesar 5,137 l/s. Pada variasi tersebut didapatkan data yakni;

**Tabel 4.2** Pengambilan data contoh perhitungan

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| <i>Dead weight</i>    | 400 gram          |
| <i>Spring Balance</i> | 160 gram          |
| Putaran               | 51,2 rpm          |
| H <i>inlet</i>        | 23,5 cm (0.235 m) |
| H <i>V-Notch Weir</i> | 13,2 cm (0,132 m) |

#### 4.2.1 Kapasitas Air

Pada penelitian ini kapasitas aliran ditentukan berdasarkan bukaan katup pada pompa. Perhitungan kapasitas aliran menggunakan alat ukur *V-Notch Weir* dengan persamaan (2.2) sebagai berikut;

$$Q = Cd \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot H^{\frac{5}{2}}$$

Berikut perhitungan kapasitas aliran dengan ketinggian air sebesar 0,132 m (0,132 m = 0,433 ft) pada *V-Notch Weir*, dan diasumsikan (*Cd*=0.595). Dengan sudut *V-Notch* sebesar 60°

$$Q = 0,595 \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2(9,81)} \cdot \tan \frac{60}{2} \cdot 0,132^{\frac{5}{2}}$$

$$Q = 0,005137 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 5,137 \text{ l/s}$$

#### 4.2.2 Daya Air

Pada penelitian ini akan menghitung daya air pada kapasitas aliran 0,005137 m<sup>3</sup>/s. Daya yang terdapat pada dalam aliran air dapat diketahui melalui persamaan (2.3) sebagai berikut;

$$P_{air} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Sementara itu, nilai *head* efektif dapat diperoleh dengan persamaan (2.4) sebagai berikut;

$$H = h_3 + \frac{v_3^2}{2g}$$

Sebelum menghitung *head* spesifik, terlebih dahulu menghitung kecepatan aliran (m/s) dengan menggunakan persamaan (2.11) sebagai berikut;

$$\bar{V} = \frac{Q}{A}$$

Dengan luas penampang didapatkan dengan mengalikan lebar saluran *inlet* dengan tinggi aliran yang masuk ke dalam *inlet* dan menggunakan persamaan (2.12), sebagai berikut.

$$\bar{V} = \frac{Q}{B \cdot h}$$

$$\bar{V} = \frac{0,005137 \text{ m}^3/\text{s}}{0,1 \text{ m} \cdot 0,235 \text{ m}}$$

$$\bar{V} = \frac{0,005137 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0235 \text{ m}^2}$$

$$\bar{V} = 0,2165 \text{ m/s}$$

Setelah diketahui kecepatan aliran, maka dilanjutkan perhitungan head pada ketinggian aliran sebesar 0,235 m

$$H = 0,235 + \frac{(0,2165 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m}^2/\text{s}^2)}$$

$$H = 0,235 + \frac{0,047}{19,62}$$

$$H = 0,235 + 0,00239$$

$$H = 0,2374 \text{ m}$$

Berikut perhitungan daya air menggunakan persamaan (2.3) setelah didapatkan nilai head efektif aliran.

$$P_{air} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

$$P_{air} = 997 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,005137 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,2374 \text{ m}$$

$$P_{air} = 11,80 \text{ Watt}$$

#### 4.2.3 Torsi

Besaran torsi yang dihasilkan turbin vortex diukur menggunakan metode *dynamometer* mekanis atau *rope brake*. *Pulley* yang digunakan memiliki diameter 0,12 m. Berikut merupakan persamaan (2.7) untuk memperoleh nilai torsi;

$$\tau = ((m_2 - m_1) \cdot g) \cdot r$$

Setiap kombinasi variasi memiliki nilai torsi dan putaran yang berbeda. Pada percobaan sudu sudut *stagger* 27° dengan kapasitas aliran sebesar 0,005137 m<sup>3</sup>/s dan *clearance* 5 cm, berikut perhitungan torsi pada pembebanan 400 gram.

$$F = (0,4 \text{ kg} - 0,16 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,06 \text{ m}$$

$$\tau = 2,354 \text{ N} \cdot 0,06 \text{ m}$$

$$\tau = 0,141 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 4.2.4 Kecepatan Angular

Kecepatan angular turbin vortex dapat diketahui melalui persamaan (2.8) sebagai berikut.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

Berikut perhitungan kecepatan angular pada pembebanan 3,924 N pada sudu dengan sudut *stagger* 27°, kapasitas aliran sebesar 0,005137 m<sup>3</sup>/s, dan *clearance* 5 cm dengan putaran poros 51,2 rpm.

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 51,2}{60}$$

$$\omega = 5,354 \text{ rad/s}$$

#### 4.2.5 Daya Turbin

Dengan mengetahui nilai torsi sebesar 0,17 N dan kecepatan angular 5,35 rad/s, maka dapat diketahui daya yang dihasilkan oleh turbin vortex. Berikut persamaan (2.9) yang digunakan untuk mengetahui daya turbin vortex;

$$P_{turbin} = \tau \cdot \omega$$

$$P_{turbin} = 0,141 \text{ N} \times 5,35 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbin} = 0,756 \text{ Watt}$$

#### 4.2.6 Tip Speed Ratio

Berikut merupakan perhitungan rasio kecepatan ujung sudu menggunakan persamaan (2.10) pada variasi sudu sudut *stagger* 27° kapasitas 0,005137 m<sup>3</sup>/s *clearance* 5 cm dengan gaya pembebanan 2,354 N, untuk diameter sudu sebesar 0,2 meter, dan diketahui kecepatan aliran sebesar 0,2165 m/s.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{\bar{v}}$$

$$\lambda = \frac{5,354 \text{ rad/s} \cdot 0,1 \text{ m}}{0,2165 \text{ m/s}}$$

$$\lambda = 2,473$$

#### 4.2.7 Coefficient of Power

Perhitungan *coefficient of power* (CP) diperoleh dengan membandingkan nilai daya turbin vortex dengan daya air. Berikut persamaan (2.13) yang digunakan untuk mendapatkan *coefficient of power*.

$$Cp = \frac{P_{turbin}(\text{Watt})}{P_{air}(\text{Watt})}$$

$$Cp = \frac{0,756 \text{ Watt}}{11,8 \text{ Watt}}$$

$$Cp = 0,064$$

#### 4.2.8 Efisiensi Turbin

Perhitungan efisiensi turbin diperoleh dengan mengkalikan *coefficient power* sebesar 100%. Berikut persamaan (2.14) yang digunakan untuk mengetahui efisiensi turbin vortex.

$$\eta_{turbin} = Cp \times 100\%$$

$$\eta_{turbin} = 0,064 \times 100\%$$

$$\eta_{turbin} = 6,4 \%$$

### 4.3 Analisa Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Kinerja

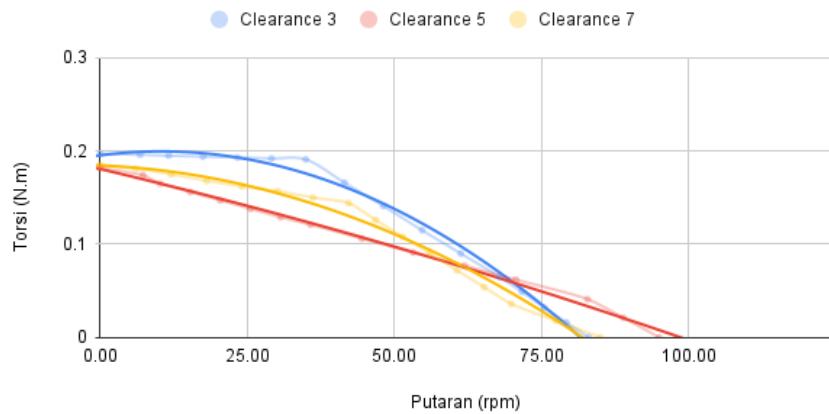
Data hasil perhitungan kinerja turbin vortex skala laboratorium selanjutnya ditampilkan menggunakan tabel dan grafik. Hasil perhitungan unjuk kerja turbin vortex skala laboratorium dengan variasi sudut *stagger* 27°, 30°, 33° ditampilkan berupa tabel meliputi unjuk kerja torsi (N.m) terhadap putaran (rpm), unjuk kerja daya turbin (Watt) terhadap putaran (rpm), unjuk kerja efisiensi (%) terhadap putaran (rpm), dan unjuk kerja *Tip Speed Ratio* terhadap *coefficient power*.

### 4.3.1 Unjuk Kerja Torsi Terhadap Putaran

Berikut merupakan tabel perhitungan unjuk kerja dan grafik torsi terhadap putaran (rpm).

6,475 l/s | Grafik torsi terhadap Putaran

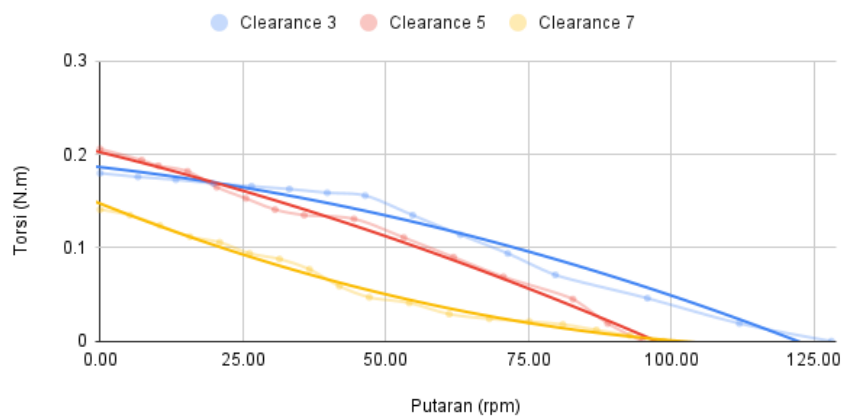
Sudut Stagger 27



**Gambar 4.1** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

5,137 l/s | Grafik torsi terhadap putaran

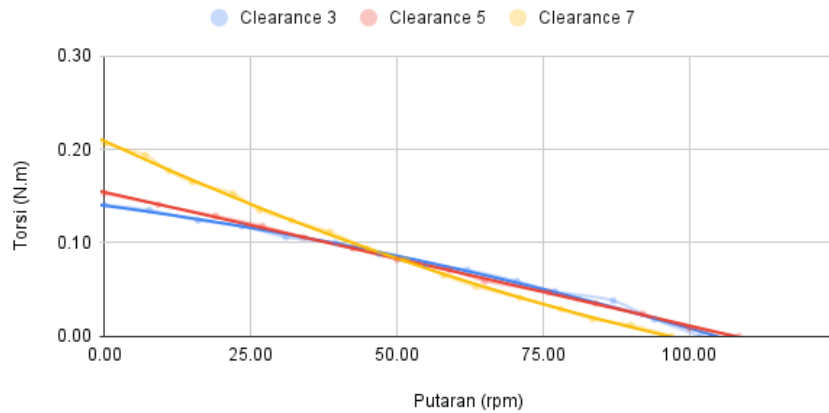
Sudut Stagger 27



**Gambar 4.2** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

### 4,313 l/s | Grafik torsi terhadap putaran

Sudut Stagger 27

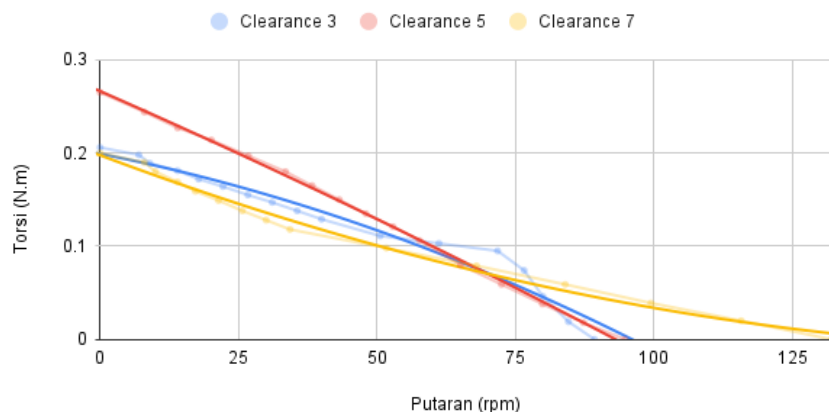


**Gambar 4.3** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik torsi terhadap putaran sudu sudut *stagger* 27° secara umum ada perbedaan nilai torsi yang dihasilkan pada variasi *clearance* 3 cm, 4 cm, dan 5 cm; serta variasi kapasitas aliran 6,475 l/s, 5,137 l/s dan 4,313 l/s. Data diatas menunjukkan bahwa nilai torsi tertinggi adalah 0,196 N dihasilkan oleh variasi kapasitas aliran 5,137 pada *clearance* 3 cm dan pembenanan 700 gram Sementara itu, nilai torsi terendah adalah 0,006 N.m dihasilkan oleh variasi kapasitas 5,137 l/s pada *clearance* 7 cm dan pembebanan 50 gram. Secara visual grafik kapasitas 6,475 l/s menghasilkan nilai torsi tertinggi oleh *clearance* 3 cm kemudian pada *clearance* 5 cm terjadi penurunan rpm yang sedikit drastis pada putaran 11 rpm.

### 6,475 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

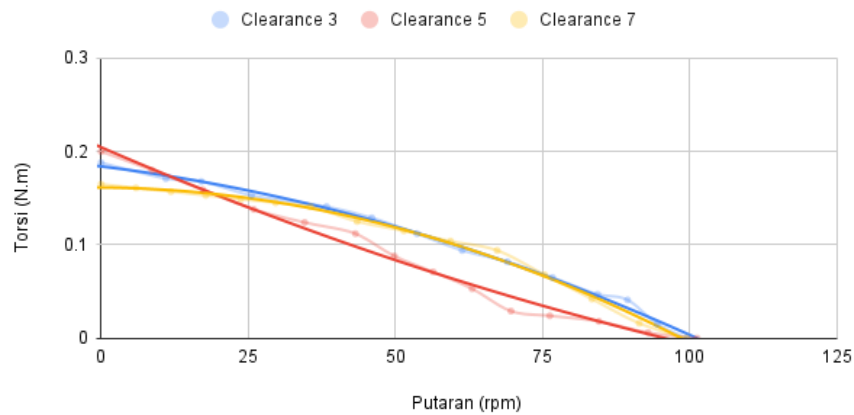
Sudut Stagger 30



**Gambar 4.4** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

### 5.137 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

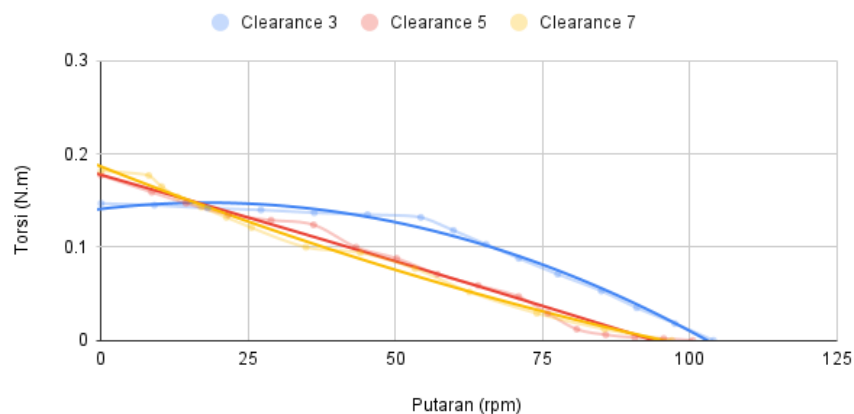
Sudut Stagger 30



**Gambar 4.5** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

### 4.313 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

Sudut Stagger 30



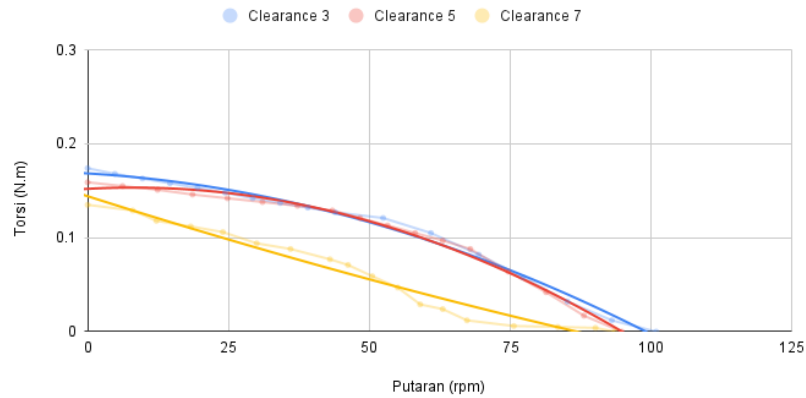
**Gambar 4.6** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja torsi terhadap putaran sudu sudut 30° secara umum menghasilkan nilai torsi yang berbeda-beda disetiap pembebanan dan variasi kapasitas aliran serta *clearance*. Data di atas menunjukkan nilai torsi tertinggi adalah 0,244 N dengan putaran 7 rpm dihasilkan oleh variasi kapasitas aliran 6,24 l/s pada *clearance* 5 cm dengan pembebanan 700 gram. Di sisi lain, nilai torsi paling kecil adalah 0,002 N pada putaran 95,6 rpm di variasi kapasitas aliran 4,313 l/s dan *clearance* 5 cm serta pada pembebanan 50 gram. Pada visual grafik kapasitas aliran 6,475 l/s *clearance* 5 cm menghasilkan rata rata nilai torsi yang lebih besar dibandingkan *clearance* 3 cm dan 7 cm. pada *clearance* 3 cm terjadi penurunan yang signifikan kemudian drop pada putaran 76,6 rpm. Secara

keseluruhan grafik memiliki tren menurun, menunjukkan semakin besar putaran (rpm) turbin semakin kecil torsi yang dihasilkan oleh poros turbin.

6,475 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

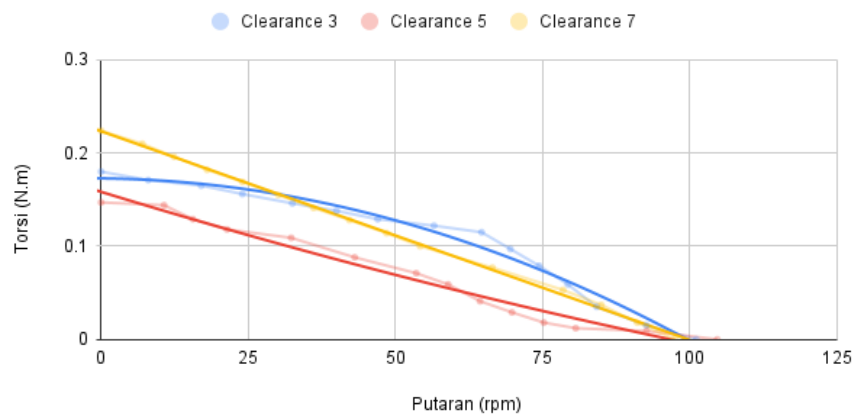
Sudut Stagger 33



**Gambar 4.7** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

5.137 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

Sudut Stagger 33

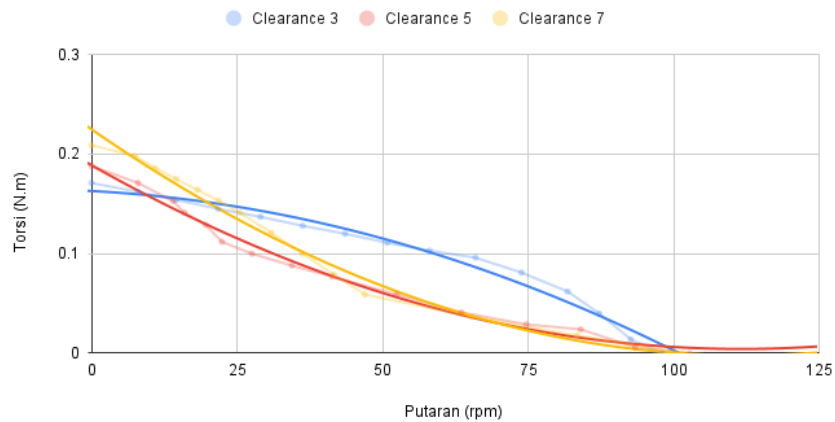


**Gambar 4.8** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm



#### 4.313 l/s | Grafik Torsi terhadap Putaran

Sudut Stagger 33



**Gambar 4.9** Grafik torsi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7 cm

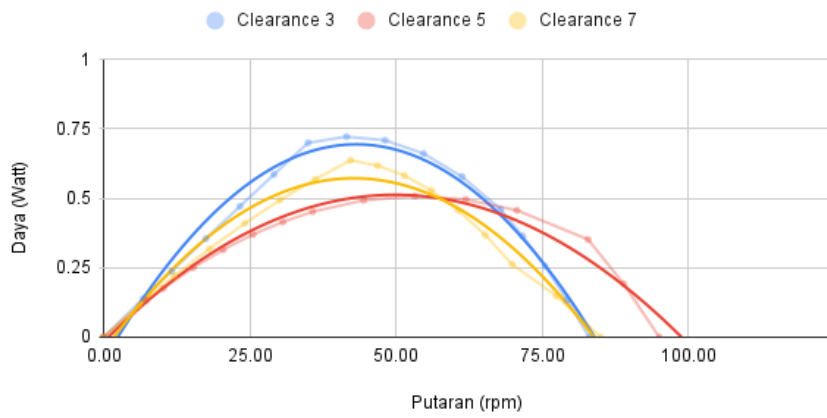
Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja torsi terhadap putaran sudut *stagger* 33°. Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui secara umum terdapat perbedaan nilai torsi pada variasi kapasitas aliran dan *clearance*. Nilai torsi tertinggi yaitu 0,21 N pada putaran 8 rpm variasi kapasitas aliran 5,137 l/s dan *clearance* 7 cm. Sementara itu, pada kapasitas aliran yang sama pada *clearance* 5 cm menghasilkan nilai torsi terendah yaitu 0,009 N pada putaran 92,6 rpm. Pada visual grafik kapasitas aliran 6,27 l/s *clearance* 3 cm memiliki nilai torsi yang lebih tinggi dibandingkan torsi yang dihasilkan oleh *clearance* 5 cm dan 7 cm. Pada kapasitas aliran 5,137 l/s *clearance* 7 cm memiliki rata-rata torsi yang lebih tinggi, kemudian diikuti *clearance* 3 cm dan 5 cm. Sementara itu, pada kapasitas aliran 4,027 l/s menghasilkan torsi puncak pada *clearance* 7 cm yakni 0,198 N, selanjutnya *clearance* 5 cm dan *clearance* 3 cm, masing masing memiliki nilai torsi 0,171 N dan 0,162 N.

#### 4.3.2 Unjuk Kerja Daya Turbin Terhadap Putaran

Berikut merupakan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja daya turbin (Watt) terhadap putaran (rpm).

