Didaktik : Jurnal Ilmiah PGSD FKIP Universitas Mandiri,
ISSN Cetak : 2477-5673 ISSN Online : 2614-722X
Volume 12 Nomor 03, September 2026

EVALUASI PERENCANAAN SALURAN PRIMER IRIGASI LAHAN PERTANIAN DUSUN GARUTU DESA BUTTU BATU KECAMATAN ENREKANG KABUPATEN ENREKANG

Marheni[1], Arsyad[2], Saleh[3]
[123]Universitas Muhammadiya Enrekang
[1]marhenim358@gmail.com

ABSTRACT

The availability of irrigation water is an essential factor in increasing agricultural productivity and supporting sustainable farming activities. Garutu Hamlet, Buttu Batu Village, Enrekang District, Enrekang Regency has an agricultural area of 22.08 hectares; however, the distribution of irrigation water has not been optimal. Therefore, the planning of a primary irrigation canal is required to ensure an effective and equitable water supply.The data consisted of primary data obtained from field surveys and existing canal measurements, as well as secondary data including rainfall records from 2015–2024, climatological data, topographic maps, and agricultural land area. The analyses included the determination of design rainfall (R80), dependable discharge (Q80), Net Field Requirement (NFR), and the design of the primary irrigation canal using the Manning equation.The results indicate that the design rainfall (R80) is 312.48 mm, the average dependable discharge (Q80) is 0.469 m³/s, and the maximum irrigation water requirement is 0.138 m³/s with an irrigation efficiency of 61.2%. Based on the hydraulic analysis, the proposed trapezoidal primary irrigation canal has a bottom width of 0.80 m, a flow depth of 0.55 m, a freeboard height of 0.60 m, a total canal depth of 1.15 m, a side slope of 1:1, and a longitudinal bed slope of 0.021. The designed canal has a discharge capacity of 0.543 m³/s with a flow velocity of 0.73 m/s, indicating that it is capable of safely conveying the required irrigation discharge throughout the year. Therefore, the proposed canal dimensions satisfy the technical design requirements and are expected to improve water distribution efficiency and support increased agricultural productivity in Garutu Hamlet.

Keywords: *primary irrigation canal, dependable discharge, irrigation water requirement, hydrology, hydraulics.*

ABSTRAK

Ketersediaan air irigasi merupakan faktor penting dalam meningkatkan produktivitas pertanian dan mendukung keberlanjutan usaha *tani*. Dusun Garutu, Desa Buttu Batu, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang memiliki potensi lahan pertanian seluas 22,08 ha, namun distribusi air irigasi belum berjalan secara optimal sehingga diperlukan perencanaan saluran irigasi primer yang mampu memenuhi kebutuhan air secara efektif. Data yang digunakan meliputi data primer berupa hasil survei lapangan dan pengukuran kondisi eksisting lahan, serta data sekunder berupa data curah hujan periode 2015–2024, data klimatologi, peta topografi, dan luas lahan pertanian. Analisis dilakukan melalui perhitungan curah hujan rencana (*R80*), debit andalan (*Q80*), kebutuhan air irigasi (*Net Field Requirement*/*NFR*), serta perencanaan dimensi saluran menggunakan persamaan *Manning*.Hasil penelitian menunjukkan bahwa curah hujan rencana (*R80*) sebesar 312,48 mm, debit andalan (*Q80*) rata-rata sebesar 0,469 m³/detik, dan kebutuhan air maksimum sebesar 0,138 m³/detik dengan efisiensi irigasi sebesar 61,2%. Berdasarkan hasil analisis hidrolika, diperoleh dimensi saluran irigasi primer berbentuk trapesium dengan lebar dasar 0,80 m, tinggi air 0,55 m, tinggi jagaan 0,60 m, tinggi total saluran 1,15 m, kemiringan dinding 1:1, dan kemiringan dasar saluran 0,021. Saluran yang direncanakan memiliki kapasitas debit sebesar 0,543 m³/detik dengan kecepatan aliran 0,73 m/detik, sehingga mampu memenuhi kebutuhan air irigasi sepanjang tahun. Dengan demikian, dimensi saluran yang direncanakan dinilai memenuhi persyaratan teknis serta dapat meningkatkan pemerataan distribusi air dan mendukung peningkatan produktivitas lahan pertanian di Dusun Garutu.

