

TUGAS AKHIR

**ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC*
TUBE THERMOCOUPLE PADA MESIN *TUNNEL*
KILN PABRIK 2**



Disusun Oleh :

BAGUS PRASETYO
1422200027

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA**

2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC TUBE* *THERMOCOUPLE* PADA MESIN *TUNNEL KILN* PABRIK 2

Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata Satu (S1)

Pada Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Disusun Oleh:

BAGUS PRASETYO

1422200027

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
2026**

TUGAS AKHIR

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC TUBE* *THERMOCOUPLE* PADA MESIN *TUNNEL KILN* PABRIK 2



Disusun Oleh:

BAGUS PRASETYO
1422200027

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
2026**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA**

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

NAMA : BAGUS PRASETYO
NBI : 1422200027
PROGRAM STUDI : TEKNIK MESIN
FAKULTAS : TEKNIK
JUDUL : ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC
TUBE THERMOCOUPLE* PADA MESIN *TUNNEL
KILN* PABRIK 2

Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing



Ir. Maula Nafi, S.T., M.T
NPP. 20420.16.0717



Dekan
Fakultas Teknik



Dr. Ir. Ar. R.A. Retno Hastuti, M.T., IPU., IAL., APEC. Eng.
NPP.20440.91.0218

Ketua Program Studi
Teknik Mesin



Ir. Moh. Nor Ali Aziz, S.T., M.T
NPP.20420.22.0826

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bagus Prasetyo

NIM : 1422200027

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi/tugas akhir dengan judul:

***" ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL CERAMIC TUBE
THERMOCOUPLE PADA MESIN TUNNEL KILN PABRIK 2"***

adalah hasil karya saya sendiri. Skripsi/tugas akhir ini tidak mengandung karya orang lain yang telah dipublikasikan atau ditulis sebelumnya, kecuali sebagaimana yang telah disebutkan dalam daftar pustaka dan sumber kutipan. Saya bertanggung jawab sepenuhnya atas keaslian isi skripsi/tugas akhir ini. Jika di kemudian hari ditemukan bukti bahwa skripsi/tugas akhir ini mengandung unsur plagiat, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan tanpa paksaan dari pihak mana pun.

Surabaya, 10 Februari 2026

Yang membuat pernyataan,



Bagus Prasetyo

NIM: 1422200027



UNIVERSITAS
17 AGUSTUS 1945
SURABAYA

BADAN PERPUSTAKAAN

Jl. SEMOLOWARU 45 SURABAYA

TELP. 031 593 1800 (Ext. 311)

e-mail : perpus@untag-sby.ac.id

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai Civitas Akademik Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bagus Prasetyo
NBI/ NPM : 1422200027
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin
Jenis Karya : ~~Skripsi/ Tesis/ Disertasi/ Laporan Penelitian/ Praktek*~~

Demi perkembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Badan Perpustakaan Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya *Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Nonexclusive Royalty-Free Right)*, atas karya saya yang berjudul:

"ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL CERAMIC TUBE THERMOCOUPLE PADA MESIN TUNNEL KILN PABRIK 2"

Dengan *Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Nonexclusive Royalty - Free Right)*, Badan Perpustakaan Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya berhak menyimpan, mengalihkan media atau memformatkan, mengolah dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, mempublikasikan karya ilmiah saya selama tetap tercantum

Dibuat di : Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Pada tanggal : 10 Februari 2026

Yang Menvatakan,



*Coret yang tidak perlu

LEMBAR PERSEMBAHAN

Saya ucapkan terimakasih kepada Tuhan Yang Maha Esa karena dengan segala rahmat, petunjuk, dan kesehatan yang telah diberikan kepada saya dalam perjalanan saya menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, yang telah mendoakan keberhasilan penulis serta memberi dukungan, semangat dan bantuan, baik materil maupun spiritual kepada penulis.
2. Bapak Ir. Maula Nafi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing, mengarahkan dan memberikan petunjuk dalam penyusunan proposal Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Moh. Nor Ali Aziz., S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
4. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Mesin, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama mengikuti kegiatan pembelajaran di perkuliahan.
5. Teman-teman penulis yang telah memberikan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