### 6,475 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

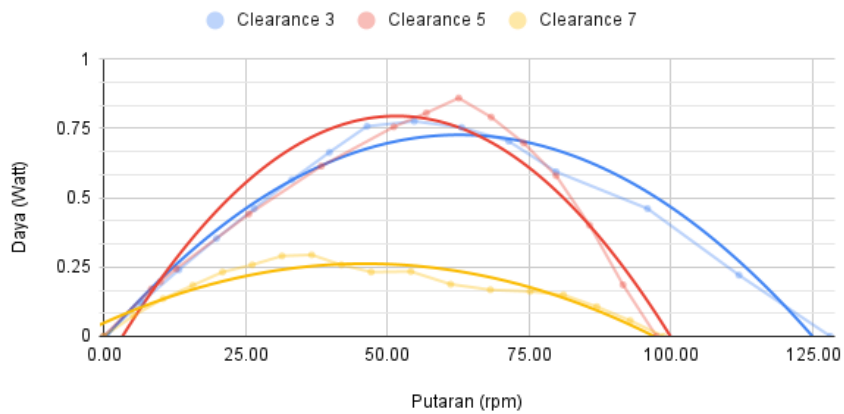
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 10** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7cm

### 5.137 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

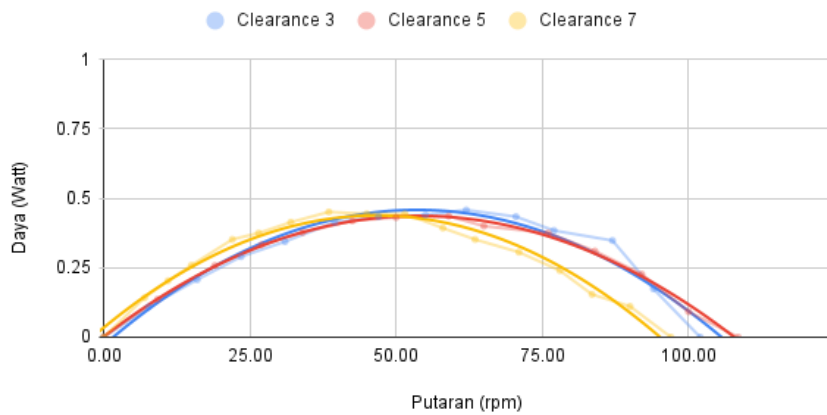
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 11** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

#### 4.313 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

Sudut Stagger 27

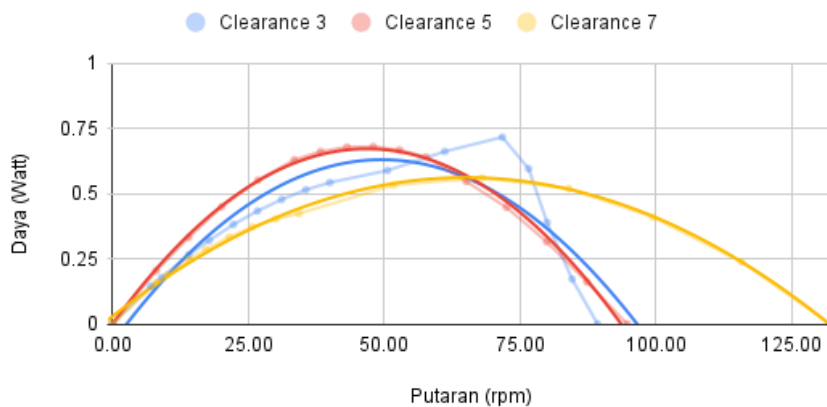


**Gambar 4. 12** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja daya turbin terhadap putaran, diketahui bahwa terdapat pengaruh variasi kapasitas aliran dan *clearance* terhadap nilai daya yang dihasilkan oleh turbin vortex. Nilai daya turbin vortex paling tinggi adalah 0,86 watt dihasilkan oleh kapasitas aliran 5,137 l/s dengan *clearance* sebesar 5 cm. Daya paling tinggi dihasilkan pada putaran 62,6 rpm. Di sisi lain, daya maksimal yang dihasilkan oleh *clearance* 3 cm yaitu sebesar 0,722 Watt pada kapasitas 6,475 l/s dan daya maksimal yang dihasilkan oleh *clearance* 7 cm adalah 0,637 Watt pada kapasitas 6,475 l/s.

#### 6,475 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

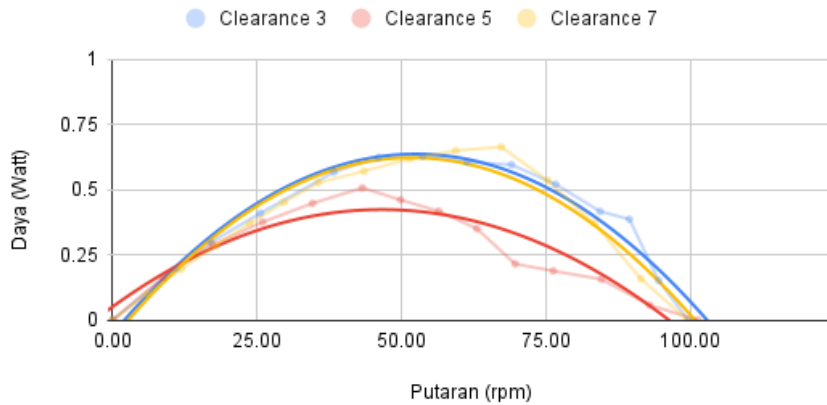
Sudut Stagger 30



**Gambar 4.13** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7cm

### 5.137 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

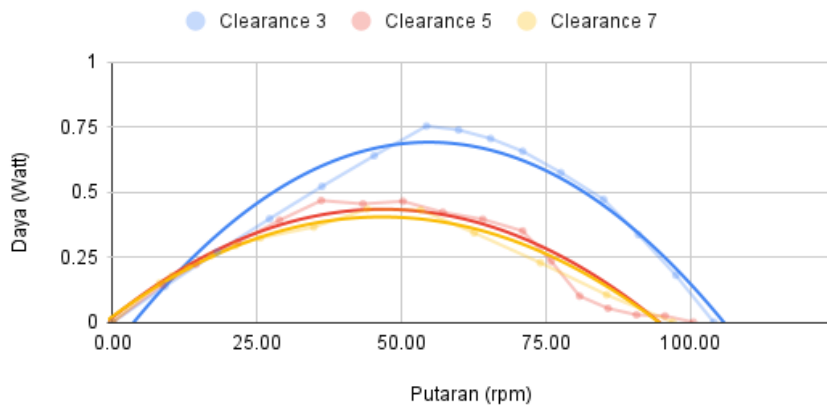
Sudut Stagger 30



**Gambar 4.14** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 4.313 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

Sudut Stagger 30

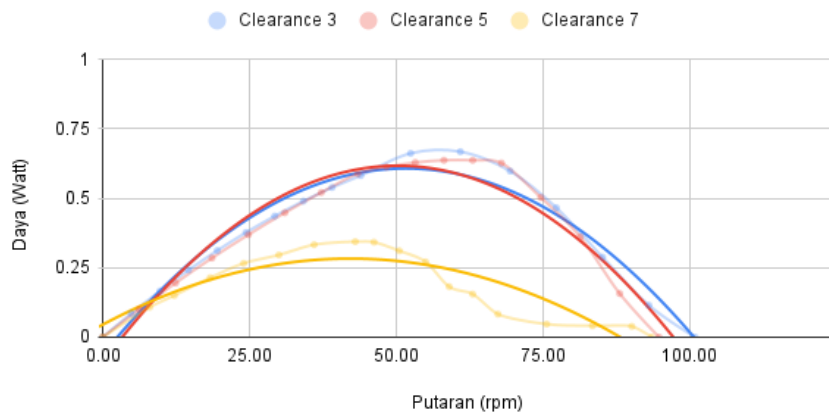


**Gambar 4.15** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja daya turbin terhadap putaran pengujian sudu sudut *stagger* 30° unjuk kerja daya (Watt) terhadap putaran (rpm). Dapat dilihat bahwa nilai daya turbin puncak tertinggi adalah 0,753 Watt dihasilkan oleh kombinasi variasi *clearance* 3 cm dengan kapasitas aliran 4,313 l/s, kemudian diikuti 0,716 Watt pada variasi kombinasi *clearance* 5 cm pada kapasitas 6,475 l/s. Di sisi lain pada *clearance* 7 cm menghasilkan daya puncak sebesar 0,663 Watt pada kapasitas aliran 5,137 l/s. Berdasarkan tabel data perhitungan dan visual grafik unjuk kerja daya (Watt) terhadap putaran (rpm), terjadi kenaikan daya output turbin pada pembebanan 20 gram hingga 40 gram, kemudian mengalami penurunan hingga ke putaran (rpm) tanpa pembebanan.

### 6,475 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

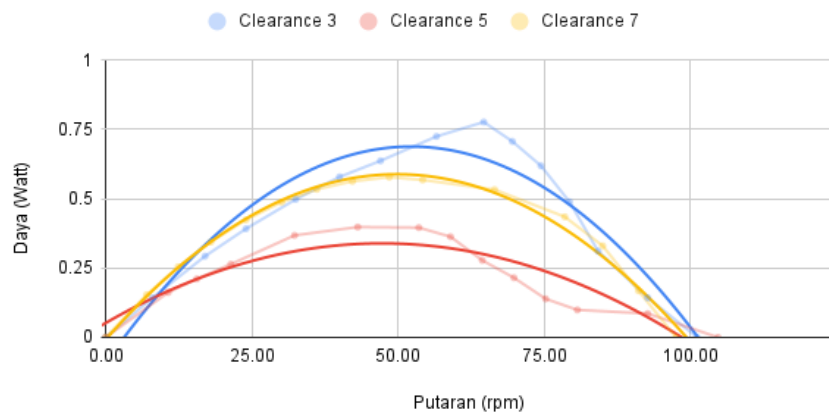
Sudut Stagger 33



**Gambar 4.16** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7cm

### 5.137 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

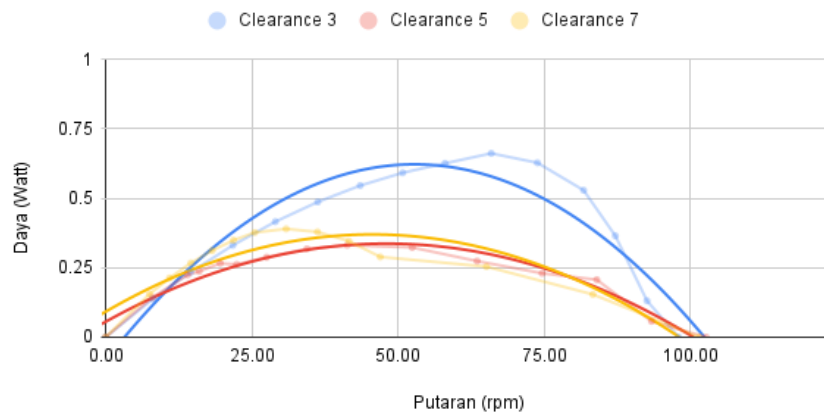
Sudut Stagger 33



**Gambar 4.17** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7cm

### 4.313 l/s | Grafik Daya terhadap Putaran

Sudut Stagger 33



**Gambar 4.18** Grafik daya terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3cm, 5cm, dan 7cm

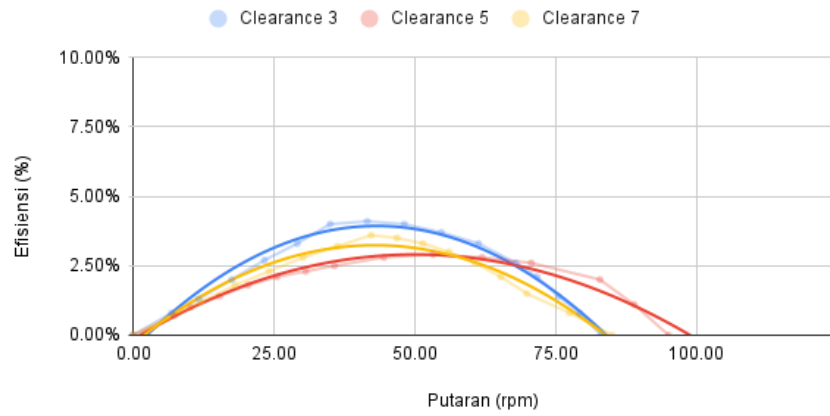
Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja daya output (Watt) turbin vortex terhadap putaran (rpm) sudut *stagger* 33°. Diketahui bahwa daya output turbin puncak tertinggi adalah 0,777 Watt pada kombinasi variasi *clearance* 3 cm pada kapasitas 5,137 l/s, kemudian daya puncak tertinggi kedua yaitu 0,668 Watt dihasilkan oleh *clearance* yang sama (3 cm) namun pada kapasitas yang berbeda ( $Q= 6,475$  l/s). Daya output puncak terkecil yaitu 0,344 Watt pada kombinasi variasi *clearance* 7 cm dengan kapasitas 6,475 l/s. Berdasarkan tabel data perhitungan dan visual ketiga grafik membentuk kubah pada range pembebanan 25 gram hingga 30 gram.

#### 4.3.3 Unjuk Kerja Efisiensi Turbin Terhadap Putaran

Berikut merupakan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja efisiensi terhadap putaran (rpm).

### 6,475 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

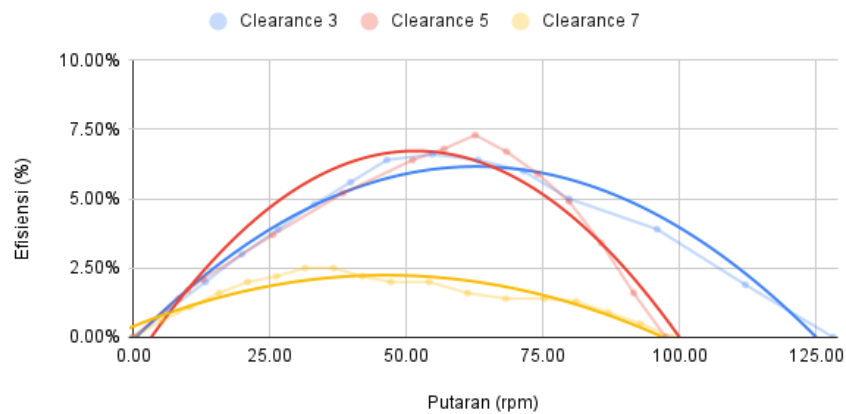
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 19** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 5,313 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

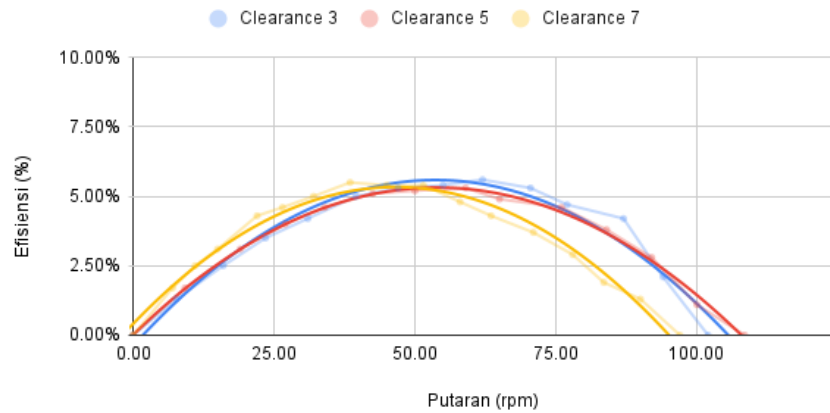
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 20** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7cm

#### 4,313 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

Sudut Stagger 27

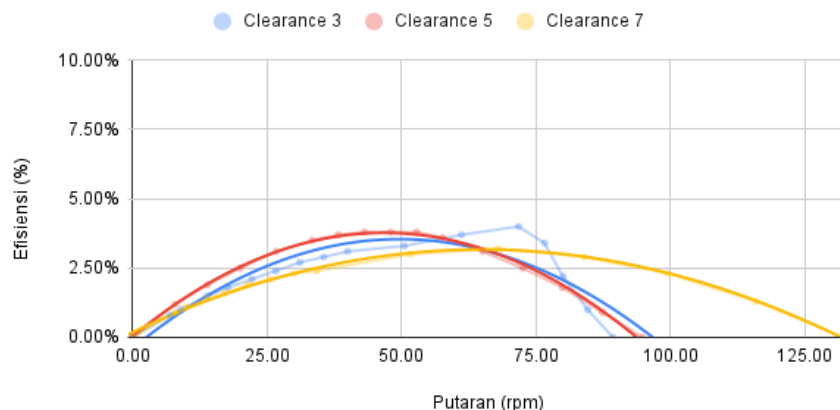


**Gambar 4. 21** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja efisiensi terhadap putaran pada pengujian variasi sudut *stagger* 27°. Diketahui nilai efisiensi tertinggi dihasilkan oleh variasi kapasitas 6,475 l/s dengan *clearance* 3 cm yakni sebesar 4,07 %, sedangkan pada *clearance* 5 cm dan 7 cm masing masing memiliki efisiensi sebesar 2,87 % dan 3,6%. Sementara itu, pada variasi kapasitas 5,137 l/s mencapai nilai efisiensi tertinggi ketika dikombinasikan dengan *clearance* 5 cm yakni sebesar 7,29%. Nilai efisiensi tersebut sekaligus menjadi efisiensi tertinggi pada pengujian sudu sudut *stagger* 27°. Di sisi lain, pada variasi kapasitas 4,313 l/s tidak menunjukkan perbedaan nilai efisiensi perbedaan nilai efisiensi yang signifikan ketika dikombinasikan dengan *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm.

#### 6,475 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

Sudut Stagger 30

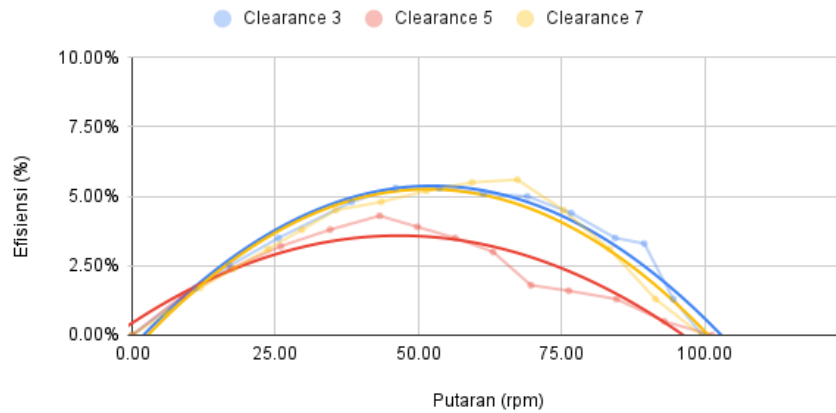


**Gambar 4. 22** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm



### 5,137 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

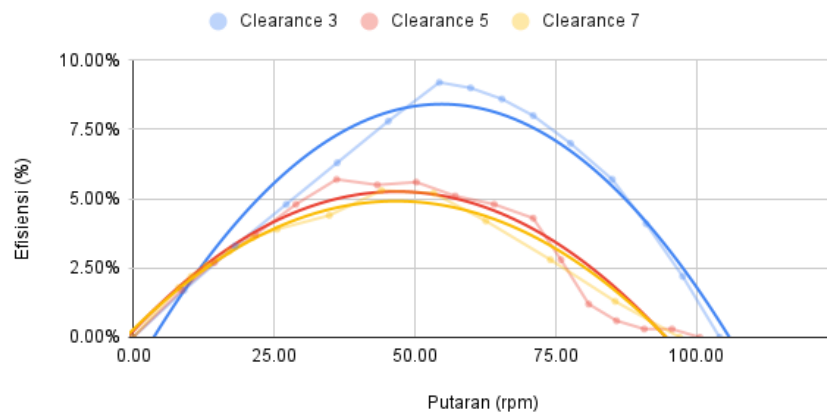
Sudut Stagger 30



**Gambar 4. 23** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 4,313 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

Sudut Stagger 30



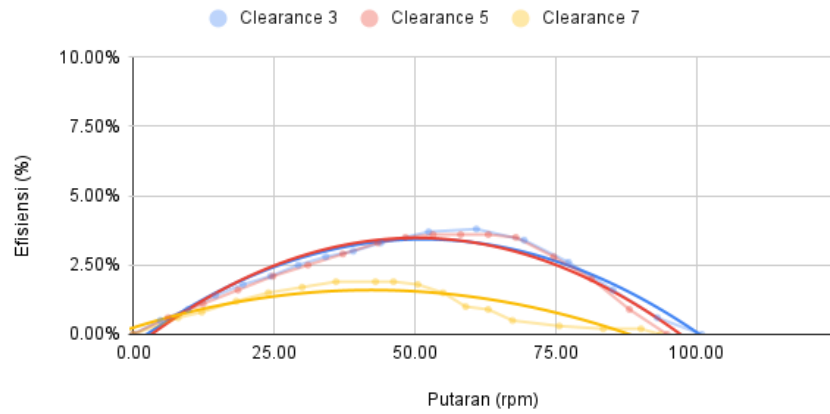
**Gambar 4. 24** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja efisiensi terhadap putaran dapat dianalisis data efisiensi pada pengujian variasi sudut *stagger* 30°, nilai efisiensi tertinggi pada variasi kapasitas 6,475 l/s dihasilkan oleh *clearance* 3 cm yakni sebesar 4,04%, sedangkan *clearance* 5 cm dan 7 cm masing-masing memiliki nilai efisiensi 3,84% dan 3,16%. Sementara itu, pada variasi kapasitas aliran 5,137 l/s mencapai nilai efisiensi tertinggi ketika dikombinasikan dengan *clearance* 7 cm yakni sebesar 5,62%, sedangkan pada *clearance* 3 cm dan *clearance* 5 cm, masing-masing menghasilkan nilai efisiensi 5,32% dan 4,29%. Sementara itu, pada kapasitas aliran sebesar 4,313 l/s menunjukkan nilai efisiensi tertinggi pada variasi

*clearance* 3 cm, yakni senilai 9,16%. Nilai efisiensi tersebut sekaligus menjadi efisiensi tertinggi pada pengujian sudu sudut *stagger* 30°.

#### 6,475 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

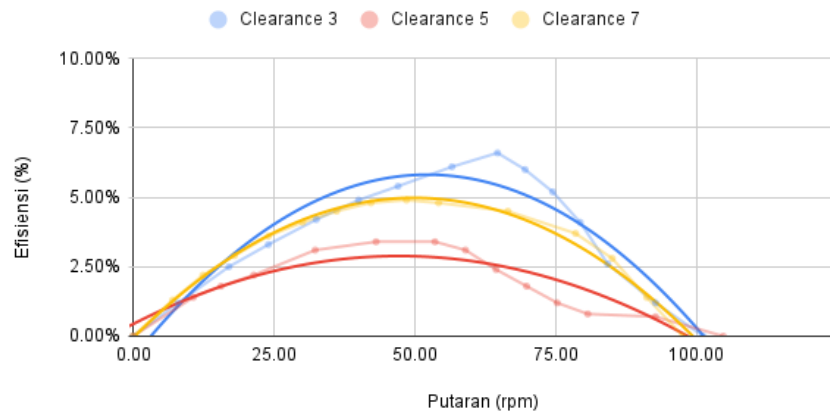
Sudu Stagger 33



**Gambar 4.25** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

#### 5,137 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

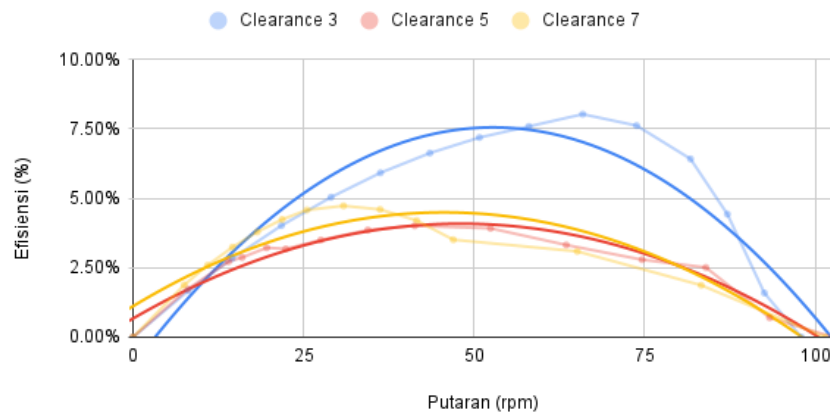
Sudu Stagger 33



**Gambar 4.26** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

## 4,27 l/s | Grafik Efisiensi terhadap Putaran

Sudut Stagger 33



**Gambar 4. 27** Grafik efisiensi terhadap putaran pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

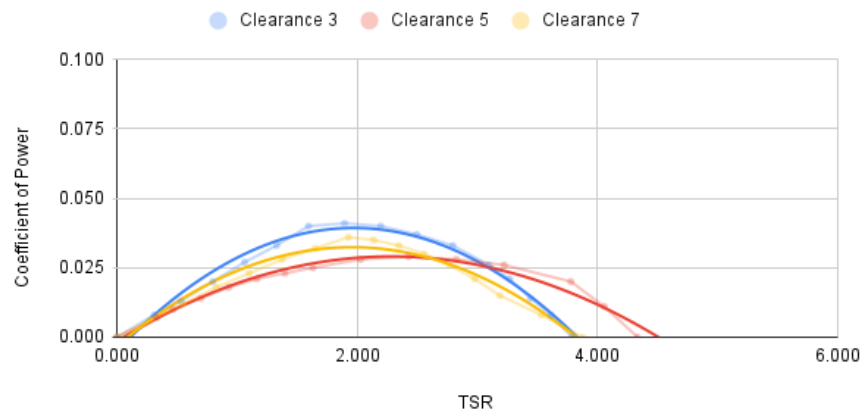
Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja efisiensi terhadap putaran variasi sudut *stagger* 33°, didapatkan efisiensi tertinggi pada variasi kapasitas 6,475 l/s dihasilkan oleh *clearance* 3 cm yakni sebesar 3,77%. Sementara itu, pada variasi kapasitas 6,475 l/s dengan kombinasi *clearance* 7 cm menunjukkan efisiensi puncak terendah dari seluruh variasi pada pengujian yakni senilai 1,94%. Disisi lain, variasi kapasitas aliran 5,137 l/s mencapai nilai efisiensi tertinggi ketika dikombinasikan dengan *clearance* 3 cm yakni sebesar 6,58% sedangkan *clearance* 5 cm dan 7 cm masing masing menghasilkan nilai efisiensi sebesar 3,38% dan 4,9%. Sementara itu, pada variasi kapasitas 4,313 l/s menunjukkan nilai efisiensi tertinggi pada *clearance* 3 cm, yakni sebesar 8,05%

### 4.3.4 Unjuk Kerja *Coefficient Power* Terhadap *Tip Speed Ratio*

Untuk mengetahui klasifikasi turbin pada turbin vortex dengan variasi sudut *stagger* 27°, 30°, 33°, variasi *clearance* 3 cm, 5cm, dan 7cm pada kapsaitas aliran 0,006475 m<sup>3</sup>/s, 0,005137 m<sup>3</sup>/s, 0,004313 m<sup>3</sup>/s, maka dibuat tabel unjuk kerja *Tip Speed Ratio* terhadap *coefficient power*. Berikut merupakan hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja *tip speed ratio* terhadap *coefficient power*.