Kata Kunci: irigasi primer, debit andalan, kebutuhan air irigasi, hidrologi, hidrolika.

A. Latar Belakang

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang memiliki peranan penting dalam mendukung ketahanan pangan, meningkatkan kesejahteraan masyarakat, serta mendorong pertumbuhan ekonomi daerah. Keberhasilan kegiatan pertanian sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air yang memadai, baik dari segi kuantitas maupun kontinuitasnya. Oleh karena itu, keberadaan sistem irigasi yang direncanakan dengan baik menjadi faktor penting untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan air tanaman, meningkatkan produktivitas lahan, serta mengurangi risiko gagal panen akibat ketidakpastian curah hujan.

Dusun Garutu, Desa Buttu Batu, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang merupakan salah satu wilayah yang memiliki potensi lahan pertanian cukup besar dengan luas lahan sekitar 22,08 ha. Namun, sistem irigasi yang tersedia belum mampu mendistribusikan air secara optimal. Berdasarkan hasil survei lapangan, saluran irigasi yang ada masih memiliki dimensi yang tidak seragam, mengalami sedimentasi, kebocoran pada beberapa bagian, serta belum dilengkapi bangunan pembagi yang memadai. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi air tidak merata, terutama pada lahan bagian hilir yang sering mengalami kekurangan air pada musim kemarau sehingga produktivitas pertanian belum dapat dimaksimalkan.

Perencanaan saluran irigasi primer memerlukan analisis hidrologi dan hidrolika yang komprehensif agar dimensi saluran yang direncanakan mampu menyalurkan debit sesuai kebutuhan air irigasi. Analisis tersebut meliputi penentuan curah hujan rencana (*R80*), debit andalan (*Q80*), kebutuhan air irigasi (*Net Field Requirement/NFR*), serta perhitungan kapasitas saluran menggunakan persamaan Manning. Melalui pendekatan tersebut, saluran yang

direncanakan diharapkan mampu mengalirkan air secara aman, efisien, dan merata ke seluruh lahan pertanian yang dilayani.

Berdasarkan hasil analisis penelitian diperoleh curah hujan rencana (*R80*) sebesar 312,48 mm, debit andalan rata-rata (*Q80*) sebesar 0,469 m³/detik, serta kebutuhan air maksimum sebesar 0,138 m³/detik dengan efisiensi irigasi sebesar 61,2%. Hasil analisis hidrolika menunjukkan bahwa saluran primer berbentuk trapesium dengan lebar dasar 0,80 m, tinggi air 0,55 m, tinggi jagaan 0,60 m, kemiringan dinding 1:1, dan kemiringan dasar saluran 0,021 mampu mengalirkan debit sebesar 0,543 m³/detik dengan kecepatan aliran 0,73 m/detik. Dengan kapasitas tersebut, saluran yang direncanakan dinilai mampu memenuhi kebutuhan air irigasi lahan pertanian di Dusun Garutu secara efektif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merencanakan saluran primer irigasi yang sesuai dengan kebutuhan air lahan pertanian di Dusun Garutu melalui analisis hidrologi dan hidrolika. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam pembangunan maupun pengembangan jaringan irigasi, sehingga distribusi air menjadi lebih merata, efisiensi penggunaan air meningkat, dan produktivitas pertanian dapat ditingkatkan secara berkelanjutan.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian teknik (*engineering research*) yang bersifat deskriptif. Penelitian dilaksanakan di Dusun Garutu, Desa Buttu Batu, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang. Pendekatan kuantitatif dipilih karena analisis dilakukan berdasarkan data numerik yang meliputi data curah hujan, kondisi topografi, debit aliran, dan dimensi saluran untuk menghasilkan rancangan saluran irigasi primer yang memenuhi kebutuhan air lahan pertanian.