### 6,475 l/s | Grafik TSR terhadap CP

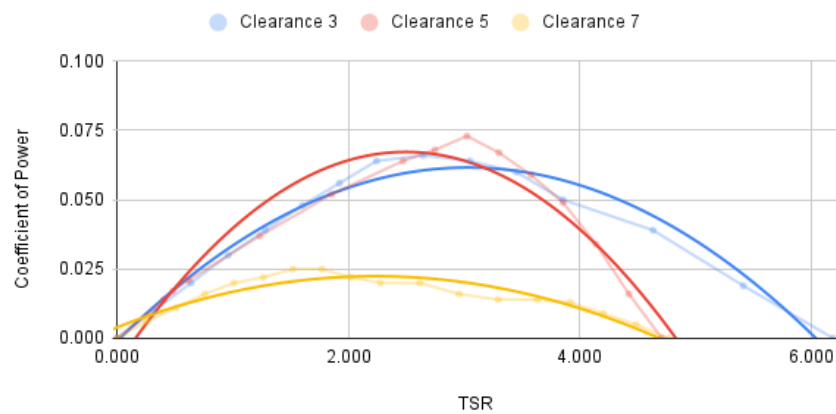
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 28** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 5,137 l/s | Grafik TSR terhadap CP

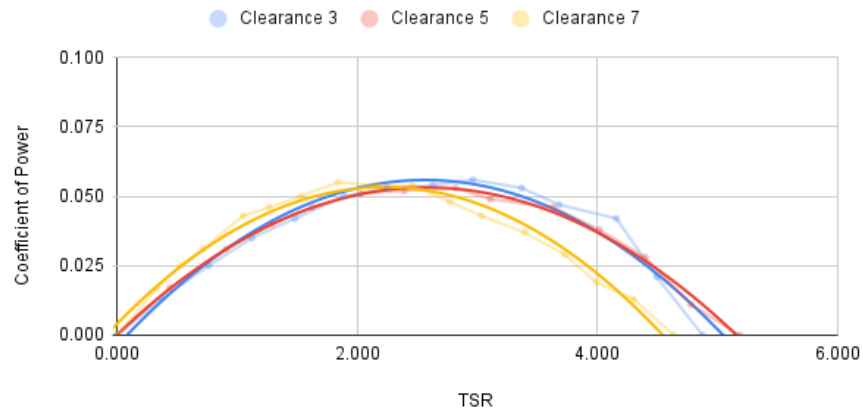
Sudut Stagger 27



**Gambar 4. 29** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

#### 4,313 l/s | Grafik TSR terhadap CP

Sudut Stagger 27

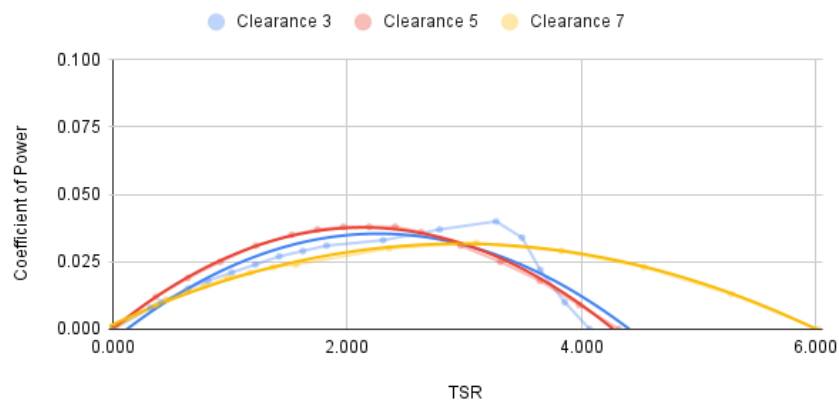


**Gambar 4. 30** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 27° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

Berdasarkan tabel hasil perhitungan dan grafik dapat dianalisis TSR dan *coefficient power* pada pengujian sudut *stagger* 27° variasi kapasitas 6,475 l/s, titik tertinggi berada pada nilai *coefficient power* sebesar 0,0407 dengan nilai TSR sebesar 1,895. Nilai tersebut dapat dicapai pada variasi *clearance* 3 cm. Kemudian pada variasi 5,137 l/s, nilai *coefficient power* tertinggi dicapai oleh variasi *clearance* 5 yakni sebesar 0,073 dengan nilai TSR sebesar 3,026. Nilai *coefficient power* tersebut sekaligus menjadi titik tertinggi dari seluruh pengujian sudut *stagger* 27° Di sisi lain, kapasitas 4,313 l/s menghasilkan nilai *coefficient power* tertinggi pada *clearance* 3 yakni sebesar 0,056 dengan nilai TSR sebesar 2,963.

#### 6,475 l/s | Grafik TSR terhadap CP

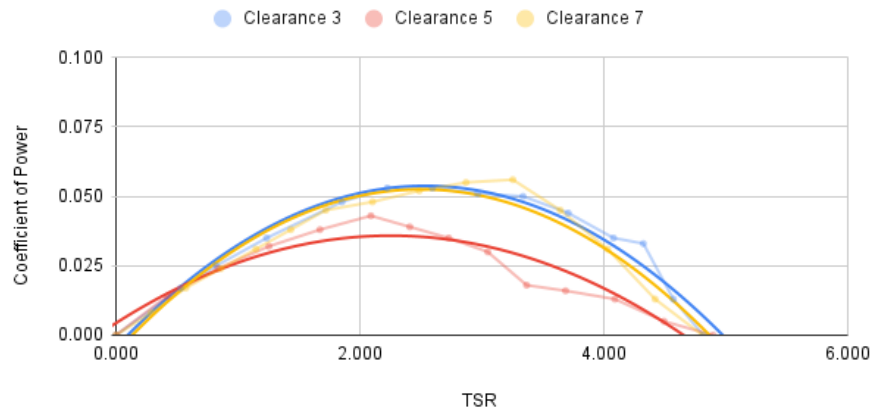
Sudut Stagger 30



**Gambar 4. 31** Grafik *Coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 5,313 l/s | Grafik TSR terhadap CP

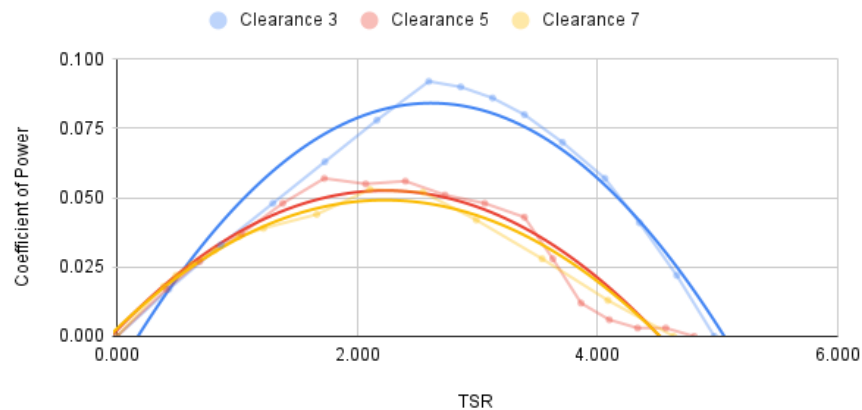
Sudut Stagger 30



**Gambar 4. 32** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 5,137 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 4,313 l/s | Grafik TSR terhadap CP

Sudut Stagger 30

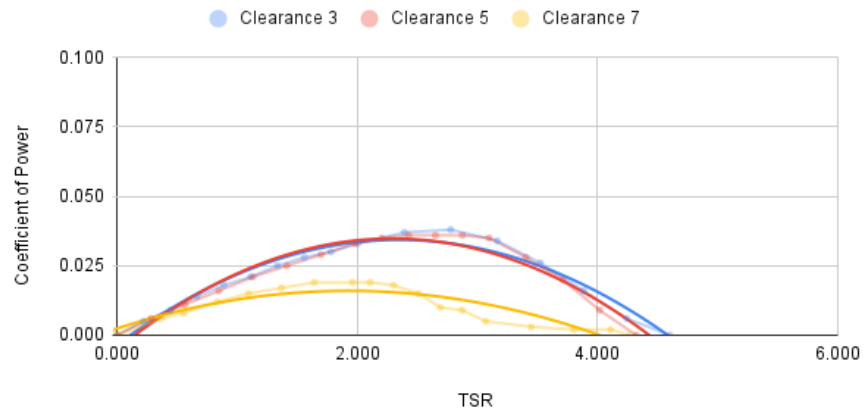


**Gambar 4. 33** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 30° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

Berdasarkan tabel perhitungan dan grafik unjuk kerja TSR terhadap *coefficient power*, dapat dianalisis TSR dan *coefficient power* pada pengujian sudut *stagger* 30° variasi kapasitas 6,475 l/s tersebut menunjukkan bahwa titik tertinggi berada pada kombinasi *clearance* 3 mm dengan nilai *coefficient power* sebesar 0,04 dan nilai TSR sebesar 3,274. Kemudian pada variasi 5,137 l/s, nilai *coefficient power* tertinggi dicapai oleh variasi *clearance* 3 cm yakni sebesar 0,056 dengan nilai TSR sebesar 3,254. Sementara itu,, kapasitas 4,313 l/s menghasilkan nilai *coefficient power* tertinggi pada *clearance* 3 cm yakni sebesar 0,092 dengan nilai TSR sebesar 2,596, nilai *coefficient power* tersebut sekaligus menjadi titik tertinggi dari seluruh pengujian sudut *stagger* 30°.

### 6,475 l/s | Grafik TSR terhadap CP

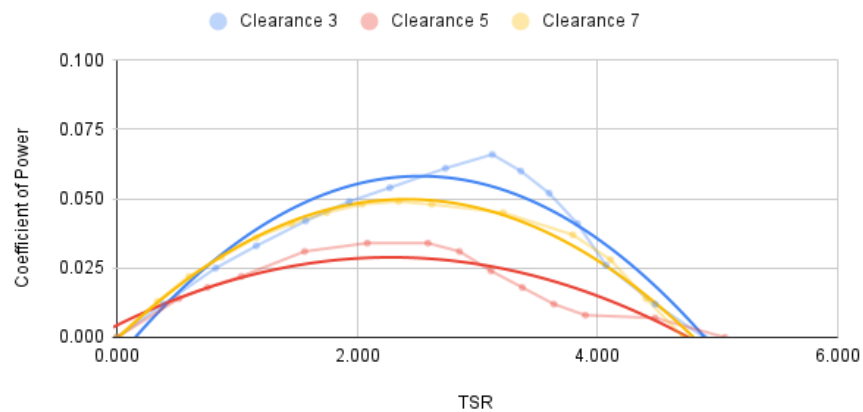
Sudut Stagger 33



**Gambar 4. 34** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

### 5,313 l/s | Grafik TSR terhadap CP

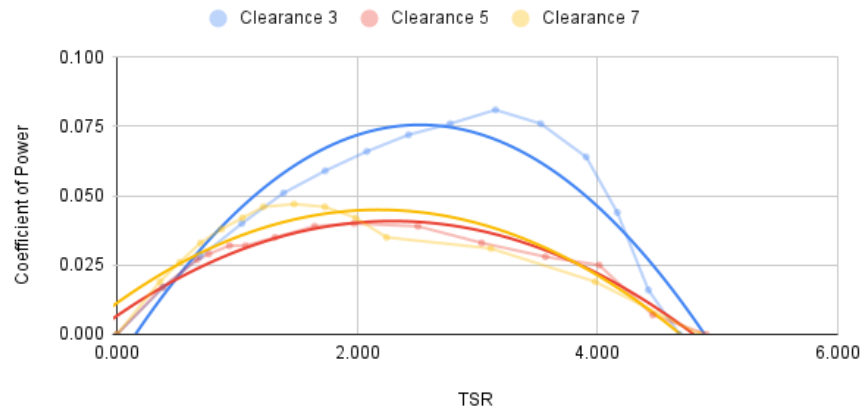
Sudut Stagger 33



**Gambar 4. 35** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 6,475 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

## 4,313 l/s | Grafik TSR terhadap CP

Sudut Stagger 33



**Gambar 4. 36** Grafik *coefficient power* terhadap TSR pada sudut *stagger* 33° kapasitas aliran 4,313 l/s dengan variasi *clearance* 3 cm, 5 cm, dan 7 cm

Berdasarkan tabel hasil perhitungan dan grafik unjuk kerja TSR terhadap *coefficient power* dapat dianalisis bahwa variasi kapasitas 6,475 l/s mencapai titik tertinggi pada kombinasi *clearance* 3 cm dengan nilai *coefficient power* sebesar 0,038 dan nilai TSR sebesar 2,779. Kemudian pada variasi 5,137 l/s, nilai *coefficient power* tertinggi dicapai oleh variasi *clearance* 3 cm yakni sebesar 0,066 dengan nilai TSR sebesar 3,125. Sementara itu, kapasitas 4,313 l/s menghasilkan nilai *coefficient power* tertinggi pada *clearance* 3 cm yakni sebesar 0,081 dengan nilai TSR sebesar 3,151. Nilai *coefficient power* tersebut sekaligus menjadi titik tertinggi dari seluruh pengujian sudut *stagger* 33°.

### 4.4 Analisa Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode uji eksperimen yaitu turbin vortex skala laboratorium dengan tiga variabel independen yaitu sudut kemiringan sudu turbin, *clearance* sudu dengan *outlet*, dan kapasitas aliran. Ketiga variabel independen tersebut diuji dengan cara dikombinasikan menjadi 27 kombinasi variasi. Pada penelitian ini turbin vortex berhasil beroperasi dengan baik dan 27 kombinasi variasi tersebut memengaruhi daya dan efisiensi yang dihasilkan turbin vortex.

Turbin vortex dapat berputar karena fenomena vortisitas, dimana sudu turbin berputar diakibatkan oleh adanya gerakan berpusar dari fluida air. Pada penelitian ini turbin vortex memiliki efisiensi yang lebih baik pada kapasitas aliran yang lebih rendah, hal ini sesuai dengan karakteristik turbin vortex yang dapat menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih baik pada kapasitas aliran yang rendah. Untuk dapat menerima kapasitas aliran yang lebih besar dapat memperbesar dimensi basin dan geometri sudu turbin, sehingga kapasitas aliran lebih besar dapat memiliki efisiensi yang sebanding dengan skala dimensi turbin vortex.

Pengaruh *clearance* sudu dengan lubang *outlet* terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin vortex diketahui bahwa *clearance* sudu dengan lubang



*outlet* sebesar 5 cm memiliki hasil yang lebih optimal. Namun, nilai efisiensi terbaik pada *clearance* 5 cm juga dipengaruhi oleh variasi sudut *stagger* dan kapasitas aliran.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, peneliti selanjutnya membandingkan setiap nilai daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh 27 kombinasi eksperimen. Pertama, pengaruh sudut sudu *stagger* dapat ditunjukkan oleh perbedaan daya yang dihasilkan pada pengujian variasi sudu sudut *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s, sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s, dan sudu sudut *stagger* 33° *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s. Ketiga pengujian tersebut memiliki variasi kapasitas aliran dan *clearance* yang sama ( $Q = 5,137$  l/s; *Clearance* 5cm), tetapi memiliki sudu sudut *stagger* yang berbeda. Hasilnya, variasi sudu sudut *stagger* 27° memiliki daya dan efisiensi yang jauh lebih tinggi daripada kedua variasi sudut lainnya ( $Watt = 0,86$ ; efisiensi 7,29%). Selain itu, pengujian variasi sudu sudut *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s, sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s, dan sudu sudut *stagger* 33° *clearance* 5 cm pada kapasitas 5,137 l/s, juga menunjukkan perbedaan pada nilai efisiensi yang dihasilkan. Dengan variasi kapasitas aliran dan *clearance* yang sama ( $Q = 5,1372$  l/s; *clearance* 5cm), sudu sudut *stagger* yang berbeda turut memengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Dari ketiga pengujian tersebut, sudut 27 menghasilkan nilai efisiensi terbesar yakni 7,29%, sementara pada sudut *stagger* 30° dan 33° masing-masing menghasilkan nilai efisiensi sebesar 2,86% dan 3,38%. Apabila dirata rata dan diurutkan dari sudut *stagger* terkecil hingga terbesar, pada penelitian ini didapatkan bahwa sudut *stagger* 27° menghasilkan daya yang lebih besar daripada sudu dengan sudut *stagger* 30° dan 33°. Semakin kecil sudut *stagger* pada sudu akan menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih besar. Hal ini diindikasikan semakin kecil sudut *stagger*, maka bilah sudu akan semakin tegak mendekati sumbu vertikal *hub*, sehingga bilah sudu memiliki luas permukaan yang lebih luas untuk menerima daya air yang berpusar.

Selain sudut sudu *stagger*, variasi *clearance* juga memiliki perbedaan pengaruh pada daya output puncak dan efisiensi yang dihasilkan. Pengujian pada variasi sudu *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm kapasitas 5,137 l/s dan sudu sudut *stagger* 27° dengan *clearance* 7 cm kapasitas 5,137 l/s memiliki variasi sudut dan kapasitas yang sama, tetapi daya dan efisiensi yang dihasilkan keduanya memiliki selisih nilai yang sangat besar (Daya output sudu *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm kapasitas 5,137 l/s = 0,86; Daya output sudu *stagger* 27° dengan *clearance* 7 cm kapasitas 5,137 l/s = 0,294; Efisiensi yang dihasilkan oleh variasi kombinasi sudu sudut *stagger* 27° dengan *clearance* 5 cm kapasitas 5,137 l/s = 7,29%; Efisiensi output sudu *stagger* 27° dengan *clearance* 7 cm kapasitas 5,137 l/s = 2,49%). Hal ini menunjukkan bahwa variasi *clearance* sangat memengaruhi daya output yang dihasilkan turbin vortex dan efisiensi turbin vortex. Hal yang sama juga dibuktikan oleh pengujian sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3 cm pada kapasitas 4,313 l/s dan sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 4,313 l/s dengan variasi sudut dan kapasitas yang sama, namun variasi *clearance* yang berbeda. Percobaan sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3 cm pada kapasitas 4,313 l/s menghasilkan efisiensi sebesar 9,16%, sedangkan pengujian sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 5 cm pada kapasitas 4,313 l/s

menghasilkan efisiensi sebesar 3,89%. Jika dirata-rata dan diurutkan dari *clearance* terkecil hingga terbesar, pada penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil jarak sudu dengan lubang *outlet*, daya dan efisiensi yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dikarenakan, saat jarak sudu dengan lubang outlet semakin dekat, maka seluruh bagian sudu turbin akan terendam pada pusaran air. Dengan demikian, sudu turbin akan lebih maksimal mengekstraksi daya air untuk menghasilkan torsi pada turbin vortex.

Di sisi lain, variasi kapasitas aliran juga memiliki pengaruh terhadap nilai efisiensi yang dihasilkan. Hal ini ditunjukkan oleh pengujian sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3 cm pada kapasitas 6,24 l/s, sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3 cm pada kapasitas 5,137 l/s, dan sudu sudut *stagger* 30° dengan *clearance* 3 cm pada kapasitas 4,313 l/s. Ketiga pengujian tersebut memiliki nilai sudut sudu *stagger* dan *clearance* yang sama (30°; *clearance* 3cm), tetapi memiliki kapasitas aliran yang berbeda. Hasilnya, variasi kapasitas aliran 4,313 l/s mencapai nilai efisiensi tertinggi yakni 9,16%; sedangkan variasi kapasitas aliran 6,475 l/s dan 5,1372 l/s masing-masing hanya mencapai nilai efisiensi sebesar 4,04% dan 5,32%. Hal serupa juga ditunjukkan oleh pengujian sudu sudut *stagger* 33° dengan *clearance* 3 cm yang terus mengalami kenaikan nilai efisiensi yang semula 3,77% pada variasi kapasitas 6,475 l/s menjadi 6,28% pada kapasitas 5,1372 l/s dan meningkat lagi menjadi 8,03% pada kapasitas 4,313 l/s. Hal ini sesuai dengan karakteristik penerapan turbin vortex yang mana cocok digunakan pada sumber aliran dengan kapasitas aliran yang rendah. Selanjutnya, hasil analisa pengaruh variasi kapasitas aliran pada kombinasi pengujian lainnya tidak menunjukkan perbedaan yang ekstrem. Misalnya, pengujian sudu sudut *stagger* 27 dengan *clearance* 3 cm mengalami kenaikan nilai efisiensi dari kapasitas aliran 6,475 l/s menuju kapasitas aliran 5,1372 l/s, tetapi mengalami penurunan nilai efisiensi pada kapasitas aliran 4,313 l/s. Hal itu dikarenakan nilai daya dan efisiensi juga turut dipengaruhi oleh variasi sudut sudu *stagger* dan *clearance*. Berdasarkan analisa komparasi setiap kombinasi eksperimen tersebut, perbedaan nilai m<sub>k</sub>daya dan efisiensi setiap pengujian tidak hanya dipengaruhi oleh satuan variabel, tetapi dipengaruhi oleh kombinasi ketiga variabel.

**Tabel 4.3** Ranking variabel independen fungsi daya turbin (Watt)

| <i>Rank</i> | <i>Variasi</i>          | $\Sigma x$ | <b>Mean Daya (Watt)</b> |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 1           | Sudu <i>stagger</i> 27° | 5,141      | 0,571 Watt              |
| 2           | Sudu <i>stagger</i> 30° | 5,092      | 0,566 Watt              |
| 3           | Sudu <i>stagger</i> 33° | 4,989      | 0,554 Watt              |
| 1           | Clearance 3 cm          | 6,16       | 0,684 Watt              |
| 2           | Clearance 5 cm          | 4,712      | 0,524 Watt              |
| 3           | Clearance 7 cm          | 4,35       | 0,483 Watt              |

|   |                        |       |            |
|---|------------------------|-------|------------|
| 1 | Kapasitas<br>6,475 l/s | 5,472 | 0,608 Watt |
| 2 | Kapasitas<br>5,137 l/s | 5,312 | 0,590 Watt |
| 3 | Kapasitas<br>4,313 l/s | 4,438 | 0,493 Watt |

Berdasarkan perbandingan nilai daya rata-rata, variasi paling optimal adalah sudu dengan sudut *stagger* 27° - *clearance* 3 cm - kapasitas 6,475 l/s

**Tabel 4.4** Ranking variabel independen fungsi efisiensi (%)

| Rank | Variasi                    | $\Sigma x$ | Mean Efisiensi (%) |
|------|----------------------------|------------|--------------------|
| 1    | Sudu <i>stagger</i><br>27° | 43,41%     | 4,823%             |
| 2    | Sudu <i>stagger</i><br>30° | 43,21%     | 4,801%             |
| 3    | Sudu <i>stagger</i><br>33° | 43,14%     | 4,793%             |
| 1    | Clearance<br>3 cm          | 53,09%     | 5,899%             |
| 2    | Clearance<br>5 cm          | 39,50%     | 4,389%             |
| 3    | Clearance<br>7 cm          | 37,17%     | 4,130%             |
| 1    | Kapasitas<br>6,475 l/s     | 53,87%     | 5,986%             |
| 2    | Kapasitas<br>5,137 l/s     | 45,02%     | 5,002%             |
| 3    | Kapasitas<br>4,313 l/s     | 30,87%     | 3,430%             |

Berdasarkan perbandingan nilai efisiensi rata-rata, variasi paling optimal adalah sudu sudut *stagger* 27° - *clearance* 3 cm - kapasitas 4,313 l/s. Namun bagaimanapun juga, pengujian pada penelitian ini melibatkan tiga kombinasi variabel sekaligus, sehingga pengaruh yang diberikan bersifat simultan. Penentuan variasi mana yang paling optimal perlu mempertimbangkan kembali setiap faktor lain yang turut memengaruhi kinerja turbin vortex.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian 27 kombinasi variasi eksperimen yang meliputi sudut *stagger*, *clearance* sudu, dan kapasitas aliran terhadap daya dan efisiensi turbin vortex, maka dapat ditarik kesimpulan yakni, nilai efisiensi terbesar dihasilkan oleh variasi sudu sudut *stagger* 30° pada kapasitas aliran 0,004313 m<sup>3</sup>/s dan *clearance* 3 cm yakni sebesar **9,16%**. Di sisi lain, berdasarkan perhitungan daya turbin vortex, nilai daya terbesar dihasilkan oleh variasi sudu sudut *stagger* 27° pada kapasitas aliran 0,005137 m<sup>3</sup>/s dan *clearance* 5 cm yakni sebesar **0,86 Watt**.