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data

primer diperoleh melalui survei lapangan berupa pengukuran kondisi eksisting saluran, dimensi saluran, elevasi, kemiringan lahan, serta dokumentasi lapangan. Data sekunder meliputi data curah hujan periode 2015–2024, data klimatologi, peta topografi, dan luas lahan pertanian yang diperoleh dari instansi terkait serta literatur pendukung.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara dengan petani dan pengelola irigasi, serta studi dokumentasi. Observasi digunakan untuk memperoleh data kondisi fisik saluran dan karakteristik lokasi penelitian. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai pola tanam, kebutuhan air, dan permasalahan distribusi air, sedangkan studi dokumentasi digunakan untuk memperoleh data hidrologi dan referensi teknis yang mendukung proses perencanaan.

Analisis data diawali dengan analisis hidrologi untuk menentukan curah hujan rencana (*R80*) dan debit andalan (*Q80*). Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan air irigasi (*Net Field Requirement/NFR*) berdasarkan data curah hujan efektif, evapotranspirasi, dan kebutuhan air tanaman. Tahap berikutnya adalah analisis hidrolika menggunakan persamaan Manning untuk menentukan dimensi saluran primer yang meliputi lebar dasar, tinggi aliran, kemiringan dinding, kemiringan dasar saluran, serta kapasitas debit yang mampu memenuhi kebutuhan air irigasi. Hasil perencanaan kemudian dievaluasi dengan membandingkan kapasitas saluran terhadap kebutuhan air sehingga diperoleh rancangan saluran yang memenuhi persyaratan teknis dan mampu mendistribusikan air secara efektif pada lahan pertanian di Dusun Garutu.

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Pembahsan

a. Kondisi Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Dusun Garutu, Desa Buttu Batu, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang. Wilayah penelitian memiliki luas lahan pertanian yang dilayani sebesar **22,08 ha** dengan topografi berbukit dan bergelombang. Berdasarkan hasil survei lapangan, panjang saluran primer yang direncanakan adalah **661 m**, dengan elevasi tertinggi **84 mdpl** dan elevasi terendah **70 mdpl**. Kondisi saluran eksisting masih berupa saluran sederhana dengan dimensi yang tidak seragam sehingga distribusi air belum berlangsung secara optimal. Beberapa permasalahan yang ditemukan di lapangan meliputi sedimentasi, kebocoran saluran, pertumbuhan vegetasi, serta belum tersedianya bangunan pembagi yang memadai sehingga mengakibatkan distribusi air tidak merata, terutama pada lahan bagian hilir.

b. Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan menggunakan data curah hujan selama periode **2015–2024** yang diperoleh dari tiga stasiun hujan, yaitu Stasiun Enrekang, Anggeraja, dan Masalle. Berdasarkan hasil analisis diperoleh curah hujan rencana (**R80**) sebesar **312,48 mm**, sedangkan debit andalan (**Q80**) rata-rata sebesar **0,469 m³/detik**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa debit air yang tersedia mampu dimanfaatkan sebagai dasar perencanaan jaringan irigasi primer pada lokasi penelitian. Penentuan debit andalan menjadi tahapan penting karena menggambarkan debit yang dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan air selama musim tanam.

c. Analisis Kebutuhan Air Irigasi

Perhitungan kebutuhan air dilakukan berdasarkan curah hujan efektif, evapotranspirasi, koefisien tanaman, serta kehilangan air di jaringan irigasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan air maksimum pada lahan pertanian sebesar **0,138 m³/detik** dengan efisiensi

jaringan irigasi sebesar **61,2%**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa debit andalan yang tersedia masih lebih besar dibandingkan kebutuhan air irigasi sehingga secara kuantitas ketersediaan air mampu memenuhi kebutuhan lahan pertanian yang dilayani.