#### **5.2 Saran**

Pada penelitian ini masih terdapat beberapa hal yang perlu dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal dari penelitian sebelumnya. Berikut merupakan saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya;

1. Perlu dilakukan kajian dan pengujian lebih lanjut terkait variasi ukuran diameter sudu turbin vortex dan jumlah bilah sudu turbin vortex.
2. Perlu dilakukan kajian dan pengujian lebih lanjut pembuatan sudu turbin menggunakan 3D Print dengan *infill* yang lebih bervariasi.
3. Perlu dilakukan modifikasi lebih lanjut mengenai instalasi saluran air dan pemilihan pompa air yang lebih mudah dioperasikan dengan output kapasitas yang lebih stabil, hal ini dimaksudkan untuk memudahkan proses pengambilan data selama uji eksperimen.

## JADWAL KEGIATAN Pengerjaan Proyek Akhir

| Nama Kegiatan   | September |   |   |   | Oktober |   |   |   | November |   |   |   | Desember |   |   |   | Januari |   |   |   | Februari |   |   |   | Maret |   |   |   | April |   |   |   |
|---|-----------|---|---|---|---------|---|---|---|----------|---|---|---|----------|---|---|---|---------|---|---|---|----------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|
|   | 1         | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1        | 2 | 3 | 4 | 1        | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1        | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 |
| Studi Literatur   | ■         | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| Perumusan Masalah   |           |   |   |   | ■       | ■ | ■ | ■ |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| Menentukan tujuan & Metode Penelitian   |           |   |   |   | ■       | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| Konsep Desain dan Perancangan Turbin Vortex                                   |           |   |   |   |         |   |   |   | ■        | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■       | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |       |   |   |   |
| Set up Turbin Vortex  |           |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   | ■        | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |       |   |   |   |
| Uji eksperimen kombinasi variabel independen turbin vortex skala laboratorium |           |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |
| Analisis data eksperimen  |           |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |
| Pembahasan dan Interpretasi data  |           |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |
| Penyusunan Laporan  |           |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   |          |   |   |   |         |   |   |   |          |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |

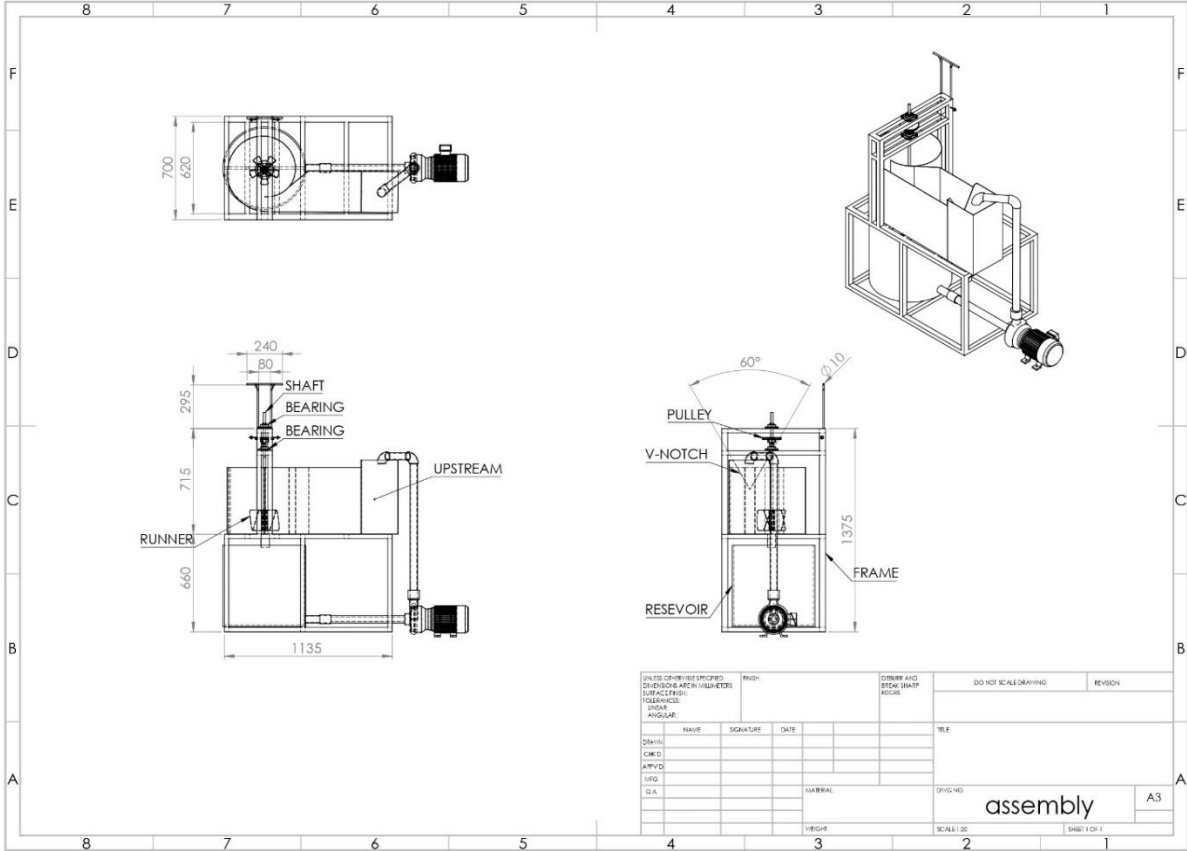
## DAFTAR PUSTAKA

- Bajracharya, T. R., Shakya, S. R., Timilsina, A. B., Dhakal, J., Neupane, S., Gautam, A., & Sapkota, A. (2020). Effects of Geometrical Parameters in Gravitational Water Vortex Turbines with Conical Basin. *Journal of Renewable Energy*, 2020(Figure 1), 1–16. <https://doi.org/10.1155/2020/5373784>
- BPPT. (2021). *OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2021 Perspektif Teknologi Energi Indonesia: Tenaga Surya untuk Penyediaan Energi Charging Station* (M. S. Dr. Edi Hilmawan, B.Eng., M.Eng.; Ira Fitriana, S.Si., M.Sc.; Ir. Agus Sugiyono, M.Eng.; Dr. Ir. Adiarso (ed.)). BPPT.
- Carravetta, A., Derakhshan Houreh, S., & Ramos, H. M. (2018). Pumps as Turbines Fundamentals and Applications. In *Book1*. <http://www.springer.com/series/11693>
- Dahal, N., Shrestha, R. K., Sherchan, S., Milapati, S., Shakya, S. R., & Jha, A. K. (2020). Performance Analysis of Booster based Gravitational Water Vortex Power Plant. *Journal of the Institute of Engineering*, 15(3), 90–96. <https://doi.org/10.3126/jie.v15i3.32026>
- Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Amatya, N., & Nakarmi, A. M. (2015). Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 48). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.030>
- Dhakal, R., Bajracharya, T. R., Shakya, S. R., Kumal, B., Khanal, K., Williamson, S. J., Gautam, S., & Ghale, D. P. (2017). Computational and experimental investigation of runner for gravitational water vortex power plant. *2017 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2017, 2017-Janua*, 365–373. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191087>
- Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Water, G., & Power, V. (2014). Effect of dominant parameters for conical basin gravitational water vortex power plant specification of the appropriate boundary conditions at cells which coincide with or touch the domain boundary . *Proceedings of IOE Graduate Conference, February 2016*, 380–386. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1455.7843>
- Dhakal, Subash, Nakarmi, S., Pun, P., Thapa, A. B., & Bajracharya, T. R. (2014). Development and Testing of Runner and Conical Basin for Gravitational Water Vortex Power Plant. *Journal of the Institute of Engineering*, 10(1). <https://doi.org/10.3126/jie.v10i1.10895>
- Fitroh, H. K., & Adiwibowo, P. H. (2018). Uji Eksperimental Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Tipe Sudu Melengkung Dengan Variasi Sudut Kemiringan. *Jurnal Teknik Mesin*, 1(01), 6. [http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason\\_f/CATxtAppA.pdf%0Ahttp://www.ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/1919%0Ahttps://www.event.lemlit.trisakti.ac.id/semnas/article/view/3543](http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/CATxtAppA.pdf%0Ahttp://www.ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/1919%0Ahttps://www.event.lemlit.trisakti.ac.id/semnas/article/view/3543)
- Gibran, Gultom, S., Lubis, Z., & Sembiring, P. G. (2017). Rancang Bangun Turbin Vortex Dengan Casing Berpenampang Lingkaran Yang Menggunakan Sudu

- Diameter 46 Cm Pada 3 Variasi Jarak Antara Sudu Dan Saluran Keluar. *Jurnal Dinamis*, 4(2), 36–46.
- Herbhakti, F. A. (2020). PERANCANGAN DAN EKSPERIMEN MODEL TURBIN GRAVITASI VORTEX SKALA LABORATORIUM. In *Perancangan Dan Eksperimen Model Turbin Gravitasi Vortex Skala Laboratorium: Vol. TESIS – TF*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mulligan, S., & Hull, P. (2010). Design and Optimisation of a Water Vortex Hydropower Plant. In *Materials Science and Engineering A* (Vol. 6).
- Nishi, Y., Suzuo, R., Sukemori, D., & Inagaki, T. (2020). Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance. *Renewable Energy*, 155, 1103–1117. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.186>
- Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS* (8 th). JOHN WILEY & SONS, INC.
- Rajput, E. R. K. (2011). *A TEXTBOOK OF FLUID MECHANICS AND HYDRAULIC MACHINES* (12th ed.). S. CHAND & COMPANY LTD.
- Silaen, A. F. A. (2015). Pengaruh Beban Terhadap Putaran Turbin Helikal Untuk Pembangkit Tenaga Listrik. 9(2).
- Suwoto, G., Sunarwo, & Supriyo. (2014). Kajian Turbin Air Aliran Puser Skala Pico Terhadap Variasi Jumlah Sudu Dan Sudut Sudu. *Seminar Nasional Ke-9*, 269–274.

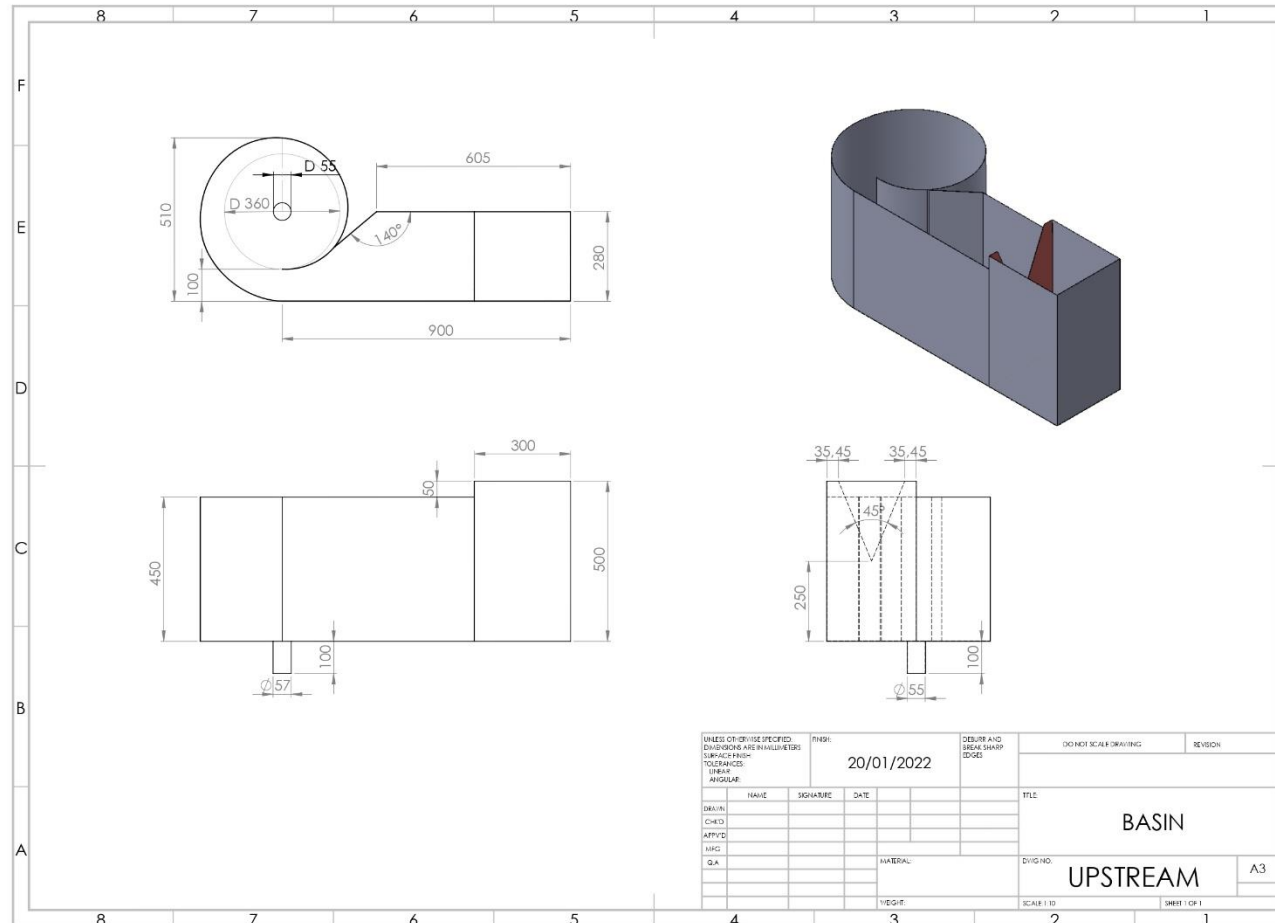
# LAMPIRAN

Lampiran 1. Rancangan turbin vortex skala laboratorium

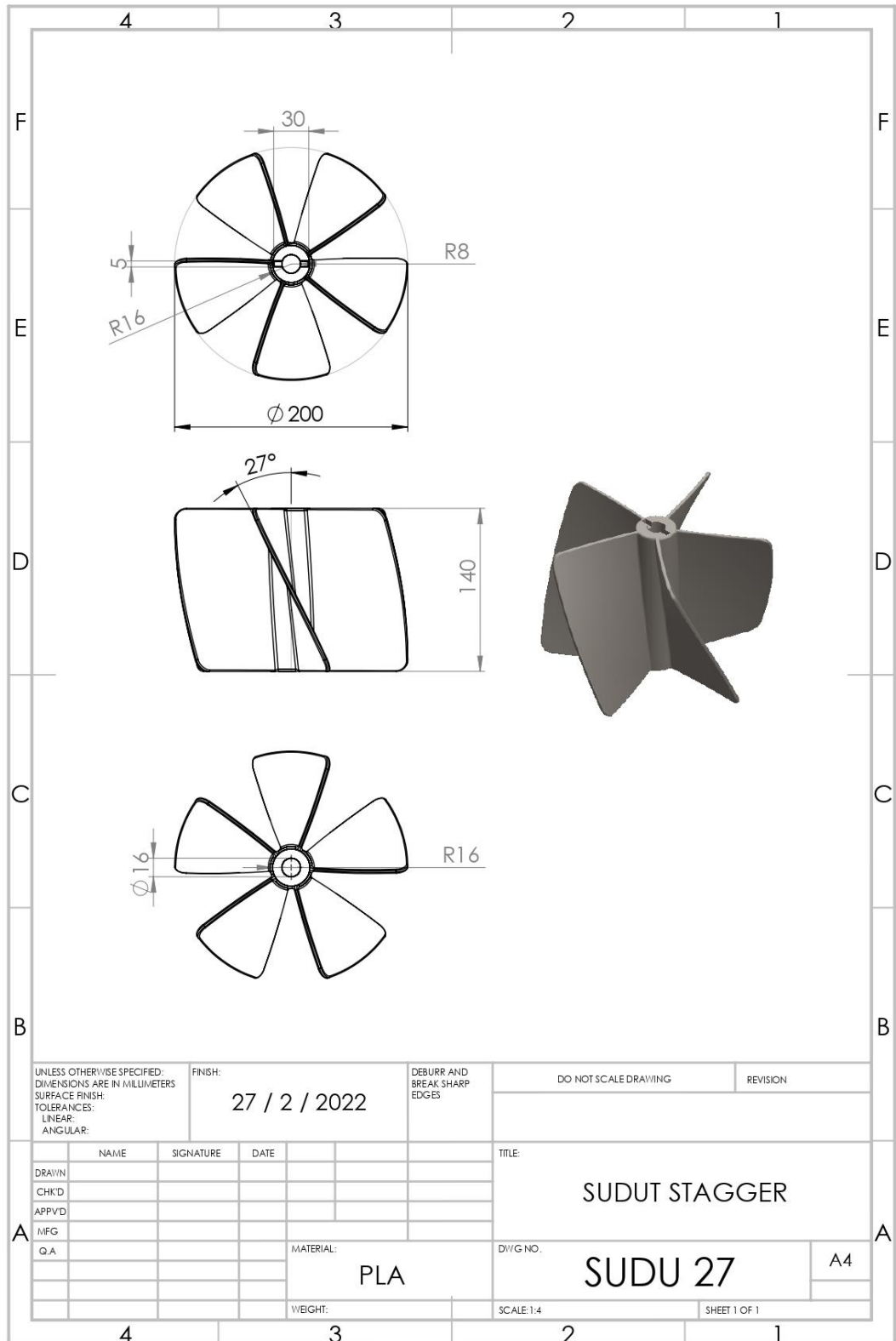




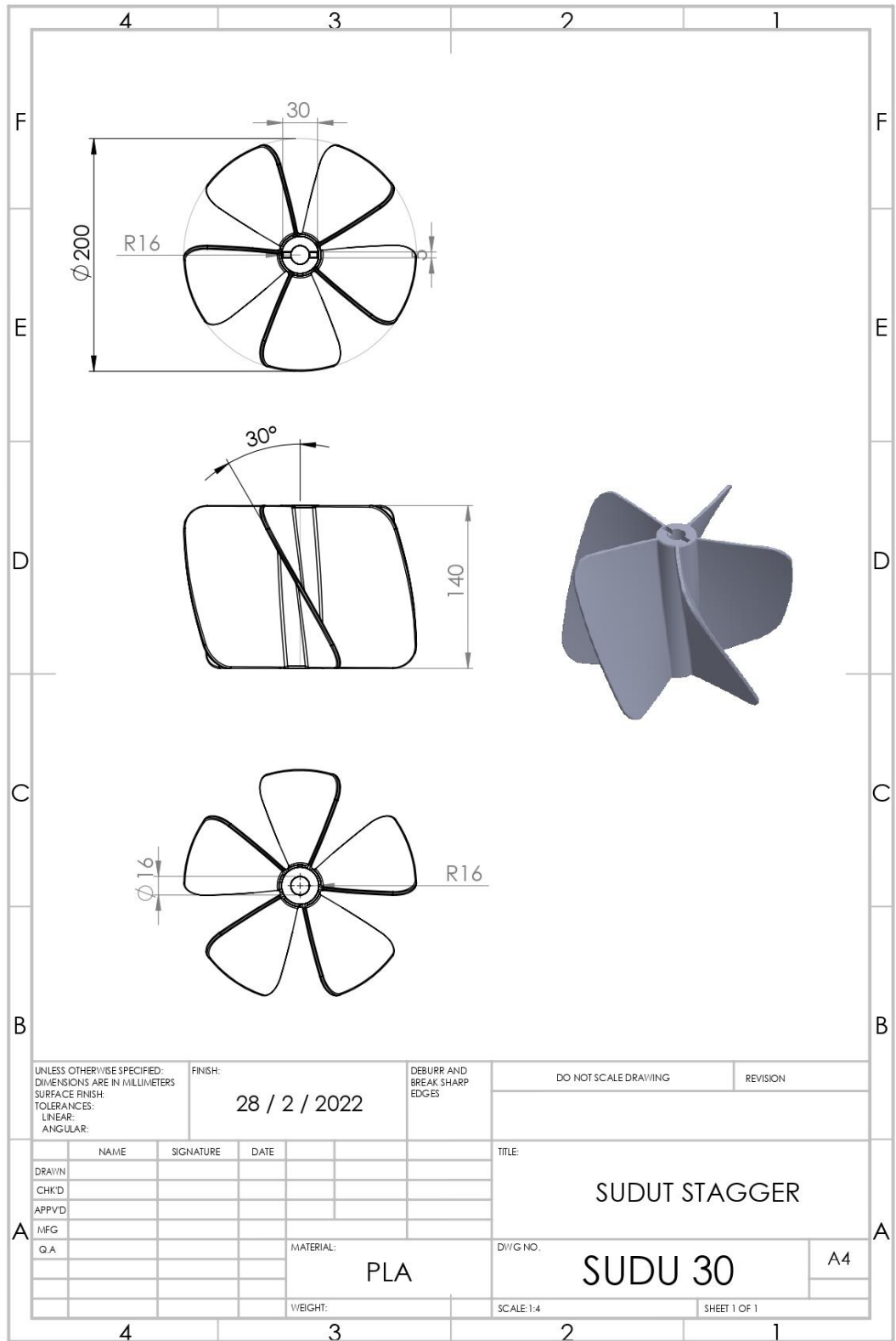
## Lampiran 2. Rancangan desain basin



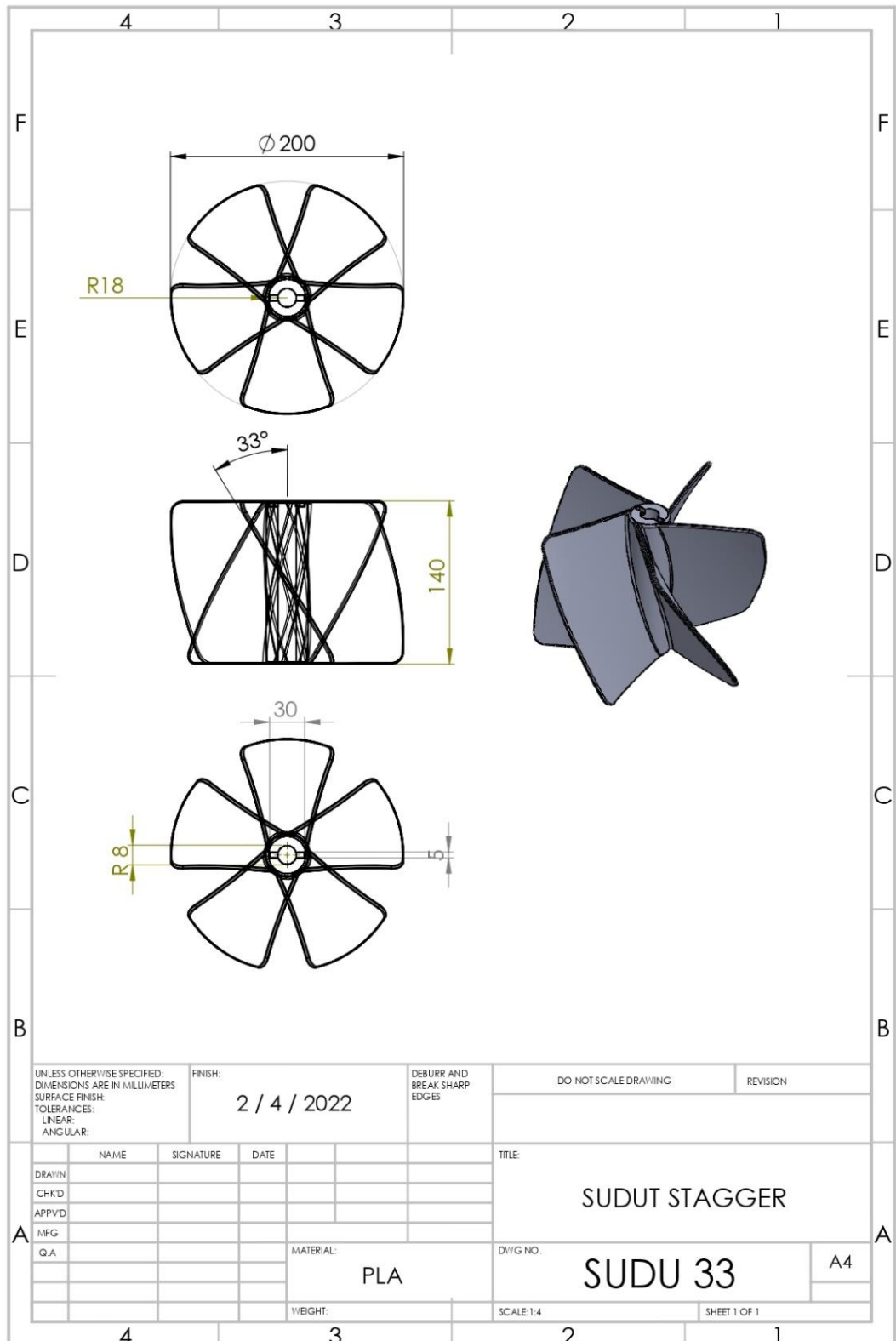
**Lampiran 3.** Dimensi sudu turbin dengan sudut *stagger* 27°