d. Perencanaan Dimensi Saluran Primer

Perencanaan saluran dilakukan menggunakan persamaan Manning dengan mempertimbangkan kapasitas debit rencana, kemiringan dasar saluran, dan koefisien kekasaran. Hasil analisis menunjukkan bahwa saluran primer yang paling sesuai berbentuk **trapesium** dengan lebar dasar **0,80 m**, tinggi aliran **0,55 m**, tinggi jagaan **0,60 m**, kemiringan dinding **1:1**, dan kemiringan dasar saluran **0,021**. Dimensi tersebut menghasilkan kapasitas debit sebesar **0,543 m³/detik** dengan kecepatan aliran **0,73 m/detik**. Nilai kecepatan aliran tersebut masih berada dalam batas aman sehingga dapat meminimalkan terjadinya erosi maupun sedimentasi pada saluran.

2. Hasil

a. Analisis Curah Hujan Rencana

Analisis hidrologi dilakukan menggunakan data curah hujan dari tiga stasiun hujan, yaitu Stasiun Enrekang, Anggeraja, dan Masalle selama periode 2015–2024. Berdasarkan analisis distribusi probabilitas diperoleh nilai curah hujan rencana (*R80*) sebesar **312,48 mm**.

Tabel 1. Hasil Analisis Curah Hujan Rencana

b. Parameter	**Nilai**
Periode data	2015–2024
Jumlah stasiun hujan	3 stasiun
Curah hujan rencana (*R*80)	312,48 mm

Sumber: Hasil analisis data penelitian

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai curah hujan rencana dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis ketersediaan air untuk perencanaan saluran irigasi primer.

c. Analisis Debit Andalan

Perhitungan debit andalan dilakukan menggunakan metode **Q80** sehingga diperoleh debit yang dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Debit Andalan

Parameter	Nilai
Curah hujan rencana	312,48 mm
Debit andalan (*Q*80)	0,469 m³/detik

Sumber: Hasil analisis data penelitian

Debit andalan yang diperoleh menunjukkan bahwa sumber air memiliki kapasitas yang cukup untuk melayani kebutuhan air lahan pertanian di lokasi penelitian.

d. Analisis Kebutuhan Air Irigasi

Perhitungan kebutuhan air dilakukan berdasarkan curah hujan efektif, evapotranspirasi, kebutuhan tanaman, dan efisiensi jaringan irigasi.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kebutuhan Air Irigasi

Parameter	Nilai
Luas lahan	22,08 ha
Kebutuhan air maksimum	0,138 m³/detik
Efisiensi irigasi	61,2 %

Sumber: Hasil analisis data penelitian

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan air irigasi lebih kecil dibandingkan debit andalan yang tersedia sehingga kebutuhan air lahan pertanian masih dapat dipenuhi.

e. Perencanaan Perencanaan Dimensi Saluran Primer

dimensi saluran dilakukan menggunakan persamaan Manning sehingga diperoleh dimensi saluran yang mampu mengalirkan debit rencana.

Tabel 4. Dimensi Saluran Primer Rencana

Parameter	Nilai
Bentuk saluran	Trapesium
Lebar dasar (*b*)	0,80 m
Tinggi air (*h*)	0,55 m
Tinggi jagaan	0,60 m

Parameter	Nilai
Tinggi total saluran	1,15 m
Kemiringan dinding	1 : 1
Kemiringan dasar	0,021
Kapasitas debit	0,543 m³/detik
Kecepatan aliran	0,73 m/detik

Sumber: Hasil analisis data penelitian

Dimensi saluran yang direncanakan mampu mengalirkan debit lebih besar daripada kebutuhan air irigasi sehingga sistem irigasi dapat beroperasi dengan aman dan efisien.

f. Rekapitulasi Hasil Perhitungan

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Penelitian

Hasil	Nilai
Curah hujan rencana (*R*80)	312,48 mm
Debit andalan (*Q*80)	0,469 m³/detik
Kebutuhan air maksimum	0,138 m³/detik
Efisiensi irigasi	61,2 %
Kapasitas saluran	0,543 m³/detik
Kecepatan aliran	0,73 m/detik

Sumber: Hasil analisis data penelitian

Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa kapasitas saluran primer sebesar **0,543 m³/detik** lebih besar dibandingkan kebutuhan air maksimum sebesar **0,138 m³/detik**. Dengan demikian, dimensi saluran yang direncanakan mampu memenuhi kebutuhan air irigasi pada lahan pertanian seluas **22,08 ha** serta mendukung distribusi air yang lebih merata

D. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perencanaan saluran primer irigasi lahan pertanian di Dusun Garutu, Desa Buttu Batu, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang, dapat disimpulkan bahwa hasil analisis hidrologi menghasilkan curah hujan

rencana (*R*₈₀) sebesar **312,48 mm** dan debit andalan (*Q*₈₀) sebesar **0,469 m³/detik**. Debit tersebut mampu memenuhi kebutuhan air irigasi pada lahan pertanian seluas **22,08 ha** dengan kebutuhan air maksimum sebesar **0,138 m³/detik** dan efisiensi irigasi sebesar **61,2%**.

Hasil analisis hidrolika menunjukkan bahwa saluran primer yang direncanakan berbentuk trapesium dengan lebar dasar **0,80 m**, tinggi air **0,55 m**, tinggi jagaan **0,60 m**, kemiringan dinding **1 : 1**, dan kemiringan dasar **0,021**. Dimensi tersebut menghasilkan kapasitas debit sebesar **0,543 m³/detik** dengan kecepatan aliran **0,73 m/detik**, sehingga mampu mengalirkan debit yang lebih besar daripada kebutuhan air irigasi. Dengan demikian, saluran primer yang direncanakan dinilai memenuhi persyaratan teknis dan dapat meningkatkan efektivitas distribusi air pada lahan pertanian di Dusun Garutu.

DAFTAR PUSTAKA

Anggrahini. 2005. Hidrolika Saluran Terbuka. Srikandi, Surabaya.

Ardiansah, I., Bramadi, R., Wargadibrata, N., Asdak, C., Rahmah, D. M., & Putri, Ariyani, D., & Pramono, H. (2020). *Hidrologi Terapan untuk Perencanaan Sumber Daya Air*. Yogyakarta: Deepublish.

Asdak, C. (2018). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai* (6th ed.). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Attamimi, F. F., Buyang, C. G., & Kalalimbong, A. (2021).

CD

Soemarto,C.D.(1995).*Hidrologi Teknik*. Jakarta :Erlangga Ir., B.I.E., Dipl.HE., ”Hidrologi Teknik”, Erlangga, Jakarta, 1995

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2010). *Applied Hydrology* (3rd ed.). *New York, NY:*

McGraw-Hill. Daerah Irigasi Bandar Sidoras Kecamatan Percut Sei Tuan Kabupaten Deli dan Efektivitas Daerah Irigasi Oongan pada Daerah Aliran Sungai (DAS).

Darajat, A. R., Nurrochmad, F., & Jayadi, R. (2017). Analisis Efisiensi Saluran Irigasi di Daerah Irigasi Boro Kabupaten Purworejo, Provinsi Jawa Tengah. INERSIA Informasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur, 13(2), 154–166.

Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2013). *Standar Perencanaan Irigasi (KP-01 s.d. KP-07)*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Haris, V. T., Saleh, A., & Anggraini, M. (2016). Perencanaan dimensi ekonomis saluran primer daerah irigasi (di) bunga raya. *Program Studi Teknik Sipil*, *2*(1), 47-57.

Harto, S. (2013). *Analisis Hidrologi*. Yogyakarta: UGM Press.