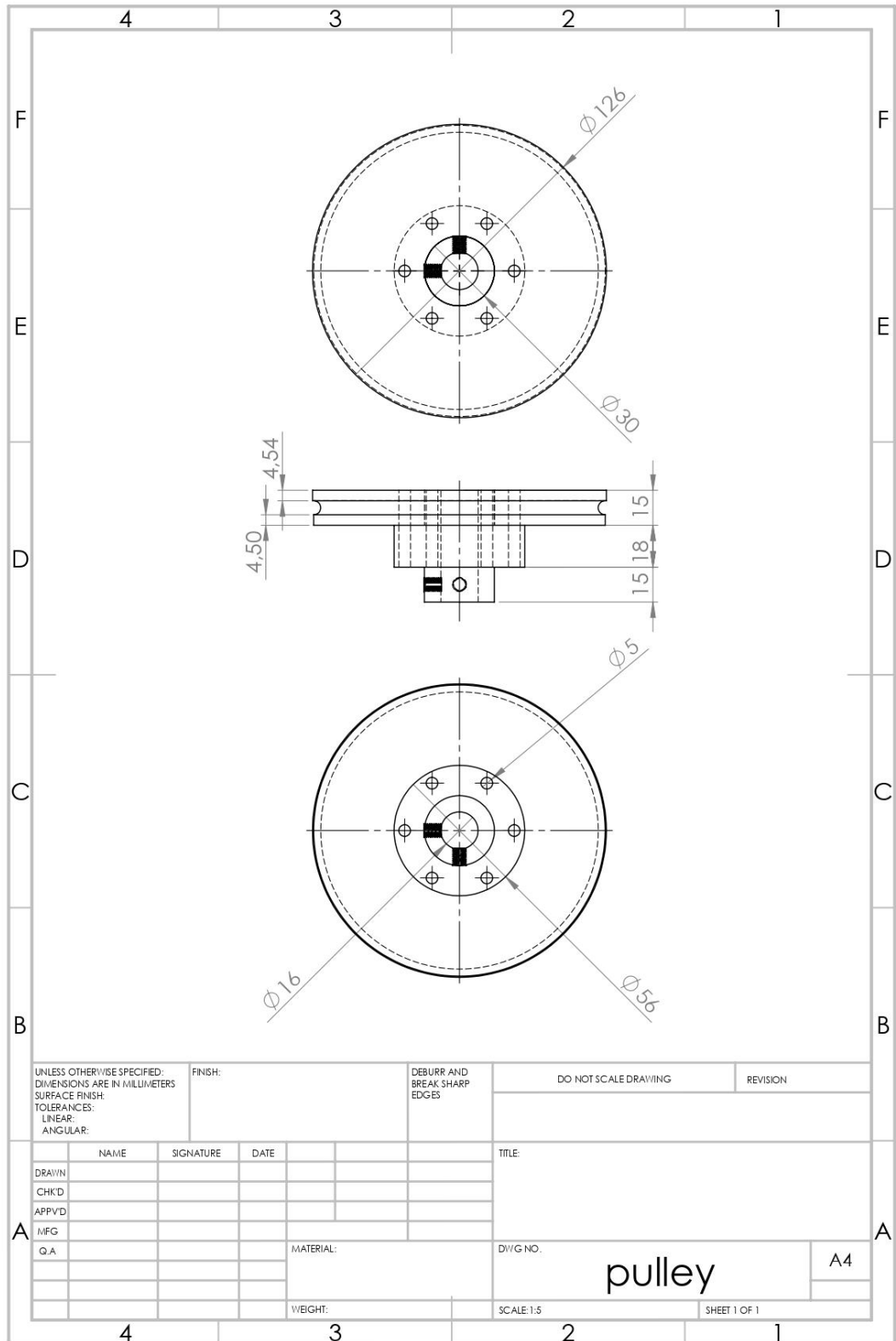
**Lampiran 4.** Dimensi sudu turbin dengan sudut *stagger* 30°



**Lampiran 5.** Sudu turbin dengan sudut *stagger* 33°



**Lampiran 6. Dimensi Pulley**



**Lampiran 7.** Data hasil pengujian sudu dengan sudut *stagger* 27°

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 83,00       | 95,00       | 85,00       |
|                  | 0,02           | 0,02        | 0,02        | 0,05        | 79,22       | 88,91       | 77,43       |
|                  | 0,05           | 0,03        | 0,04        | 0,10        | 75,44       | 82,83       | 69,85       |
|                  | 0,07           | 0,05        | 0,06        | 0,15        | 71,66       | 70,65       | 65,25       |
|                  | 0,09           | 0,07        | 0,08        | 0,20        | 67,88       | 61,93       | 60,64       |
|                  | 0,10           | 0,10        | 0,10        | 0,25        | 61,29       | 53,20       | 56,04       |
|                  | 0,10           | 0,12        | 0,12        | 0,30        | 54,71       | 44,48       | 51,43       |
|                  | 0,11           | 0,15        | 0,14        | 0,35        | 48,12       | 35,75       | 46,83       |
|                  | 0,12           | 0,18        | 0,16        | 0,40        | 41,54       | 30,64       | 42,23       |
|                  | 0,13           | 0,22        | 0,20        | 0,45        | 34,95       | 25,54       | 36,19       |
|                  | 0,17           | 0,25        | 0,23        | 0,50        | 29,13       | 20,43       | 30,16       |
|                  | 0,22           | 0,29        | 0,27        | 0,55        | 23,30       | 15,32       | 24,13       |
|                  | 0,27           | 0,32        | 0,32        | 0,60        | 17,48       | 10,21       | 18,10       |
|                  | 0,32           | 0,36        | 0,35        | 0,65        | 11,65       | 7,30        | 12,05       |
|                  | 0,37           | 0,39        | 0,39        | 0,70        | 6,80        | 0,00        | 6,02        |
|                  | 0,42           | -           | 0,44        | 0,75        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| -                | -              | -           | 0,80        | -           | -           | -           |             |
| -                | -              | -           | 0,85        | -           | -           | -           |             |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 5,137 l/s        | 0              | 0           | 0           | 0           | 128,1       | 97,5        | 98,7        |
|                  | 0,018          | 0,017       | 0,040       | 0,05        | 112,0       | 91,6        | 92,8        |
|                  | 0,022          | 0,024       | 0,080       | 0,1         | 95,9        | 85,7        | 86,9        |
|                  | 0,029          | 0,032       | 0,120       | 0,15        | 79,8        | 79,8        | 81,1        |
|                  | 0,04           | 0,05        | 0,160       | 0,2         | 71,4        | 74,0        | 75,2        |
|                  | 0,06           | 0,06        | 0,21        | 0,25        | 63,1        | 68,3        | 68,2        |
|                  | 0,07           | 0,08        | 0,25        | 0,3         | 54,8        | 62,6        | 61,2        |
|                  | 0,09           | 0,12        | 0,28        | 0,35        | 46,4        | 56,9        | 54,2        |
|                  | 0,13           | 0,16        | 0,32        | 0,4         | 39,8        | 51,2        | 47,2        |
|                  | 0,17           | 0,19        | 0,35        | 0,45        | 33,2        | 38,4        | 41,9        |
|                  | 0,22           | 0,22        | 0,37        | 0,5         | 26,5        | 25,6        | 36,7        |
|                  | 0,26           | 0,24        | 0,40        | 0,55        | 19,9        | 12,8        | 31,4        |
|                  | 0,31           | 0,28        | 0,44        | 0,6         | 13,3        | 10,0        | 26,2        |
|                  | 0,35           | 0,32        | 0,47        | 0,65        | 6,6         | 8,4         | 21,0        |

|  |      |      |      |      |     |     |      |
|--|------|------|------|------|-----|-----|------|
|  | 0,40 | 0,35 | 0,51 | 0,7  | 0,0 | 0,0 | 15,7 |
|  |      |      | 0,54 | 0,75 | 0,0 | 0,0 | 10,5 |
|  |      |      | 0,57 | 0,8  | 0,0 | 0,0 | 5,2  |
|  |      |      | 0,61 | 0,85 | 0,0 | 0,0 | 0,0  |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 4,313 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 102,00      | 108,50      | 97,00       |
|                  | 0,02           | 0,04        | 0,03        | 0,05        | 94,00       | 100,00      | 90,00       |
|                  | 0,04           | 0,06        | 0,07        | 0,10        | 87,00       | 92,00       | 83,50       |
|                  | 0,07           | 0,09        | 0,10        | 0,15        | 77,00       | 84,00       | 78,00       |
|                  | 0,10           | 0,12        | 0,13        | 0,20        | 70,50       | 76,00       | 71,00       |
|                  | 0,13           | 0,15        | 0,16        | 0,25        | 62,00       | 65,00       | 63,50       |
|                  | 0,17           | 0,18        | 0,19        | 0,30        | 55,00       | 59,00       | 58,00       |
|                  | 0,20           | 0,21        | 0,21        | 0,35        | 47,00       | 50,00       | 51,50       |
|                  | 0,23           | 0,24        | 0,24        | 0,40        | 39,50       | 42,50       | 45,00       |
|                  | 0,27           | 0,27        | 0,26        | 0,45        | 31,00       | 34,00       | 38,50       |
|                  | 0,30           | 0,30        | 0,29        | 0,50        | 23,50       | 27,00       | 32,00       |
|                  | 0,34           | 0,33        | 0,32        | 0,55        | 16,00       | 19,00       | 26,50       |
|                  | 0,37           | 0,36        | 0,34        | 0,60        | 7,70        | 9,20        | 22,00       |
|                  | 0,41           | 0,39        | 0,37        | 0,65        | 0,00        | 0,00        | 15,00       |
|                  |                |             | 0,40        | 0,70        | 0,00        | 0,00        | 11,00       |
|                  |                |             | 0,42        | 0,75        | 0,00        | 0,00        | 7,00        |
|                  |                | 0,45        | 0,80        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |             |
|                  |                |             | 0,85        |             |             |             |             |

**Lampiran 8.** Data hasil pengujian sudu dengan sudut *stagger* 30°

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 89,3        | 94,8        | 132,1       |
|                  | 0,017          | 0,020       | 0,017       | 0,05        | 84,6        | 87,3        | 115,8       |
|                  | 0,021          | 0,036       | 0,033       | 0,10        | 80,0        | 79,9        | 99,5        |
|                  | 0,024          | 0,050       | 0,050       | 0,15        | 76,6        | 72,5        | 84,0        |
|                  | 0,04           | 0,064       | 0,066       | 0,20        | 71,8        | 65,1        | 68,0        |
|                  | 0,07           | 0,07        | 0,083       | 0,25        | 61,2        | 57,7        | 51,7        |
|                  | 0,11           | 0,10        | 0,10        | 0,30        | 50,6        | 52,9        | 34,3        |
|                  | 0,13           | 0,12        | 0,13        | 0,35        | 40,0        | 48,0        | 30,0        |
|                  | 0,17           | 0,15        | 0,17        | 0,40        | 35,6        | 43,2        | 25,7        |
|                  | 0,20           | 0,17        | 0,20        | 0,45        | 31,1        | 38,3        | 21,4        |
|                  | 0,24           | 0,20        | 0,23        | 0,50        | 26,7        | 33,5        | 17,2        |

|  |      |      |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
|  | 0,27 | 0,22 | 0,26 | 0,55 | 22,2 | 26,8 | 14,0 |
|  | 0,31 | 0,24 | 0,30 | 0,60 | 17,8 | 20,1 | 10,0 |
|  | 0,34 | 0,27 | 0,33 | 0,65 | 14,0 | 14,0 | 8,0  |
|  | 0,38 | 0,29 | 0,36 | 0,70 | 9,0  | 8,0  | 0,0  |
|  | 0,41 | 0,30 | -    | 0,75 | 7,0  | 0,0  | -    |
|  | 0,45 | -    | -    | 0,80 | 0,0  | -    | -    |
|  | -    | -    | -    | 0,85 | -    | -    | -    |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 5,137 l/s        | 0,000          | 0,000       | 0,00        | 0,00        | 99,6        | 101,3       | 99,5        |
|                  | 0,024          | 0,040       | 0,022       | 0,05        | 94,5        | 92,9        | 91,4        |
|                  | 0,030          | 0,070       | 0,028       | 0,10        | 89,5        | 84,6        | 83,4        |
|                  | 0,07           | 0,11        | 0,035       | 0,15        | 84,4        | 76,3        | 75,3        |
|                  | 0,09           | 0,15        | 0,040       | 0,20        | 76,7        | 69,6        | 67,3        |
|                  | 0,11           | 0,16        | 0,07        | 0,25        | 69,0        | 63,0        | 59,4        |
|                  | 0,14           | 0,18        | 0,11        | 0,30        | 61,4        | 56,4        | 51,4        |
|                  | 0,16           | 0,20        | 0,14        | 0,35        | 53,7        | 49,8        | 43,5        |
|                  | 0,18           | 0,210       | 0,16        | 0,40        | 46,0        | 43,2        | 35,6        |
|                  | 0,21           | 0,240       | 0,20        | 0,45        | 38,3        | 34,6        | 29,6        |
|                  | 0,24           | 0,265       | 0,25        | 0,50        | 25,6        | 25,9        | 23,7        |
|                  | 0,265          | 0,280       | 0,29        | 0,55        | 17,0        | 17,3        | 17,8        |
|                  | 0,31           | 0,295       | 0,33        | 0,60        | 11,0        | 8,6         | 11,9        |
|                  | 0,33           | 0,31        | 0,38        | 0,65        | 0,00        | 0,00        | 5,9         |
|                  |                |             | 0,42        | 0,70        |             |             | 0,0         |
|                  |                |             |             | 0,75        |             |             |             |
|                  |                |             | 0,80        |             |             |             |             |
|                  |                |             | 0,85        |             |             |             |             |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 4,313 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 104,1       | 100,5       | 97,0        |
|                  | 0,020          | 0,046       | 0,030       | 0,05        | 97,5        | 95,6        | 85,5        |
|                  | 0,040          | 0,095       | 0,050       | 0,10        | 91,0        | 90,7        | 74,0        |
|                  | 0,060          | 0,140       | 0,061       | 0,15        | 85,0        | 85,8        | 62,6        |



|  |       |       |       |      |      |      |      |
|--|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|  | 0,080 | 0,180 | 0,069 | 0,20 | 77,6 | 80,8 | 53,3 |
|  | 0,10  | 0,200 | 0,090 | 0,25 | 71,0 | 75,9 | 44,1 |
|  | 0,13  | 0,22  | 0,130 | 0,30 | 65,4 | 71,0 | 34,8 |
|  | 0,15  | 0,25  | 0,15  | 0,35 | 59,9 | 64,1 | 25,6 |
|  | 0,18  | 0,28  | 0,18  | 0,40 | 54,3 | 57,2 | 21,3 |
|  | 0,22  | 0,30  | 0,21  | 0,45 | 45,3 | 50,2 | 17,0 |
|  | 0,27  | 0,33  | 0,24  | 0,50 | 36,2 | 43,3 | 13,0 |
|  | 0,31  | 0,34  | 0,27  | 0,55 | 27,2 | 36,1 | 10,3 |
|  | 0,36  | 0,38  | 0,30  | 0,60 | 18,1 | 28,9 | 8,1  |
|  | 0,40  | 0,42  | 0,34  | 0,65 | 9,1  | 21,7 | 0,0  |
|  | 0,45  | 0,45  |       | 0,70 | 0,00 | 14,4 |      |
|  |       | 0,48  |       | 0,75 |      | 8,60 |      |
|  |       | 0,50  |       | 0,80 |      | 0,00 |      |
|  |       |       |       | 0,85 |      |      |      |

**Lampiran 9.** Data hasil pengujian sudu dengan sudut *stagger* 33°

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,000       | 0,00        | 100,88      | 94,75       | 93,50       |
|                  | 0,03           | 0,021       | 0,043       | 0,05        | 93,00       | 88,04       | 90,10       |
|                  | 0,05           | 0,028       | 0,092       | 0,10        | 85,13       | 81,33       | 83,40       |
|                  | 0,05           | 0,041       | 0,140       | 0,15        | 77,25       | 74,61       | 75,60       |
|                  | 0,06           | 0,05        | 0,18        | 0,20        | 69,38       | 67,90       | 67,30       |
|                  | 0,07           | 0,09        | 0,21        | 0,25        | 60,90       | 63,01       | 63,00       |
|                  | 0,10           | 0,12        | 0,25        | 0,30        | 52,43       | 58,11       | 59,00       |
|                  | 0,14           | 0,16        | 0,27        | 0,35        | 43,95       | 53,22       | 55,00       |
|                  | 0,18           | 0,19        | 0,30        | 0,40        | 39,06       | 48,32       | 50,50       |
|                  | 0,22           | 0,23        | 0,33        | 0,45        | 34,17       | 43,43       | 46,20       |
|                  | 0,26           | 0,27        | 0,37        | 0,50        | 29,29       | 37,22       | 43,00       |
|                  | 0,30           | 0,32        | 0,40        | 0,55        | 24,40       | 31,02       | 36,00       |
|                  | 0,34           | 0,36        | 0,44        | 0,60        | 19,51       | 24,81       | 30,00       |
|                  | 0,38           | 0,40        | 0,47        | 0,65        | 14,62       | 18,61       | 24,00       |
|                  | 0,42           | 0,44        | 0,51        | 0,70        | 9,73        | 12,41       | 18,30       |
|                  | 0,46           | 0,49        | 0,55        | 0,75        | 4,85        | 6,20        | 12,20       |
|                  | 0,51           | 0,53        | 0,58        | 0,80        | 0,00        | 0,00        | 8,00        |
|                  |                | 0,62        | 0,85        |             |             | 0,00        |             |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 5,137 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 101,14      | 104,70      | 97,52       |
|                  | 0,03           | 0,035       | 0,02        | 0,05        | 92,67       | 92,68       | 91,10       |
|                  | 0,04           | 0,08        | 0,04        | 0,10        | 84,20       | 80,65       | 85,00       |
|                  | 0,05           | 0,12        | 0,06        | 0,15        | 79,31       | 75,23       | 78,50       |
|                  | 0,07           | 0,15        | 0,07        | 0,20        | 74,43       | 69,81       | 66,50       |
|                  | 0,09           | 0,18        | 0,08        | 0,25        | 69,54       | 64,39       | 54,20       |
|                  | 0,11           | 0,20        | 0,11        | 0,30        | 64,65       | 58,97       | 48,50       |
|                  | 0,14           | 0,23        | 0,13        | 0,35        | 56,57       | 53,55       | 42,20       |
|                  | 0,18           | 0,25        | 0,16        | 0,40        | 47,00       | 43,10       | 36,10       |
|                  | 0,22           | 0,265       | 0,19        | 0,45        | 40,00       | 32,30       | 30,10       |
|                  | 0,25           | 0,30        | 0,21        | 0,50        | 32,50       | 21,40       | 24,00       |
|                  | 0,29           | 0,33        | 0,24        | 0,55        | 24,00       | 15,60       | 18,00       |
|                  | 0,32           | 0,36        | 0,27        | 0,60        | 17,00       | 10,70       | 12,40       |
|                  | 0,36           | 0,40        | 0,29        | 0,65        | 8,00        | 0,00        | 7,00        |
|                  | 0,40           |             | 0,32        | 0,70        | 0,00        |             | 0,00        |
|                  |                |             |             | 0,75        |             |             |             |
|                  |                |             |             | 0,80        |             |             |             |
|                  |                |             | 0,85        |             |             |             |             |

| Kapasitas Aliran | Spring Balance |             |             | Dead Weight | Putaran     |             |             |
|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | Clearance 3    | Clearance 5 | Clearance 7 |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 4,313 l/s        | 0,00           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 97,98       | 102,68      | 101,48      |
|                  | 0,03           | 0,04        | 0,02        | 0,05        | 92,56       | 93,33       | 83,30       |
|                  | 0,03           | 0,06        | 0,04        | 0,10        | 87,14       | 83,98       | 65,12       |
|                  | 0,05           | 0,10        | 0,05        | 0,15        | 81,73       | 74,63       | 46,95       |
|                  | 0,06           | 0,13        | 0,07        | 0,20        | 73,83       | 63,52       | 41,59       |
|                  | 0,09           | 0,15        | 0,08        | 0,25        | 65,93       | 52,41       | 36,23       |
|                  | 0,13           | 0,17        | 0,10        | 0,30        | 58,03       | 41,30       | 30,86       |
|                  | 0,16           | 0,20        | 0,11        | 0,35        | 50,78       | 34,42       | 25,50       |
|                  | 0,20           | 0,23        | 0,14        | 0,40        | 43,52       | 27,53       | 21,86       |
|                  | 0,23           | 0,26        | 0,17        | 0,45        | 36,27       | 22,40       | 18,21       |
|                  | 0,27           | 0,28        | 0,20        | 0,50        | 29,02       | 19,60       | 14,57       |
|                  | 0,30           | 0,31        | 0,23        | 0,55        | 21,76       | 16,00       | 10,93       |
|                  | 0,34           | 0,34        | 0,26        | 0,60        | 14,51       | 14,00       | 7,50        |
|                  | 0,37           | 0,36        | 0,30        | 0,65        | 8,10        | 8,00        | 0,00        |

|  |      |      |  |      |      |      |  |
|--|------|------|--|------|------|------|--|
|  | 0,41 | 0,38 |  | 0,70 | 0,00 | 0,00 |  |
|  |      |      |  | 0,75 |      |      |  |
|  |      |      |  | 0,80 |      |      |  |
|  |      |      |  | 0,85 |      |      |  |