Irigasi, D. (1986). Standar Perencanaan Irigasi. *Bandung: PT. Galang Persada*.

Kecamatan Nubatukan Kabupaten Lembata Provinsi NTT. [skripsi] Malang

Kodoatie, R. J. (2019). *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Andi Offset.

Kriteria Perencanaan bagian Jaringan Irigasi Teknis, Direktorat Irigasi I,(KP- 01)Ditjen Pengairan, Departemen P. U.Penerbit Dep Pekerjaan Umum.

Kurniari, K., Made Nada, I., & Suadnyana, G. (2023). Analisi

s Efisiensi Saluran

Kusumastuti, D. I. (2021). *Teknik Irigasi dan Drainase Pertanian Berkelanjutan*. Malang: UB Press.

La Sianto. (2023). Program Peningkatan Saluran Irigasi Desa Labulu-bulu Kecamatan Parigi Kabupaten Muna. Jurnal Pengabdian Masyarakat Fakultas Teknik UM Kendari, 39–47.

Ladjar, D Yohanes. 2016. Perencanaan Sistim Jaringan Irigasi Waikomo

Ladjar, Yohanes D. 2016. Perencanaan Sistem Jaringan Irigasi Waikomo Kecamatan Nubatukan Kabupaten Lembata. Skripsi. Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang.

Linsley, R. K., Franzini, J. B., Freyberg, D. L., & Tchobanoglous, G. (2014). *Water Resources Engineering* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

Marzuki, S. F. (2023). Perencanaan Saluran Irigasi primer Desa Bontomatene Kecamatan Turatea Kabupaten Jeneponto. Jurnal Pengabdian Masyarakat Konstruksi (MAJJAMA), 1(1), 6-11.

Noerhayati, E., & Anam, S. (2020). Studi Pengembangan Jaringan Irigasi Sprinkler Berbasis Gravitasi di Desa Poncokusumo Kabupaten Malang. Jurnal Rekayasa Sipil (e-journal), 8(3).

Nurin Nubuwati, & Afrikhatul Maulidiyah. (2023). Analisa Faktor Kekurangan

Penerbit Erlangga Sub Dierektorat Perencanaan Persada, Bandung.

Perencanaan Saluran Irigasi Samal Kiri di Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Simetrik*, *11*(2), 462-468.

Prawira, M., Sumono, S., & Rizaldi, T. (2017). Kajian Saluran Irigasi primer di Desa Percut Daerah Irigasi Bandar Sidoras Kecamatan Percut Sei Tuan Kabupaten Deli Serdang. Jurnal Rekayasa Pangan dan Pertanian.

Prawira, Muhammad dkk. 2018. Kajian Saluran Irigasi primer Di Desa Percut

Ray K. Linsley, Joseph B. Franzini, Djoko Sasongko, Teknik Sumber Daya Air jilid II

S. H. (2018). Partisipasi Petani Terhadap Pengelolaan Air Irigasi di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat. Jurnal Sains,Teknologi Dan Industri, 16(1), 7–14.

Saputra, M. A., Masril, M., & Yusman, A. S. (2022). Perencanaan Saluran Irigasi Sekunder D.I Batang Tambangan Jorong Lundar Nagari Panti Timur Kecamatan Panti - Kab. Pasaman. Ensiklopedia Research and

Community Service Review, 2(1), 60-65.

Setiawan, E., Hadi Saputra, I., & Andi Tjandra, A. (2022). Analisa Pemenuhan Air Irigasi Lahan Pertanian Desa Sumberagung Kecamatan Dander: Analysis Of Agricultural Land Irrigation Water Fulfillment In Sumberagung Village Dander District.

UNAEDI, M. J., & HIDAYATI, N. (2011). *PERENCANAAN RETARDING POND KOTA PURWODADI Design of Retarding Pond Purwodadi City* (Doctoral dissertation, F. TEKNIK UNDIP).