**Lampiran 10.** Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran variasi sudu dengan sudut stagger 27°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran     |             |             | Torsi (N.m) |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 83,00       | 95,00       | 85,00       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 79,22       | 88,91       | 77,43       | 0,016       | 0,021       | 0,018       |
|                  | 0,10        | 75,44       | 82,83       | 69,85       | 0,032       | 0,041       | 0,036       |
|                  | 0,15        | 71,66       | 70,65       | 65,25       | 0,049       | 0,062       | 0,054       |
|                  | 0,20        | 67,88       | 61,93       | 60,64       | 0,065       | 0,077       | 0,072       |
|                  | 0,25        | 61,29       | 53,20       | 56,04       | 0,090       | 0,091       | 0,090       |
|                  | 0,30        | 54,71       | 44,48       | 51,43       | 0,115       | 0,106       | 0,108       |
|                  | 0,35        | 48,12       | 35,75       | 46,83       | 0,141       | 0,121       | 0,126       |
|                  | 0,40        | 41,54       | 30,64       | 42,23       | 0,166       | 0,129       | 0,144       |
|                  | 0,45        | 34,95       | 25,54       | 36,19       | 0,191       | 0,138       | 0,150       |
|                  | 0,50        | 29,13       | 20,43       | 30,16       | 0,192       | 0,147       | 0,157       |
|                  | 0,55        | 23,30       | 15,32       | 24,13       | 0,193       | 0,156       | 0,162       |
|                  | 0,60        | 17,48       | 10,21       | 18,10       | 0,194       | 0,165       | 0,168       |
|                  | 0,65        | 11,65       | 7,30        | 12,05       | 0,195       | 0,174       | 0,175       |
|                  | 0,70        | 6,80        | 0,00        | 6,02        | 0,196       | 0,182       | 0,181       |
|                  | 0,75        | 0,00        | -           | 0,00        | 0,197       | -           | 0,185       |
| 0,80             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| 0,85             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| 5,137 l/s        | 0,00        | 128,1       | 97,5        | 98,7        | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 112,0       | 91,6        | 92,8        | 0,019       | 0,019       | 0,006       |
|                  | 0,10        | 95,9        | 85,7        | 86,9        | 0,046       | 0,045       | 0,012       |
|                  | 0,15        | 79,8        | 79,8        | 81,1        | 0,071       | 0,069       | 0,018       |
|                  | 0,20        | 71,4        | 74,0        | 75,2        | 0,094       | 0,090       | 0,021       |
|                  | 0,25        | 63,1        | 68,3        | 68,2        | 0,114       | 0,111       | 0,024       |
|                  | 0,30        | 54,8        | 62,6        | 61,2        | 0,135       | 0,131       | 0,029       |
|                  | 0,35        | 46,4        | 56,9        | 54,2        | 0,156       | 0,135       | 0,041       |
|                  | 0,40        | 39,8        | 51,2        | 47,2        | 0,159       | 0,141       | 0,047       |
|                  | 0,45        | 33,2        | 38,4        | 41,9        | 0,163       | 0,153       | 0,059       |
|                  | 0,50        | 26,5        | 25,6        | 36,7        | 0,166       | 0,165       | 0,077       |

|            |      |        |        |       |       |       |       |
|------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|            | 0,55 | 19,9   | 12,8   | 31,4  | 0,169 | 0,182 | 0,088 |
|            | 0,60 | 13,3   | 10,0   | 26,2  | 0,173 | 0,188 | 0,094 |
|            | 0,65 | 6,6    | 8,4    | 21,0  | 0,176 | 0,194 | 0,106 |
|            | 0,70 | 0,0    | 0,0    | 15,7  | 0,180 | 0,206 | 0,112 |
|            | 0,75 | -      | -      | 10,5  | -     | -     | 0,124 |
|            | 0,80 | -      | -      | 5,2   | -     | -     | 0,135 |
|            | 0,85 | -      | -      | -     | -     | -     | 0,141 |
| 4,3131 l/s | 0,00 | 102,00 | 108,50 | 97,00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|            | 0,05 | 94,00  | 100,00 | 90,00 | 0,018 | 0,009 | 0,012 |
|            | 0,10 | 87,00  | 92,00  | 83,50 | 0,038 | 0,024 | 0,018 |
|            | 0,15 | 77,00  | 84,00  | 78,00 | 0,048 | 0,035 | 0,029 |
|            | 0,20 | 70,50  | 76,00  | 71,00 | 0,059 | 0,047 | 0,041 |
|            | 0,25 | 62,00  | 65,00  | 63,50 | 0,071 | 0,059 | 0,053 |
|            | 0,30 | 55,00  | 59,00  | 58,00 | 0,077 | 0,071 | 0,065 |
|            | 0,35 | 47,00  | 50,00  | 51,50 | 0,088 | 0,082 | 0,082 |
|            | 0,40 | 39,50  | 42,50  | 45,00 | 0,100 | 0,094 | 0,094 |
|            | 0,45 | 31,00  | 34,00  | 38,50 | 0,106 | 0,106 | 0,112 |
|            | 0,50 | 23,50  | 27,00  | 32,00 | 0,118 | 0,118 | 0,124 |
|            | 0,55 | 16,00  | 19,00  | 26,50 | 0,124 | 0,129 | 0,135 |
|            | 0,60 | 7,70   | 9,20   | 22,00 | 0,135 | 0,141 | 0,153 |
|            | 0,65 | 0,00   | 0,00   | 15,00 | 0,141 | 0,153 | 0,165 |
|            | 0,70 | -      | -      | 11,00 | -     | -     | 0,177 |
|            | 0,75 | -      | -      | 7,00  | -     | -     | 0,194 |
|            | 0,80 | -      | -      | 0,00  | -     | -     | 0,206 |
| 0,85       | -    | -      | -      | -     | -     | -     |       |

**Lampiran 11.** Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran variasi sudut dengan sudut *stagger* 30°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran     |             |             | Torsi (N.m) |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 89,3        | 94,8        | 132,1       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 84,6        | 87,3        | 115,8       | 0,019       | 0,018       | 0,020       |
|                  | 0,10        | 80,0        | 79,9        | 99,5        | 0,046       | 0,038       | 0,039       |
|                  | 0,15        | 76,6        | 72,5        | 84,0        | 0,074       | 0,059       | 0,059       |
|                  | 0,20        | 71,8        | 65,1        | 68,0        | 0,095       | 0,080       | 0,079       |
|                  | 0,25        | 61,2        | 57,7        | 51,7        | 0,103       | 0,106       | 0,098       |
|                  | 0,30        | 50,6        | 52,9        | 34,3        | 0,111       | 0,121       | 0,118       |
|                  | 0,35        | 40,0        | 48,0        | 30,0        | 0,129       | 0,135       | 0,128       |
|                  | 0,40        | 35,6        | 43,2        | 25,7        | 0,138       | 0,150       | 0,138       |

|                  |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 0,45 | 31,1  | 38,3  | 21,4  | 0,147 | 0,165 | 0,149 |
|                  | 0,50 | 26,7  | 33,5  | 17,2  | 0,155 | 0,180 | 0,159 |
|                  | 0,55 | 22,2  | 26,8  | 14,0  | 0,164 | 0,197 | 0,169 |
|                  | 0,60 | 17,8  | 20,1  | 10,0  | 0,172 | 0,214 | 0,180 |
|                  | 0,65 | 14,0  | 14,0  | 8,0   | 0,181 | 0,227 | 0,190 |
|                  | 0,70 | 9,0   | 8,0   | 0,0   | 0,189 | 0,244 | 0,200 |
|                  | 0,75 | 7,0   | 0,0   | -     | 0,198 | 0,265 | -     |
|                  | 0,80 | 0,0   | -     | -     | 0,206 | -     | -     |
|                  | 0,85 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00 | 99,6  | 101,3 | 99,5  | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 94,5  | 92,9  | 91,4  | 0,015 | 0,006 | 0,016 |
|                  | 0,10 | 89,5  | 84,6  | 83,4  | 0,041 | 0,018 | 0,042 |
|                  | 0,15 | 84,4  | 76,3  | 75,3  | 0,047 | 0,024 | 0,068 |
|                  | 0,20 | 76,7  | 69,6  | 67,3  | 0,065 | 0,029 | 0,094 |
|                  | 0,25 | 69,0  | 63,0  | 59,4  | 0,082 | 0,053 | 0,104 |
|                  | 0,30 | 61,4  | 56,4  | 51,4  | 0,094 | 0,071 | 0,115 |
|                  | 0,35 | 53,7  | 49,8  | 43,5  | 0,112 | 0,088 | 0,125 |
|                  | 0,40 | 46,0  | 43,2  | 35,6  | 0,129 | 0,112 | 0,141 |
|                  | 0,45 | 38,3  | 34,6  | 29,6  | 0,141 | 0,124 | 0,145 |
|                  | 0,50 | 25,6  | 25,9  | 23,7  | 0,153 | 0,138 | 0,149 |
|                  | 0,55 | 17,0  | 17,3  | 17,8  | 0,168 | 0,159 | 0,153 |
|                  | 0,60 | 11,0  | 8,6   | 11,9  | 0,171 | 0,180 | 0,157 |
|                  | 0,65 | 0,00  | 0,00  | 5,9   | 0,188 | 0,200 | 0,161 |
|                  | 0,70 | -     | -     | 0,0   | 0,000 | 0,000 | 0,165 |
|                  | 0,75 | -     | -     | -     | -     | -     | 0,000 |
| 0,80             | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |
| 0,85             | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 104,1 | 100,5 | 97,0  | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 97,5  | 95,6  | 85,5  | 0,018 | 0,002 | 0,012 |
|                  | 0,10 | 91,0  | 90,7  | 74,0  | 0,035 | 0,003 | 0,029 |
|                  | 0,15 | 85,0  | 85,8  | 62,6  | 0,053 | 0,006 | 0,052 |
|                  | 0,20 | 77,6  | 80,8  | 53,3  | 0,071 | 0,012 | 0,077 |
|                  | 0,25 | 71,0  | 75,9  | 44,1  | 0,088 | 0,029 | 0,094 |
|                  | 0,30 | 65,4  | 71,0  | 34,8  | 0,103 | 0,047 | 0,100 |
|                  | 0,35 | 59,9  | 64,1  | 25,6  | 0,118 | 0,059 | 0,121 |
|                  | 0,40 | 54,3  | 57,2  | 21,3  | 0,132 | 0,071 | 0,132 |
|                  | 0,45 | 45,3  | 50,2  | 17,0  | 0,135 | 0,088 | 0,143 |
|                  | 0,50 | 36,2  | 43,3  | 13,0  | 0,137 | 0,100 | 0,154 |
|                  | 0,55 | 27,2  | 36,1  | 10,3  | 0,140 | 0,124 | 0,165 |
|                  | 0,60 | 18,1  | 28,9  | 8,1   | 0,142 | 0,129 | 0,177 |
| 0,65             | 9,1  | 21,7  | 0,0   | 0,145 | 0,135 | 0,182 |       |

|  |      |      |      |   |       |       |   |
|--|------|------|------|---|-------|-------|---|
|  | 0,70 | 0,00 | 14,4 | - | 0,147 | 0,147 | - |
|  | 0,75 | -    | 8,60 | - | -     | 0,159 | - |
|  | 0,80 | -    | 0,00 | - | -     | 0,177 | - |
|  | 0,85 | -    | -    | - | -     | -     | - |

**Lampiran 12.** Tabel hasil perhitungan torsi terhadap putaran (rpm) variasi sudut dengan sudut *stagger* 33°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran     |             |             | Torsi (N.m) |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 100,88      | 94,75       | 93,50       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 93,00       | 88,04       | 90,10       | 0,012       | 0,017       | 0,004       |
|                  | 0,10        | 85,13       | 81,33       | 83,40       | 0,032       | 0,042       | 0,005       |
|                  | 0,15        | 77,25       | 74,61       | 75,60       | 0,058       | 0,064       | 0,006       |
|                  | 0,20        | 69,38       | 67,90       | 67,30       | 0,082       | 0,088       | 0,012       |
|                  | 0,25        | 60,90       | 63,01       | 63,00       | 0,105       | 0,097       | 0,024       |
|                  | 0,30        | 52,43       | 58,11       | 59,00       | 0,121       | 0,105       | 0,029       |
|                  | 0,35        | 43,95       | 53,22       | 55,00       | 0,127       | 0,113       | 0,047       |
|                  | 0,40        | 39,06       | 48,32       | 50,50       | 0,132       | 0,121       | 0,059       |
|                  | 0,45        | 34,17       | 43,43       | 46,20       | 0,137       | 0,129       | 0,071       |
|                  | 0,50        | 29,29       | 37,22       | 43,00       | 0,142       | 0,134       | 0,077       |
|                  | 0,55        | 24,40       | 31,02       | 36,00       | 0,148       | 0,138       | 0,088       |
|                  | 0,60        | 19,51       | 24,81       | 30,00       | 0,153       | 0,142       | 0,094       |
|                  | 0,65        | 14,62       | 18,61       | 24,00       | 0,158       | 0,146       | 0,106       |
|                  | 0,70        | 9,73        | 12,41       | 18,30       | 0,163       | 0,151       | 0,112       |
|                  | 0,75        | 4,85        | 6,20        | 12,20       | 0,168       | 0,155       | 0,118       |
| 0,80             | 0,00        | 0,00        | 8,00        | 0,174       | 0,159       | 0,129       |             |
| 0,85             | -           | -           | 0,00        | -           | -           | 0,135       |             |
| 5,137 l/s        | 0,00        | 101,14      | 104,70      | 97,52       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 92,67       | 92,68       | 91,10       | 0,015       | 0,009       | 0,018       |
|                  | 0,10        | 84,20       | 80,65       | 85,00       | 0,035       | 0,012       | 0,037       |
|                  | 0,15        | 79,31       | 75,23       | 78,50       | 0,059       | 0,018       | 0,053       |
|                  | 0,20        | 74,43       | 69,81       | 66,50       | 0,079       | 0,029       | 0,077       |
|                  | 0,25        | 69,54       | 64,39       | 54,20       | 0,097       | 0,041       | 0,100       |
|                  | 0,30        | 64,65       | 58,97       | 48,50       | 0,115       | 0,059       | 0,114       |
|                  | 0,35        | 56,57       | 53,55       | 42,20       | 0,122       | 0,071       | 0,128       |
|                  | 0,40        | 47,00       | 43,10       | 36,10       | 0,129       | 0,088       | 0,141       |
|                  | 0,45        | 40,00       | 32,30       | 30,10       | 0,138       | 0,109       | 0,155       |
|                  | 0,50        | 32,50       | 21,40       | 24,00       | 0,146       | 0,118       | 0,169       |
|                  | 0,55        | 24,00       | 15,60       | 18,00       | 0,156       | 0,129       | 0,182       |
| 0,60             | 17,00       | 10,70       | 12,40       | 0,165       | 0,144       | 0,196       |             |

|                  |      |       |        |        |       |       |       |
|------------------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                  | 0,65 | 8,00  | 0,00   | 7,00   | 0,171 | 0,147 | 0,210 |
|                  | 0,70 | 0,00  | -      | 0,00   | 0,180 | -     | 0,224 |
|                  | 0,75 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
|                  | 0,80 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
|                  | 0,85 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 97,98 | 102,68 | 101,48 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 92,56 | 93,33  | 83,30  | 0,014 | 0,006 | 0,018 |
|                  | 0,10 | 87,14 | 83,98  | 65,12  | 0,040 | 0,024 | 0,037 |
|                  | 0,15 | 81,73 | 74,63  | 46,95  | 0,062 | 0,029 | 0,059 |
|                  | 0,20 | 73,83 | 63,52  | 41,59  | 0,081 | 0,041 | 0,079 |
|                  | 0,25 | 65,93 | 52,41  | 36,23  | 0,096 | 0,059 | 0,100 |
|                  | 0,30 | 58,03 | 41,30  | 30,86  | 0,103 | 0,077 | 0,121 |
|                  | 0,35 | 50,78 | 34,42  | 25,50  | 0,111 | 0,088 | 0,141 |
|                  | 0,40 | 43,52 | 27,53  | 21,86  | 0,120 | 0,100 | 0,153 |
|                  | 0,45 | 36,27 | 22,40  | 18,21  | 0,128 | 0,112 | 0,164 |
|                  | 0,50 | 29,02 | 19,60  | 14,57  | 0,137 | 0,129 | 0,175 |
|                  | 0,55 | 21,76 | 16,00  | 10,93  | 0,145 | 0,141 | 0,186 |
|                  | 0,60 | 14,51 | 14,00  | 7,50   | 0,154 | 0,153 | 0,198 |
|                  | 0,65 | 8,10  | 8,00   | 0,00   | 0,162 | 0,171 | 0,209 |
|                  | 0,70 | 0,00  | 0,00   | -      | 0,171 | 0,188 | -     |
|                  | 0,75 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
| 0,80             | -    | -     | -      | -      | -     | -     |       |
| 0,85             | -    | -     | -      | -      | -     | -     |       |

**Lampiran 13.** Tabel hasil perhitungan daya turbin (Watt) terhadap putaran variasi sudu dengan sudut *stagger* 27°

| <b>Kapasitas Aliran</b> | <b>Dead Weight</b> | <b>Putaran (rpm)</b>  |                       |                       | <b>Daya turbin (Watt)</b> |                       |                       |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                         |                    | <i>Clearance</i><br>3 | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 | <i>Clearance</i><br>3     | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 |
| <b>6,475 l/s</b>        | 0,00               | 83,00                 | 95,00                 | 85,00                 | 0,000                     | 0,000                 | 0,000                 |
|                         | 0,05               | 79,22                 | 88,91                 | 77,43                 | 0,134                     | 0,192                 | 0,148                 |
|                         | 0,10               | 75,44                 | 82,83                 | 69,85                 | 0,256                     | 0,352                 | 0,262                 |
|                         | 0,15               | 71,66                 | 70,65                 | 65,25                 | 0,364                     | 0,457                 | 0,368                 |
|                         | 0,20               | 67,88                 | 61,93                 | 60,64                 | 0,460                     | 0,496                 | 0,457                 |
|                         | 0,25               | 61,29                 | 53,20                 | 56,04                 | 0,578                     | 0,508                 | 0,528                 |
|                         | 0,30               | 54,71                 | 44,48                 | 51,43                 | 0,661                     | 0,493                 | 0,582                 |
|                         | 0,35               | 48,12                 | 35,75                 | 46,83                 | 0,709                     | 0,452                 | 0,618                 |
|                         | 0,40               | 41,54                 | 30,64                 | 42,23                 | 0,722                     | 0,415                 | 0,637                 |
|                         | 0,45               | 34,95                 | 25,54                 | 36,19                 | 0,700                     | 0,370                 | 0,569                 |
|                         | 0,50               | 29,13                 | 20,43                 | 30,16                 | 0,586                     | 0,315                 | 0,494                 |

|                  |      |        |        |       |       |       |       |
|------------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 0,55 | 23,30  | 15,32  | 24,13 | 0,471 | 0,250 | 0,410 |
|                  | 0,60 | 17,48  | 10,21  | 18,10 | 0,355 | 0,176 | 0,318 |
|                  | 0,65 | 11,65  | 7,30   | 12,05 | 0,238 | 0,133 | 0,221 |
|                  | 0,70 | 6,80   | 0,00   | 6,02  | 0,140 | -     | 0,114 |
|                  | 0,75 | 0,00   | -      | 0,00  | -     | -     | -     |
|                  | 0,80 | -      | -      | -     | -     | -     | -     |
|                  | 0,85 | -      | -      | -     | -     | -     | -     |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00 | 128,1  | 97,5   | 98,7  | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 112,0  | 91,6   | 92,8  | 0,221 | 0,186 | 0,057 |
|                  | 0,10 | 95,9   | 85,7   | 86,9  | 0,461 | 0,401 | 0,107 |
|                  | 0,15 | 79,8   | 79,8   | 81,1  | 0,594 | 0,580 | 0,150 |
|                  | 0,20 | 71,4   | 74,0   | 75,2  | 0,704 | 0,698 | 0,162 |
|                  | 0,25 | 63,1   | 68,3   | 68,2  | 0,754 | 0,791 | 0,168 |
|                  | 0,30 | 54,8   | 62,6   | 61,2  | 0,776 | 0,860 | 0,188 |
|                  | 0,35 | 46,4   | 56,9   | 54,2  | 0,758 | 0,806 | 0,234 |
|                  | 0,40 | 39,8   | 51,2   | 47,2  | 0,664 | 0,756 | 0,232 |
|                  | 0,45 | 33,2   | 38,4   | 41,9  | 0,565 | 0,614 | 0,258 |
|                  | 0,50 | 26,5   | 25,6   | 36,7  | 0,461 | 0,441 | 0,294 |
|                  | 0,55 | 19,9   | 12,8   | 31,4  | 0,353 | 0,244 | 0,290 |
|                  | 0,60 | 13,3   | 10,0   | 26,2  | 0,240 | 0,197 | 0,258 |
|                  | 0,65 | 6,6    | 8,4    | 21,0  | 0,122 | 0,171 | 0,232 |
|                  | 0,70 | 0,0    | 0,0    | 15,7  | 0,000 | 0,000 | 0,184 |
|                  | 0,75 | -      | -      | 10,5  | -     | -     | 0,136 |
|                  | 0,80 | -      | -      | 5,2   | -     | -     | 0,074 |
| 0,85             | -    | -      | 0,0    | -     | -     | 0,000 |       |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 102,00 | 108,50 | 97,00 | 0,000 | 0,000 | 0,00  |
|                  | 0,05 | 94,00  | 100,00 | 90,00 | 0,174 | 0,092 | 0,11  |
|                  | 0,10 | 87,00  | 92,00  | 83,50 | 0,348 | 0,227 | 0,15  |
|                  | 0,15 | 77,00  | 84,00  | 78,00 | 0,384 | 0,310 | 0,24  |
|                  | 0,20 | 70,50  | 76,00  | 71,00 | 0,434 | 0,375 | 0,31  |
|                  | 0,25 | 62,00  | 65,00  | 63,50 | 0,458 | 0,400 | 0,35  |
|                  | 0,30 | 55,00  | 59,00  | 58,00 | 0,440 | 0,436 | 0,39  |
|                  | 0,35 | 47,00  | 50,00  | 51,50 | 0,434 | 0,431 | 0,44  |
|                  | 0,40 | 39,50  | 42,50  | 45,00 | 0,414 | 0,419 | 0,44  |
|                  | 0,45 | 31,00  | 34,00  | 38,50 | 0,344 | 0,377 | 0,45  |
|                  | 0,50 | 23,50  | 27,00  | 32,00 | 0,290 | 0,333 | 0,41  |
|                  | 0,55 | 16,00  | 19,00  | 26,50 | 0,207 | 0,258 | 0,38  |
|                  | 0,60 | 7,70   | 9,20   | 22,00 | 0,109 | 0,136 | 0,35  |
|                  | 0,65 | 0,00   | 0,00   | 15,00 | 0,000 | 0,000 | 0,26  |
|                  | 0,70 | -      | -      | 11,00 | -     | -     | 0,20  |
| 0,75             | -    | -      | 7,00   | -     | -     | 0,14  |       |



|  |      |   |   |      |   |   |      |
|--|------|---|---|------|---|---|------|
|  | 0,80 | - | - | 0,00 | - | - | 0,00 |
|  | 0,85 | - | - | -    | - | - | -    |

**Lampiran 14.** Tabel hasil perhitungan daya turbin (Watt) terhadap putaran variasi sudu dengan sudut *stagger* 30°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran (rpm) |             |             | Daya Turbin (Watt) |             |             |
|------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3   | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3        | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 89,3          | 94,8        | 132,1       | 0,000              | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 84,6          | 87,3        | 115,8       | 0,172              | 0,161       | 0,238       |
|                  | 0,10        | 80,0          | 79,9        | 99,5        | 0,389              | 0,315       | 0,409       |
|                  | 0,15        | 76,6          | 72,5        | 84,0        | 0,595              | 0,447       | 0,519       |
|                  | 0,20        | 71,8          | 65,1        | 68,0        | 0,716              | 0,546       | 0,560       |
|                  | 0,25        | 61,2          | 57,7        | 51,7        | 0,661              | 0,640       | 0,532       |
|                  | 0,30        | 50,6          | 52,9        | 34,3        | 0,588              | 0,667       | 0,423       |
|                  | 0,35        | 40,0          | 48,0        | 30,0        | 0,542              | 0,680       | 0,402       |
|                  | 0,40        | 35,6          | 43,2        | 25,7        | 0,514              | 0,678       | 0,372       |
|                  | 0,45        | 31,1          | 38,3        | 21,4        | 0,477              | 0,661       | 0,333       |
|                  | 0,50        | 26,7          | 33,5        | 17,2        | 0,433              | 0,629       | 0,285       |
|                  | 0,55        | 22,2          | 26,8        | 14,0        | 0,381              | 0,551       | 0,248       |
|                  | 0,60        | 17,8          | 20,1        | 10,0        | 0,320              | 0,449       | 0,188       |
|                  | 0,65        | 14,0          | 14,0        | 8,0         | 0,265              | 0,332       | 0,159       |
|                  | 0,70        | 9,0           | 8,0         | 0,0         | 0,178              | 0,204       | 0,000       |
|                  | 0,75        | 7,0           | 0,0         | -           | 0,145              | 0,000       | -           |
| 0,80             | 0,0         | -             | -           | 0,000       | -                  | -           |             |
| 0,85             | -           | -             | -           | -           | -                  | -           |             |
| 5,137 l/s        | 0,00        | 99,6          | 101,3       | 99,5        | 0,000              | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 94,5          | 92,9        | 91,4        | 0,151              | 0,057       | 0,158       |
|                  | 0,10        | 89,5          | 84,6        | 83,4        | 0,386              | 0,156       | 0,370       |
|                  | 0,15        | 84,4          | 76,3        | 75,3        | 0,416              | 0,188       | 0,534       |
|                  | 0,20        | 76,7          | 69,6        | 67,3        | 0,520              | 0,215       | 0,663       |
|                  | 0,25        | 69,0          | 63,0        | 59,4        | 0,595              | 0,350       | 0,649       |
|                  | 0,30        | 61,4          | 56,4        | 51,4        | 0,605              | 0,417       | 0,618       |
|                  | 0,35        | 53,7          | 49,8        | 43,5        | 0,628              | 0,460       | 0,570       |
|                  | 0,40        | 46,0          | 43,2        | 35,6        | 0,623              | 0,506       | 0,526       |
|                  | 0,45        | 38,3          | 34,6        | 29,6        | 0,567              | 0,447       | 0,451       |
|                  | 0,50        | 25,6          | 25,9        | 23,7        | 0,409              | 0,375       | 0,370       |
|                  | 0,55        | 17,0          | 17,3        | 17,8        | 0,298              | 0,288       | 0,285       |
|                  | 0,60        | 11,0          | 8,6         | 11,9        | 0,197              | 0,162       | 0,195       |
| 0,65             | 0,00        | 0,00          | 5,9         | 0,000       | 0,000              | 0,100       |             |

|                  |      |       |       |      |       |       |       |
|------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                  | 0,70 | -     | -     | 0,0  | -     | -     | 0,000 |
|                  | 0,75 | -     | -     | -    | -     | -     | -     |
|                  | 0,80 | -     | -     | -    | -     | -     | -     |
|                  | 0,85 | -     | -     | -    | -     | -     | -     |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 104,1 | 100,5 | 97,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 97,5  | 95,6  | 85,5 | 0,180 | 0,024 | 0,105 |
|                  | 0,10 | 91,0  | 90,7  | 74,0 | 0,336 | 0,028 | 0,228 |
|                  | 0,15 | 85,0  | 85,8  | 62,6 | 0,471 | 0,053 | 0,343 |
|                  | 0,20 | 77,6  | 80,8  | 53,3 | 0,574 | 0,100 | 0,430 |
|                  | 0,25 | 71,0  | 75,9  | 44,1 | 0,656 | 0,234 | 0,434 |
|                  | 0,30 | 65,4  | 71,0  | 34,8 | 0,705 | 0,350 | 0,365 |
|                  | 0,35 | 59,9  | 64,1  | 25,6 | 0,738 | 0,395 | 0,323 |
|                  | 0,40 | 54,3  | 57,2  | 21,3 | 0,753 | 0,422 | 0,294 |
|                  | 0,45 | 45,3  | 50,2  | 17,0 | 0,639 | 0,464 | 0,255 |
|                  | 0,50 | 36,2  | 43,3  | 13,0 | 0,521 | 0,454 | 0,210 |
|                  | 0,55 | 27,2  | 36,1  | 10,3 | 0,397 | 0,467 | 0,178 |
|                  | 0,60 | 18,1  | 28,9  | 8,1  | 0,270 | 0,391 | 0,150 |
|                  | 0,65 | 9,1   | 21,7  | 0,0  | 0,137 | 0,307 | 0,000 |
|                  | 0,70 | 0,00  | 14,4  | -    | 0,000 | 0,222 | -     |
| 0,75             | -    | 8,60  | -     | -    | 0,143 | -     |       |
| 0,80             | -    | 0,00  | -     | -    | 0,000 | -     |       |
| 0,85             | -    | -     | -     | -    | -     | -     |       |

**Lampiran 15.** Tabel hasil perhitungan daya turbin terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut *stagger* 33°

| <b>Kapasitas Aliran</b> | Dead Weight | Putaran            |                    |                    | Daya Turbin (Watt) |                    |                    |
|-------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                         |             | <i>Clearance</i> 3 | <i>Clearance</i> 5 | <i>Clearance</i> 7 | <i>Clearance</i> 3 | <i>Clearance</i> 5 | <i>Clearance</i> 7 |
| <b>6,475 l/s</b>        | 0,00        | 100,88             | 94,75              | 93,50              | 0,000              | 0,000              | 0,000              |
|                         | 0,05        | 93,00              | 88,04              | 90,10              | 0,115              | 0,157              | 0,039              |
|                         | 0,10        | 85,13              | 81,33              | 83,40              | 0,288              | 0,361              | 0,041              |
|                         | 0,15        | 77,25              | 74,61              | 75,60              | 0,466              | 0,503              | 0,047              |
|                         | 0,20        | 69,38              | 67,90              | 67,30              | 0,598              | 0,627              | 0,083              |
|                         | 0,25        | 60,90              | 63,01              | 63,00              | 0,668              | 0,637              | 0,155              |
|                         | 0,30        | 52,43              | 58,11              | 59,00              | 0,662              | 0,637              | 0,182              |
|                         | 0,35        | 43,95              | 53,22              | 55,00              | 0,582              | 0,629              | 0,271              |
|                         | 0,40        | 39,06              | 48,32              | 50,50              | 0,539              | 0,613              | 0,311              |
|                         | 0,45        | 34,17              | 43,43              | 46,20              | 0,490              | 0,589              | 0,342              |
|                         | 0,50        | 29,29              | 37,22              | 43,00              | 0,436              | 0,521              | 0,344              |

|                  |      |        |        |        |       |       |       |
|------------------|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                  | 0,55 | 24,40  | 31,02  | 36,00  | 0,377 | 0,448 | 0,333 |
|                  | 0,60 | 19,51  | 24,81  | 30,00  | 0,312 | 0,369 | 0,296 |
|                  | 0,65 | 14,62  | 18,61  | 24,00  | 0,242 | 0,285 | 0,266 |
|                  | 0,70 | 9,73   | 12,41  | 18,30  | 0,166 | 0,195 | 0,214 |
|                  | 0,75 | 4,85   | 6,20   | 12,20  | 0,085 | 0,100 | 0,150 |
|                  | 0,80 | 0,00   | 0,00   | 8,00   | 0,000 | 0,000 | 0,108 |
|                  | 0,85 | -      | -      | 0,00   | -     | -     | 0,000 |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00 | 101,14 | 104,70 | 97,52  | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 92,67  | 92,68  | 91,10  | 0,143 | 0,086 | 0,168 |
|                  | 0,10 | 84,20  | 80,65  | 85,00  | 0,311 | 0,099 | 0,330 |
|                  | 0,15 | 79,31  | 75,23  | 78,50  | 0,489 | 0,139 | 0,435 |
|                  | 0,20 | 74,43  | 69,81  | 66,50  | 0,619 | 0,215 | 0,533 |
|                  | 0,25 | 69,54  | 64,39  | 54,20  | 0,707 | 0,278 | 0,568 |
|                  | 0,30 | 64,65  | 58,97  | 48,50  | 0,777 | 0,363 | 0,578 |
|                  | 0,35 | 56,57  | 53,55  | 42,20  | 0,725 | 0,396 | 0,563 |
|                  | 0,40 | 47,00  | 43,10  | 36,10  | 0,637 | 0,398 | 0,534 |
|                  | 0,45 | 40,00  | 32,30  | 30,10  | 0,579 | 0,368 | 0,488 |
|                  | 0,50 | 32,50  | 21,40  | 24,00  | 0,498 | 0,264 | 0,424 |
|                  | 0,55 | 24,00  | 15,60  | 18,00  | 0,392 | 0,211 | 0,344 |
|                  | 0,60 | 17,00  | 10,70  | 12,40  | 0,293 | 0,162 | 0,255 |
|                  | 0,65 | 8,00   | 0,00   | 7,00   | 0,143 | 0,000 | 0,154 |
|                  | 0,70 | 0,00   | -      | 0,00   | 0,000 | -     | 0,000 |
|                  | 0,75 | -      | -      | -      | -     | -     | -     |
|                  | 0,80 | -      | -      | -      | -     | -     | -     |
| 0,85             | -    | -      | -      | -      | -     | -     |       |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 97,98  | 102,68 | 101,48 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05 | 92,56  | 93,33  | 83,30  | 0,131 | 0,057 | 0,154 |
|                  | 0,10 | 87,14  | 83,98  | 65,12  | 0,365 | 0,207 | 0,254 |
|                  | 0,15 | 81,73  | 74,63  | 46,95  | 0,529 | 0,230 | 0,289 |
|                  | 0,20 | 73,83  | 63,52  | 41,59  | 0,628 | 0,274 | 0,346 |
|                  | 0,25 | 65,93  | 52,41  | 36,23  | 0,662 | 0,323 | 0,379 |
|                  | 0,30 | 58,03  | 41,30  | 30,86  | 0,626 | 0,331 | 0,390 |
|                  | 0,35 | 50,78  | 34,42  | 25,50  | 0,592 | 0,318 | 0,377 |
|                  | 0,40 | 43,52  | 27,53  | 21,86  | 0,546 | 0,288 | 0,349 |
|                  | 0,45 | 36,27  | 22,40  | 18,21  | 0,487 | 0,262 | 0,312 |
|                  | 0,50 | 29,02  | 19,60  | 14,57  | 0,416 | 0,266 | 0,267 |
|                  | 0,55 | 21,76  | 16,00  | 10,93  | 0,331 | 0,237 | 0,213 |
|                  | 0,60 | 14,51  | 14,00  | 7,50   | 0,234 | 0,224 | 0,155 |
|                  | 0,65 | 8,10   | 8,00   | 0,00   | 0,138 | 0,143 | 0,000 |

|  |      |      |      |   |       |       |   |
|--|------|------|------|---|-------|-------|---|
|  | 0,70 | 0,00 | 0,00 | - | 0,000 | 0,000 | - |
|  | 0,75 | -    | -    | - | -     | -     | - |
|  | 0,80 | -    | -    | - | -     | -     | - |
|  | 0,85 | -    | -    | - | -     | -     | - |

**Lampiran 16.** Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut stagger 27°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran     |             |             | Efisiensi   |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 83,00       | 95,00       | 85,00       | 0,00%       | 0,00%       | 0,00%       |
|                  | 0,05        | 79,22       | 88,91       | 77,43       | 0,76%       | 1,08%       | 0,83%       |
|                  | 0,10        | 75,44       | 82,83       | 69,85       | 1,44%       | 1,99%       | 1,48%       |
|                  | 0,15        | 71,66       | 70,65       | 65,25       | 2,06%       | 2,58%       | 2,08%       |
|                  | 0,20        | 67,88       | 61,93       | 60,64       | 2,60%       | 2,80%       | 2,58%       |
|                  | 0,25        | 61,29       | 53,20       | 56,04       | 3,26%       | 2,87%       | 2,98%       |
|                  | 0,30        | 54,71       | 44,48       | 51,43       | 3,73%       | 2,78%       | 3,29%       |
|                  | 0,35        | 48,12       | 35,75       | 46,83       | 4,00%       | 2,55%       | 3,49%       |
|                  | 0,40        | 41,54       | 30,64       | 42,23       | 4,07%       | 2,35%       | 3,60%       |
|                  | 0,45        | 34,95       | 25,54       | 36,19       | 3,95%       | 2,09%       | 3,21%       |
|                  | 0,50        | 29,13       | 20,43       | 30,16       | 3,31%       | 1,78%       | 2,79%       |
|                  | 0,55        | 23,30       | 15,32       | 24,13       | 2,66%       | 1,41%       | 2,32%       |
|                  | 0,60        | 17,48       | 10,21       | 18,10       | 2,01%       | 0,99%       | 1,79%       |
|                  | 0,65        | 11,65       | 7,30        | 12,05       | 1,34%       | 0,75%       | 1,25%       |
|                  | 0,70        | 6,80        | -           | 6,02        | 0,79%       | -           | 0,64%       |
|                  | 0,75        | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| 0,80             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| 0,85             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| 5,137 l/s        | 0,00        | 128,1       | 97,5        | 98,7        | 0,00%       | 0,00%       | 0,00%       |
|                  | 0,05        | 112,0       | 91,6        | 92,8        | 1,87%       | 1,58%       | 0,48%       |
|                  | 0,10        | 95,9        | 85,7        | 86,9        | 3,90%       | 3,40%       | 0,91%       |
|                  | 0,15        | 79,8        | 79,8        | 81,1        | 5,04%       | 4,91%       | 1,27%       |

|                  |      |        |        |       |       |       |       |
|------------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 0,20 | 71,4   | 74,0   | 75,2  | 5,97% | 5,91% | 1,37% |
|                  | 0,25 | 63,1   | 68,3   | 68,2  | 6,39% | 6,70% | 1,42% |
|                  | 0,30 | 54,8   | 62,6   | 61,2  | 6,58% | 7,29% | 1,60% |
|                  | 0,35 | 46,4   | 56,9   | 54,2  | 6,42% | 6,83% | 1,98% |
|                  | 0,40 | 39,8   | 51,2   | 47,2  | 5,62% | 6,41% | 1,97% |
|                  | 0,45 | 33,2   | 38,4   | 41,9  | 4,79% | 5,21% | 2,19% |
|                  | 0,50 | 26,5   | 25,6   | 36,7  | 3,91% | 3,74% | 2,49% |
|                  | 0,55 | 19,9   | 12,8   | 31,4  | 2,99% | 2,07% | 2,46% |
|                  | 0,60 | 13,3   | 10,0   | 26,2  | 2,03% | 1,67% | 2,19% |
|                  | 0,65 | 6,6    | 8,4    | 21,0  | 1,04% | 1,45% | 1,97% |
|                  | 0,70 | 0,0    | 0,0    | 15,7  | 0,00% | 0,00% | 1,56% |
|                  | 0,75 | -      | -      | 10,5  | -     | -     | 1,15% |
|                  | 0,80 | -      | -      | 5,2   | -     | -     | 0,63% |
|                  | 0,85 | -      | -      | 0,0   | -     | -     | -     |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 102,00 | 108,50 | 97,00 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
|                  | 0,05 | 94,00  | 100,00 | 90,00 | 2,11% | 1,12% | 1,35% |
|                  | 0,10 | 87,00  | 92,00  | 83,50 | 4,24% | 2,76% | 1,88% |
|                  | 0,15 | 77,00  | 84,00  | 78,00 | 4,67% | 3,78% | 2,92% |
|                  | 0,20 | 70,50  | 76,00  | 71,00 | 5,28% | 4,56% | 3,72% |
|                  | 0,25 | 62,00  | 65,00  | 63,50 | 5,58% | 4,87% | 4,28% |
|                  | 0,30 | 55,00  | 59,00  | 58,00 | 5,36% | 5,31% | 4,78% |
|                  | 0,35 | 47,00  | 50,00  | 51,50 | 5,28% | 5,25% | 5,40% |
|                  | 0,40 | 39,50  | 42,50  | 45,00 | 5,03% | 5,10% | 5,40% |
|                  | 0,45 | 31,00  | 34,00  | 38,50 | 4,18% | 4,59% | 5,48% |
|                  | 0,50 | 23,50  | 27,00  | 32,00 | 3,52% | 4,05% | 5,04% |
|                  | 0,55 | 16,00  | 19,00  | 26,50 | 2,52% | 3,13% | 4,57% |
|                  | 0,60 | 7,70   | 9,20   | 22,00 | 1,33% | 1,65% | 4,29% |
|                  | 0,65 | 0,00   | 0,00   | 15,00 | 0,00% | 0,00% | 3,15% |
|                  | 0,70 | -      | -      | 11,00 | -     | -     | 2,47% |
| 0,75             | -    | -      | 7,00   | -     | -     | 1,73% |       |

|  |      |   |   |      |   |   |       |
|--|------|---|---|------|---|---|-------|
|  | 0,80 | - | - | 0,00 | - | - | 0,00% |
|  | 0,85 | - | - | -    | - | - | -     |

**Lampiran 17.** Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran (rpm) variasi sudu dengan sudut *stagger* 30°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran     |             |             | Efisiensi   |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |             | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
| <b>6,475 l/s</b> | 0,00        | 89,3        | 94,8        | 132,1       | 0,00%       | 0,00%       | 0,00%       |
|                  | 0,05        | 84,6        | 87,3        | 115,8       | 0,97%       | 0,91%       | 1,35%       |
|                  | 0,10        | 80,0        | 79,9        | 99,5        | 2,20%       | 1,78%       | 2,31%       |
|                  | 0,15        | 76,6        | 72,5        | 84,0        | 3,36%       | 2,52%       | 2,93%       |
|                  | 0,20        | 71,8        | 65,1        | 68,0        | 4,04%       | 3,08%       | 3,16%       |
|                  | 0,25        | 61,2        | 57,7        | 51,7        | 3,73%       | 3,61%       | 3,00%       |
|                  | 0,30        | 50,6        | 52,9        | 34,3        | 3,32%       | 3,77%       | 2,39%       |
|                  | 0,35        | 40,0        | 48,0        | 30,0        | 3,06%       | 3,84%       | 2,27%       |
|                  | 0,40        | 35,6        | 43,2        | 25,7        | 2,90%       | 3,83%       | 2,10%       |
|                  | 0,45        | 31,1        | 38,3        | 21,4        | 2,69%       | 3,73%       | 1,88%       |
|                  | 0,50        | 26,7        | 33,5        | 17,2        | 2,44%       | 3,55%       | 1,61%       |
|                  | 0,55        | 22,2        | 26,8        | 14,0        | 2,15%       | 3,11%       | 1,40%       |
|                  | 0,60        | 17,8        | 20,1        | 10,0        | 1,81%       | 2,53%       | 1,06%       |
|                  | 0,65        | 14,0        | 14,0        | 8,0         | 1,50%       | 1,87%       | 0,90%       |
|                  | 0,70        | 9,0         | 8,0         | 0,0         | 1,01%       | 1,15%       | 0,00%       |
|                  | 0,75        | 7,0         | 0,0         | -           | 0,82%       | 0,00%       | -           |
| 0,80             | 0,0         | -           | -           | 0,00%       | -           | -           |             |
| 0,85             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00        | 99,6        | 101,3       | 99,5        | 0,00%       | 0,00%       | 0,00%       |
|                  | 0,05        | 94,5        | 92,9        | 91,4        | 1,28%       | 0,49%       | 1,34%       |
|                  | 0,10        | 89,5        | 84,6        | 83,4        | 3,27%       | 1,32%       | 3,13%       |
|                  | 0,15        | 84,4        | 76,3        | 75,3        | 3,52%       | 1,59%       | 4,52%       |
|                  | 0,20        | 76,7        | 69,6        | 67,3        | 4,40%       | 1,82%       | 5,62%       |

|                  |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 0,25 | 69,0  | 63,0  | 59,4  | 5,05% | 2,96% | 5,50% |
|                  | 0,30 | 61,4  | 56,4  | 51,4  | 5,12% | 3,54% | 5,24% |
|                  | 0,35 | 53,7  | 49,8  | 43,5  | 5,32% | 3,90% | 4,83% |
|                  | 0,40 | 46,0  | 43,2  | 35,6  | 5,28% | 4,29% | 4,46% |
|                  | 0,45 | 38,3  | 34,6  | 29,6  | 4,80% | 3,79% | 3,82% |
|                  | 0,50 | 25,6  | 25,9  | 23,7  | 3,47% | 3,18% | 3,14% |
|                  | 0,55 | 17,0  | 17,3  | 17,8  | 2,53% | 2,44% | 2,42% |
|                  | 0,60 | 11,0  | 8,6   | 11,9  | 1,67% | 1,38% | 1,65% |
|                  | 0,65 | 0,00  | 0,00  | 5,9   | 0,00% | 0,00% | 0,85% |
|                  | 0,70 |       |       | 0,0   |       |       | 0,00% |
|                  | 0,75 |       |       |       |       |       |       |
|                  | 0,80 |       |       |       |       |       |       |
|                  | 0,85 |       |       |       |       |       |       |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 104,1 | 100,5 | 97,0  | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
|                  | 0,05 | 97,5  | 95,6  | 85,5  | 2,19% | 0,29% | 1,28% |
|                  | 0,10 | 91,0  | 90,7  | 74,0  | 4,09% | 0,34% | 2,77% |
|                  | 0,15 | 85,0  | 85,8  | 62,6  | 5,73% | 0,64% | 4,17% |
|                  | 0,20 | 77,6  | 80,8  | 53,3  | 6,98% | 1,21% | 5,23% |
|                  | 0,25 | 71,0  | 75,9  | 44,1  | 7,98% | 2,84% | 5,28% |
|                  | 0,30 | 65,4  | 71,0  | 34,8  | 8,58% | 4,26% | 4,43% |
|                  | 0,35 | 59,9  | 64,1  | 25,6  | 8,97% | 4,80% | 3,93% |
|                  | 0,40 | 54,3  | 57,2  | 21,3  | 9,16% | 5,14% | 3,57% |
|                  | 0,45 | 45,3  | 50,2  | 17,0  | 7,78% | 5,65% | 3,10% |
|                  | 0,50 | 36,2  | 43,3  | 13,0  | 6,33% | 5,52% | 2,55% |
|                  | 0,55 | 27,2  | 36,1  | 10,3  | 4,84% | 5,68% | 2,17% |
|                  | 0,60 | 18,1  | 28,9  | 8,1   | 3,28% | 4,76% | 1,82% |
|                  | 0,65 | 9,1   | 21,7  | 0,0   | 1,67% | 3,73% | 0,00% |
|                  | 0,70 | 0,00  | 14,4  |       | 0,00% | 2,71% | 0,00% |
| 0,75             |      | 8,60  |       | 0,00% | 1,74% | 0,00% |       |
| 0,80             |      | 0,00  |       | 0,00% | 0,00% | 0,00% |       |

|  |      |  |  |  |  |  |  |
|--|------|--|--|--|--|--|--|
|  | 0,85 |  |  |  |  |  |  |
|--|------|--|--|--|--|--|--|

**Lampiran 18.** Tabel hasil perhitungan efisiensi terhadap putaran variasi sudu dengan sudut *stagger* 33°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Putaran        |                |                | Efisiensi      |                |                |
|------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  |             | Clearance<br>3 | Clearance<br>5 | Clearance<br>7 | Clearance<br>3 | Clearance<br>5 | Clearance<br>7 |
| 6,475 l/s        | 0,00        | 100,88         | 94,75          | 93,50          | 0,00%          | 0,00%          | 0,00%          |
|                  | 0,05        | 93,00          | 88,04          | 90,10          | 0,65%          | 0,89%          | 0,22%          |
|                  | 0,10        | 85,13          | 81,33          | 83,40          | 1,63%          | 2,04%          | 0,23%          |
|                  | 0,15        | 77,25          | 74,61          | 75,60          | 2,63%          | 2,84%          | 0,26%          |
|                  | 0,20        | 69,38          | 67,90          | 67,30          | 3,38%          | 3,54%          | 0,47%          |
|                  | 0,25        | 60,90          | 63,01          | 63,00          | 3,77%          | 3,59%          | 0,88%          |
|                  | 0,30        | 52,43          | 58,11          | 59,00          | 3,74%          | 3,60%          | 1,03%          |
|                  | 0,35        | 43,95          | 53,22          | 55,00          | 3,29%          | 3,55%          | 1,53%          |
|                  | 0,40        | 39,06          | 48,32          | 50,50          | 3,04%          | 3,46%          | 1,76%          |
|                  | 0,45        | 34,17          | 43,43          | 46,20          | 2,77%          | 3,32%          | 1,93%          |
|                  | 0,50        | 29,29          | 37,22          | 43,00          | 2,46%          | 2,94%          | 1,94%          |
|                  | 0,55        | 24,40          | 31,02          | 36,00          | 2,13%          | 2,53%          | 1,88%          |
|                  | 0,60        | 19,51          | 24,81          | 30,00          | 1,76%          | 2,08%          | 1,67%          |
|                  | 0,65        | 14,62          | 18,61          | 24,00          | 1,37%          | 1,61%          | 1,50%          |
|                  | 0,70        | 9,73           | 12,41          | 18,30          | 0,94%          | 1,10%          | 1,21%          |
|                  | 0,75        | 4,85           | 6,20           | 12,20          | 0,48%          | 0,57%          | 0,85%          |
| 0,80             | 0,00        | 0,00           | 8,00           | 0,00%          | 0,00%          | 0,61%          |                |
| 0,85             |             |                | 0,00           | 0,00%          | 0,00%          | 0,00%          |                |
| 5,137 l/s        | 0,00        | 101,14         | 104,70         | 97,52          | 0,00%          | 0,00%          | 0,00%          |
|                  | 0,05        | 92,67          | 92,68          | 91,10          | 1,21%          | 0,73%          | 1,43%          |
|                  | 0,10        | 84,20          | 80,65          | 85,00          | 2,64%          | 0,84%          | 2,80%          |
|                  | 0,15        | 79,31          | 75,23          | 78,50          | 4,14%          | 1,18%          | 3,69%          |
|                  | 0,20        | 74,43          | 69,81          | 66,50          | 5,25%          | 1,82%          | 4,51%          |
|                  | 0,25        | 69,54          | 64,39          | 54,20          | 5,99%          | 2,35%          | 4,81%          |
|                  | 0,30        | 64,65          | 58,97          | 48,50          | 6,58%          | 3,08%          | 4,90%          |



|                  |      |       |        |        |       |       |       |
|------------------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                  | 0,35 | 56,57 | 53,55  | 42,20  | 6,14% | 3,35% | 4,77% |
|                  | 0,40 | 47,00 | 43,10  | 36,10  | 5,40% | 3,38% | 4,52% |
|                  | 0,45 | 40,00 | 32,30  | 30,10  | 4,91% | 3,12% | 4,14% |
|                  | 0,50 | 32,50 | 21,40  | 24,00  | 4,22% | 2,23% | 3,59% |
|                  | 0,55 | 24,00 | 15,60  | 18,00  | 3,32% | 1,79% | 2,91% |
|                  | 0,60 | 17,00 | 10,70  | 12,40  | 2,49% | 1,37% | 2,16% |
|                  | 0,65 | 8,00  | 0,00   | 7,00   | 1,21% | 0,00% | 1,30% |
|                  | 0,70 | 0,00  | -      | 0,00   | 0,00% | -     | 0,00% |
|                  | 0,75 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
|                  | 0,80 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
|                  | 0,85 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
| <b>4,313 l/s</b> | 0,00 | 97,98 | 102,68 | 101,48 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
|                  | 0,05 | 92,56 | 93,33  | 83,30  | 1,60% | 0,70% | 1,87% |
|                  | 0,10 | 87,14 | 83,98  | 65,12  | 4,44% | 2,52% | 3,09% |
|                  | 0,15 | 81,73 | 74,63  | 46,95  | 6,43% | 2,80% | 3,52% |
|                  | 0,20 | 73,83 | 63,52  | 41,59  | 7,64% | 3,33% | 4,21% |
|                  | 0,25 | 65,93 | 52,41  | 36,23  | 8,05% | 3,93% | 4,62% |
|                  | 0,30 | 58,03 | 41,30  | 30,86  | 7,61% | 4,02% | 4,74% |
|                  | 0,35 | 50,78 | 34,42  | 25,50  | 7,21% | 3,87% | 4,59% |
|                  | 0,40 | 43,52 | 27,53  | 21,86  | 6,65% | 3,51% | 4,25% |
|                  | 0,45 | 36,27 | 22,40  | 18,21  | 5,93% | 3,19% | 3,80% |
|                  | 0,50 | 29,02 | 19,60  | 14,57  | 5,06% | 3,23% | 3,25% |
|                  | 0,55 | 21,76 | 16,00  | 10,93  | 4,03% | 2,88% | 2,59% |
|                  | 0,60 | 14,51 | 14,00  | 7,50   | 2,84% | 2,73% | 1,89% |
|                  | 0,65 | 8,10  | 8,00   | 0,00   | 1,67% | 1,74% | 0,00% |
|                  | 0,70 | 0,00  | 0,00   | -      | 0,00% | 0,00% | -     |
|                  | 0,75 | -     | -      | -      | -     | -     | -     |
| 0,80             | -    | -     | -      | -      | -     | -     |       |
| 0,85             | -    | -     | -      | -      | -     | -     |       |

**Lampiran 19** Tabel hasil perhitungan *coefficient power* terhadap TSR variasi sudu dengan sudut *stagger* 27°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i> |                       |                       | <i>Coefficient Power</i> |                       |                       |
|------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  |             | <i>Clearance</i><br>3        | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 | <i>Clearance</i><br>3    | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 |
| <b>6,475 l/s</b> | 0,00        | 3,787                        | 4,334                 | 3,878                 | 0,0000                   | 0,0000                | 0,0000                |
|                  | 0,05        | 3,614                        | 4,057                 | 3,533                 | 0,0076                   | 0,0108                | 0,0083                |
|                  | 0,10        | 3,442                        | 3,779                 | 3,187                 | 0,0144                   | 0,0199                | 0,0148                |
|                  | 0,15        | 3,269                        | 3,223                 | 2,977                 | 0,0206                   | 0,0258                | 0,0208                |
|                  | 0,20        | 3,097                        | 2,825                 | 2,767                 | 0,0260                   | 0,0280                | 0,0258                |
|                  | 0,25        | 2,796                        | 2,427                 | 2,557                 | 0,0326                   | 0,0287                | 0,0298                |
|                  | 0,30        | 2,496                        | 2,029                 | 2,347                 | 0,0373                   | 0,0278                | 0,0329                |
|                  | 0,35        | 2,196                        | 1,631                 | 2,137                 | 0,0400                   | 0,0255                | 0,0349                |
|                  | 0,40        | 1,895                        | 1,398                 | 1,927                 | 0,0407                   | 0,0235                | 0,0360                |
|                  | 0,45        | 1,595                        | 1,165                 | 1,651                 | 0,0395                   | 0,0209                | 0,0321                |
|                  | 0,50        | 1,329                        | 0,932                 | 1,376                 | 0,0331                   | 0,0178                | 0,0279                |
|                  | 0,55        | 1,063                        | 0,699                 | 1,101                 | 0,0266                   | 0,0141                | 0,0232                |
|                  | 0,60        | 0,797                        | 0,466                 | 0,826                 | 0,0201                   | 0,0099                | 0,0179                |
|                  | 0,65        | 0,532                        | 0,333                 | 0,550                 | 0,0134                   | 0,0075                | 0,0125                |
|                  | 0,70        | 0,310                        | -                     | 0,275                 | 0,0079                   | -                     | 0,0064                |
|                  | 0,75        | -                            | -                     | -                     | -                        | -                     | -                     |
| 0,80             | -           | -                            | -                     | -                     | -                        | -                     |                       |
| 0,85             | -           | -                            | -                     | -                     | -                        | -                     |                       |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00        | 6,193                        | 4,711                 | 4,771                 | 0,000                    | 0,000                 | 0,000                 |
|                  | 0,05        | 5,414                        | 4,426                 | 4,487                 | 0,019                    | 0,016                 | 0,005                 |
|                  | 0,10        | 4,635                        | 4,141                 | 4,203                 | 0,039                    | 0,034                 | 0,009                 |
|                  | 0,15        | 3,856                        | 3,856                 | 3,918                 | 0,050                    | 0,049                 | 0,013                 |
|                  | 0,20        | 3,453                        | 3,579                 | 3,634                 | 0,060                    | 0,059                 | 0,014                 |
|                  | 0,25        | 3,050                        | 3,302                 | 3,296                 | 0,064                    | 0,067                 | 0,014                 |
|                  | 0,30        | 2,647                        | 3,026                 | 2,957                 | 0,066                    | 0,073                 | 0,016                 |
|                  | 0,35        | 2,244                        | 2,749                 | 2,618                 | 0,064                    | 0,068                 | 0,020                 |
|                  | 0,40        | 1,924                        | 2,473                 | 2,279                 | 0,056                    | 0,064                 | 0,020                 |

|           |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0,45 | 1,603 | 1,855 | 2,026 | 0,048 | 0,052 | 0,022 |
|           | 0,50 | 1,283 | 1,236 | 1,773 | 0,039 | 0,037 | 0,025 |
|           | 0,55 | 0,962 | 0,618 | 1,520 | 0,030 | 0,021 | 0,025 |
|           | 0,60 | 0,641 | 0,483 | 1,266 | 0,020 | 0,017 | 0,022 |
|           | 0,65 | 0,321 | 0,406 | 1,013 | 0,010 | 0,014 | 0,020 |
|           | 0,70 | 0,000 | 0,000 | 0,760 | 0,000 | 0,000 | 0,016 |
|           | 0,75 | -     | -     | 0,507 | -     | -     | 0,011 |
|           | 0,80 | -     | -     | 0,253 | -     | -     | 0,006 |
|           | 0,85 | -     | -     | 0,000 | -     | -     | 0,000 |
| 4,313 l/s | 0,00 | 4,875 | 5,186 | 4,636 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|           | 0,05 | 4,493 | 4,779 | 4,301 | 0,021 | 0,011 | 0,013 |
|           | 0,10 | 4,158 | 4,397 | 3,991 | 0,042 | 0,028 | 0,019 |
|           | 0,15 | 3,680 | 4,015 | 3,728 | 0,047 | 0,038 | 0,029 |
|           | 0,20 | 3,369 | 3,632 | 3,393 | 0,053 | 0,046 | 0,037 |
|           | 0,25 | 2,963 | 3,107 | 3,035 | 0,056 | 0,049 | 0,043 |
|           | 0,30 | 2,629 | 2,820 | 2,772 | 0,054 | 0,053 | 0,048 |
|           | 0,35 | 2,246 | 2,390 | 2,461 | 0,053 | 0,052 | 0,054 |
|           | 0,40 | 1,888 | 2,031 | 2,151 | 0,050 | 0,051 | 0,054 |
|           | 0,45 | 1,482 | 1,625 | 1,840 | 0,042 | 0,046 | 0,055 |
|           | 0,50 | 1,123 | 1,290 | 1,529 | 0,035 | 0,040 | 0,050 |
|           | 0,55 | 0,765 | 0,908 | 1,267 | 0,025 | 0,031 | 0,046 |
|           | 0,60 | 0,368 | 0,440 | 1,051 | 0,013 | 0,017 | 0,043 |
|           | 0,65 | 0,000 | 0,000 | 0,717 | 0,000 | 0,000 | 0,031 |
|           | 0,70 | -     | -     | 0,526 | -     | -     | 0,025 |
|           | 0,75 | -     | -     | 0,335 | -     | -     | 0,017 |
| 0,80      | -    | -     | 0,000 | -     | -     | 0,000 |       |
| 0,85      | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |

**Lampiran 20.** Tabel hasil perhitungan *coefficient power* terhadap TSR variasi sudut dengan sudut *stagger* 30°

|  |  | <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i> | <i>coefficient power</i> |
|--|--|------------------------------|--------------------------|
|--|--|------------------------------|--------------------------|

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 | Clearance 3 | Clearance 5 | Clearance 7 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>6,475 l/s</b> | 0,00        | 4,074       | 4,323       | 6,027       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 3,860       | 3,985       | 5,284       | 0,010       | 0,009       | 0,013       |
|                  | 0,10        | 3,650       | 3,647       | 4,540       | 0,022       | 0,018       | 0,023       |
|                  | 0,15        | 3,495       | 3,309       | 3,833       | 0,034       | 0,025       | 0,029       |
|                  | 0,20        | 3,274       | 2,971       | 3,103       | 0,040       | 0,031       | 0,032       |
|                  | 0,25        | 2,791       | 2,633       | 2,359       | 0,037       | 0,036       | 0,030       |
|                  | 0,30        | 2,308       | 2,411       | 1,565       | 0,033       | 0,038       | 0,024       |
|                  | 0,35        | 1,825       | 2,190       | 1,369       | 0,031       | 0,038       | 0,023       |
|                  | 0,40        | 1,622       | 1,969       | 1,174       | 0,029       | 0,038       | 0,021       |
|                  | 0,45        | 1,420       | 1,747       | 0,978       | 0,027       | 0,037       | 0,019       |
|                  | 0,50        | 1,217       | 1,526       | 0,782       | 0,024       | 0,035       | 0,016       |
|                  | 0,55        | 1,014       | 1,221       | 0,639       | 0,021       | 0,031       | 0,014       |
|                  | 0,60        | 0,811       | 0,916       | 0,456       | 0,018       | 0,025       | 0,011       |
|                  | 0,65        | 0,639       | 0,639       | 0,365       | 0,015       | 0,019       | 0,009       |
|                  | 0,70        | 0,411       | 0,365       | 0,000       | 0,010       | 0,012       | 0,000       |
|                  | 0,75        | 0,319       | 0,000       | -           | 0,008       | 0,000       | -           |
| 0,80             | 0,000       | -           | -           | 0,000       | -           | -           |             |
| 0,85             | -           | -           | -           | -           | -           | -           |             |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00        | 4,815       | 4,896       | 4,809       | 0,000       | 0,000       | 0,000       |
|                  | 0,05        | 4,570       | 4,493       | 4,420       | 0,013       | 0,005       | 0,013       |
|                  | 0,10        | 4,324       | 4,090       | 4,031       | 0,033       | 0,013       | 0,031       |
|                  | 0,15        | 4,079       | 3,686       | 3,643       | 0,035       | 0,016       | 0,045       |
|                  | 0,20        | 3,708       | 3,367       | 3,254       | 0,044       | 0,018       | 0,056       |
|                  | 0,25        | 3,337       | 3,048       | 2,870       | 0,050       | 0,030       | 0,055       |
|                  | 0,30        | 2,966       | 2,728       | 2,487       | 0,051       | 0,035       | 0,052       |
|                  | 0,35        | 2,595       | 2,409       | 2,103       | 0,053       | 0,039       | 0,048       |
|                  | 0,40        | 2,224       | 2,090       | 1,720       | 0,053       | 0,043       | 0,045       |
|                  | 0,45        | 1,853       | 1,672       | 1,433       | 0,048       | 0,038       | 0,038       |
|                  | 0,50        | 1,235       | 1,254       | 1,147       | 0,035       | 0,032       | 0,031       |

|           |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0,55 | 0,822 | 0,836 | 0,860 | 0,025 | 0,024 | 0,024 |
|           | 0,60 | 0,532 | 0,418 | 0,573 | 0,017 | 0,014 | 0,017 |
|           | 0,65 | 0,000 | 0,000 | 0,287 | 0,000 | 0,000 | 0,008 |
|           | 0,70 | -     | -     | 0,000 | -     | -     | 0,000 |
|           | 0,75 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|           | 0,80 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|           | 0,85 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 4,313 l/s | 0,00 | 4,973 | 4,805 | 4,635 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|           | 0,05 | 4,660 | 4,569 | 4,087 | 0,022 | 0,003 | 0,013 |
|           | 0,10 | 4,349 | 4,334 | 3,539 | 0,041 | 0,003 | 0,028 |
|           | 0,15 | 4,062 | 4,098 | 2,991 | 0,057 | 0,006 | 0,042 |
|           | 0,20 | 3,709 | 3,863 | 2,548 | 0,070 | 0,012 | 0,052 |
|           | 0,25 | 3,392 | 3,628 | 2,106 | 0,080 | 0,028 | 0,053 |
|           | 0,30 | 3,127 | 3,392 | 1,663 | 0,086 | 0,043 | 0,044 |
|           | 0,35 | 2,862 | 3,062 | 1,221 | 0,090 | 0,048 | 0,039 |
|           | 0,40 | 2,596 | 2,731 | 1,018 | 0,092 | 0,051 | 0,036 |
|           | 0,45 | 2,164 | 2,401 | 0,814 | 0,078 | 0,056 | 0,031 |
|           | 0,50 | 1,731 | 2,071 | 0,621 | 0,063 | 0,055 | 0,026 |
|           | 0,55 | 1,298 | 1,726 | 0,492 | 0,048 | 0,057 | 0,022 |
|           | 0,60 | 0,865 | 1,380 | 0,387 | 0,033 | 0,048 | 0,018 |
|           | 0,65 | 0,433 | 1,035 | 0,000 | 0,017 | 0,037 | 0,000 |
|           | 0,70 | 0,000 | 0,690 | -     | 0,000 | 0,027 | -     |
|           | 0,75 | -     | 0,411 | -     | -     | 0,017 | -     |
| 0,80      | -    | 0,000 | -     | -     | 0,000 | -     |       |
| 0,85      | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |

**Lampiran 21.** Tabel hasil perhitungan *coefficient power* terhadap TSR variasi sudu dengan sudut *stagger* 33°

| Kapasitas Aliran | Dead Weight | <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i> |                       |                       | <i>coefficient power</i> |                       |                       |
|------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  |             | <i>Clearance</i><br>3        | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 | <i>Clearance</i><br>3    | <i>Clearance</i><br>5 | <i>Clearance</i><br>7 |

|                  |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>6,475 l/s</b> | 0,00  | 4,603 | 4,323 | 4,266 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05  | 4,243 | 4,017 | 4,111 | 0,006 | 0,009 | 0,002 |
|                  | 0,10  | 3,884 | 3,711 | 3,805 | 0,016 | 0,020 | 0,002 |
|                  | 0,15  | 3,525 | 3,404 | 3,449 | 0,026 | 0,028 | 0,003 |
|                  | 0,20  | 3,165 | 3,098 | 3,071 | 0,034 | 0,035 | 0,005 |
|                  | 0,25  | 2,779 | 2,875 | 2,874 | 0,038 | 0,036 | 0,009 |
|                  | 0,30  | 2,392 | 2,651 | 2,692 | 0,037 | 0,036 | 0,010 |
|                  | 0,35  | 2,005 | 2,428 | 2,509 | 0,033 | 0,036 | 0,015 |
|                  | 0,40  | 1,782 | 2,205 | 2,304 | 0,030 | 0,035 | 0,018 |
|                  | 0,45  | 1,559 | 1,981 | 2,108 | 0,028 | 0,033 | 0,019 |
|                  | 0,50  | 1,336 | 1,698 | 1,962 | 0,025 | 0,029 | 0,019 |
|                  | 0,55  | 1,113 | 1,415 | 1,643 | 0,021 | 0,025 | 0,019 |
|                  | 0,60  | 0,890 | 1,132 | 1,369 | 0,018 | 0,021 | 0,017 |
|                  | 0,65  | 0,667 | 0,849 | 1,095 | 0,014 | 0,016 | 0,015 |
|                  | 0,70  | 0,444 | 0,566 | 0,835 | 0,009 | 0,011 | 0,012 |
|                  | 0,75  | 0,221 | 0,283 | 0,557 | 0,005 | 0,006 | 0,008 |
| 0,80             | 0,000 | 0,000 | 0,365 | 0,000 | 0,000 | 0,006 |       |
| 0,85             | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |       |
| <b>5,137 l/s</b> | 0,00  | 4,889 | 5,062 | 4,715 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|                  | 0,05  | 4,480 | 4,480 | 4,404 | 0,012 | 0,007 | 0,014 |
|                  | 0,10  | 4,071 | 3,899 | 4,109 | 0,026 | 0,008 | 0,028 |
|                  | 0,15  | 3,834 | 3,637 | 3,795 | 0,041 | 0,012 | 0,037 |
|                  | 0,20  | 3,598 | 3,375 | 3,215 | 0,052 | 0,018 | 0,045 |
|                  | 0,25  | 3,362 | 3,113 | 2,620 | 0,060 | 0,024 | 0,048 |
|                  | 0,30  | 3,125 | 2,851 | 2,345 | 0,066 | 0,031 | 0,049 |
|                  | 0,35  | 2,735 | 2,589 | 2,040 | 0,061 | 0,034 | 0,048 |
|                  | 0,40  | 2,272 | 2,084 | 1,745 | 0,054 | 0,034 | 0,045 |
|                  | 0,45  | 1,934 | 1,562 | 1,455 | 0,049 | 0,031 | 0,041 |
|                  | 0,50  | 1,571 | 1,035 | 1,160 | 0,042 | 0,022 | 0,036 |
| 0,55             | 1,160 | 0,754 | 0,870 | 0,033 | 0,018 | 0,029 |       |

|           |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0,60 | 0,822 | 0,517 | 0,599 | 0,025 | 0,014 | 0,022 |
|           | 0,65 | 0,387 | 0,000 | 0,338 | 0,012 | 0,000 | 0,013 |
|           | 0,70 | 0,000 | -     | 0,000 | 0,000 | -     | 0,000 |
|           | 0,75 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|           | 0,80 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|           | 0,85 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 4,313 l/s | 0,00 | 4,683 | 4,907 | 4,850 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
|           | 0,05 | 4,424 | 4,460 | 3,981 | 0,016 | 0,007 | 0,019 |
|           | 0,10 | 4,165 | 4,014 | 3,112 | 0,044 | 0,025 | 0,031 |
|           | 0,15 | 3,906 | 3,567 | 2,244 | 0,064 | 0,028 | 0,035 |
|           | 0,20 | 3,528 | 3,036 | 1,988 | 0,076 | 0,033 | 0,042 |
|           | 0,25 | 3,151 | 2,505 | 1,731 | 0,081 | 0,039 | 0,046 |
|           | 0,30 | 2,774 | 1,974 | 1,475 | 0,076 | 0,040 | 0,047 |
|           | 0,35 | 2,427 | 1,645 | 1,219 | 0,072 | 0,039 | 0,046 |
|           | 0,40 | 2,080 | 1,316 | 1,045 | 0,066 | 0,035 | 0,042 |
|           | 0,45 | 1,733 | 1,071 | 0,871 | 0,059 | 0,032 | 0,038 |
|           | 0,50 | 1,387 | 0,937 | 0,696 | 0,051 | 0,032 | 0,033 |
|           | 0,55 | 1,040 | 0,765 | 0,522 | 0,040 | 0,029 | 0,026 |
|           | 0,60 | 0,693 | 0,669 | 0,358 | 0,028 | 0,027 | 0,019 |
|           | 0,65 | 0,387 | 0,382 | 0,000 | 0,017 | 0,017 | 0,000 |
|           | 0,70 | 0,000 | 0,000 | -     | 0,000 | 0,000 | -     |
|           | 0,75 | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 0,80      | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |
| 0,85      | -    | -     | -     | -     | -     | -     |       |

**Lampiran 22.** Sudu turbin vortex skala laboratorium variasi sudut *stagger* 27°, 30°, 33°



Sudu sudut *stagger* 27°



Sudu sudut *stagger* 30°



Sudu sudut *stagger* 33°

**Lampiran 23.** Dokumentasi pengujian turbin vortex di Departemen Teknik Mesin Industri.



Pengambilan data variasi beban



## BIODATA PENULIS



Faiz Ridho Syafruddin lahir dan tumbuh besar di Surabaya bersama kedua orang tua, kakak perempuan dan kakak laki-laki. Sejak kecil, Faiz memiliki minat yang tinggi di dunia keteknikan, khususnya bidang otomotif. Hal itu bermula dari kakek dan ayahnya yang seorang mekanik berpengalaman dan memiliki sebuah bengkel sepeda motor. Dengan begitu, Faiz sangat mengenal dunia otomotif yang dirangsang sejak kecil, ketertarikannya terlihat saat mengoleksi puluhan miniature mobil dan kesukaannya membaca majalah JIP. Seiring waktu, rasa keingintahuan Faiz mendorongnya untuk menempuh pendidikan tinggi di Departemen Teknik Mesin Industri ITS dengan Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi

Energi. Selama masa studi, Faiz terlibat di beberapa kegiatan project pengabdian masyarakat dan *workshop* mahasiswa. Pengalamannya diperdalam juga melalui kegiatan magang industry di PT Terminal Teluk Lamong dengan penempatan Subdirektorat Engineering dan PT Semen Indonesia Grup dengan penempatan Unit Reliability Maintenance (overhaul). Tidak hanya itu, Faiz juga mengembangkan diri aktif berkontribusi di Himpunan Mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri sebagai Staff BSO Bengkel di tahun 2020 dan Wakil Ketua Himpunan Kabinet Akselerasi Karya di tahun 2021. Di sisi lain, Faiz juga menyukai aktivitas *outdoor* seperti menyelam, mendaki, dan bersepeda.

Komitmen dan dedikasi tersebut membawa Faiz untuk mengembangkan diri melalui riset dan praktik yang direalisasikan dalam proyek akhir ini. Melalui pembelajaran yang dilaluinya, Faiz berharap dapat berkontribusi menjadi seorang *maintenance engineer* profesional di perusahaan multinasional.