ABSTRAK

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC TUBE THERMOCOUPLE* PADA MESIN *TUNNEL KILN* PABRIK 2

Thermocouple merupakan sensor suhu yang digunakan secara luas dalam proses industri bersuhu tinggi, termasuk pada mesin *tunnel kiln*. *Ceramic tube* sebagai pelindung *Thermocouple* berfungsi penting untuk menjaga akurasi pengukuran dan memperpanjang umur pakai sensor (Platina – Rhodium). Namun, pada kondisi operasional, material keramik sering mengalami kegagalan berupa retak, pecah, maupun degradasi struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab kegagalan *ceramic tube Thermocouple* pada mesin *tunnel kiln* melalui data operasional dan pendekatan karakterisasi material. Metode yang digunakan meliputi pengamatan HMI (*Human Machine Interface*), pengukuran jarak sensor, pengukuran nilai getaran, pengujian NDT (*Non- Destructive Test*), SEM (*Scanning Electron Microscope*), dan Analisa EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Hasil penelitian menunjukkan jarak pemasangan sensor diposisikan 3 cm dan secara geometris masih terdapat ruang dari benturan. *holder Thermocouple* di *firing zone* terdapat fluktuasi getaran operasional hingga mencapai 0,383 mm/s. Pengujian *dye penetrant* mendeteksi adanya porositas abnormal pada ujung tabung tanpa adanya tanda – tanda perambatan retak pada area permukaan tabung. Hasil fraktografi SEM memperlihatkan karakteristik dominan berupa patah getas (*brittle fracture*) dengan jalur perambatan retak antar batas butir (*intergranular crack propagation*), disertai kehadiran *striasi* halus khas kelelahan mekanis (*mechanical fatigue*). Analisis EDS pada area terindikasi zat kontaminan mendeteksi infiltrasi unsur asing berupa Kalsium (Ca) sebesar 27,20% dan Silika (Si) sebesar 10,26%. Dari *datasheet* menjelaskan bahwa material Alumina C799 dikategorikan sebagai material yang kedap air (*impermeable*) dan sangat padat dengan penyerapan air 0%. Dapat disimpulkan bahwa kemungkinan kegagalan pada *ceramic tube* disebabkan oleh faktor kelelahan mekanis akibat getaran siklik operasional dengan fluktuasi nilai sebesar 0,383 mm/s. Sebagai langkah pencegahan, direkomendasikan penambahan peredam getaran berupa *Ceramic Fiber Blanket* pada *holder Thermocouple* dan melakukan pengecekan pada rel kereta *tunnel kiln* saat *overhaul*.

Kata Kunci: *Thermocouple, Ceramic Tube, Failure Analysis, SEM-EDS, Alumina C799*

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF CERAMIC TUBE THERMOCOUPLE MATERIAL IN TUNNEL KILN MACHINE FACTORY 2

Thermocouple is a temperature sensor that is widely used in high-temperature industrial processes, including in tunnel kiln machines. Ceramic Tube as a Thermocouple protector functions as an important function to maintain measurement accuracy and extend the service life of the sensor (Platinum – Rhodium). However, in operational conditions, ceramic materials often experience failures in the form of cracks, breaks, or structural degradation. This study aims to analyze the causes of Ceramic tube Thermocouple failure in tunnel kiln machines through operational data and material characterization approaches. The methods used include HMI (Human Machine Interface) observation, sensor distance measurement, vibration value measurement, NDT (Non-Destructive Test) testing, SEM (Scanning Electron Microscope), and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analysis. The results of the study show that the sensor installation distance is positioned at 3 cm and geometrically there is still room from impact. Thermocouple holders in the firing zone have operational vibration fluctuations of up to 0.383 mm/s. Penetrant dye testing detects abnormal porosity at the end of the tube without any signs of cracked propagation in the surface area of the tube. The results of SEM fractography showed a dominant characteristic in the form of brittle fracture with an intergranular crack propagation pathway, accompanied by the presence of fine striation typical of mechanical fatigue. EDS analysis in areas indicated by contaminants detected infiltration of foreign elements in the form of Calcium (Ca) of 27.20% and Silica (Si) of 10.26%. The data sheet explains that Alumina C799 material is categorized as impermeable and very dense material with 0% water absorption. It can be concluded that the possible failure of the Ceramic Tube is caused by the mechanical fatigue factor due to the cyclic vibration of operation with a value fluctuation of 0.383 mm/s. As a preventive measure, it is recommended to add a vibration reducer in the form of a Ceramic Fiber Blanket to the Thermocouple holder and check the tunnel kiln train tracks during overholing.

Keywords: *Thermocouple, Ceramic Tube, Failure Analysis, SEM-EDS, Alumina C799*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul:

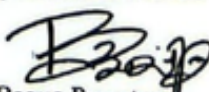
“ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL *CERAMIC TUBE* *THERMOCOUPLE* PADA MESIN *TUNNEL KILN* PABRIK 2”

Laporan ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya. Penulis menyadari bahwa keberhasilan laporan ini berkat dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya.
2. Kedua Orang Tua yang telah mendukung secara moril maupun materi serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan, dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Moh Nor. Ali Aziz, S.T, M.T Selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin UNTAG Surabaya.
4. Bapak Ir. Maula Nafi, S.T, M.T Selaku dosen pembimbing Tugas Akhir sekaligus dosen wali yang membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
5. Ibu Indah Nurpriyanti, S.pd, M.sc Selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Mesin UNTAG Surabaya.
6. Seluruh dosen dan karyawan Program Studi Teknik Mesin UNTAG Surabaya.
7. Laboratorium Teknik Mesin ITS Surabaya yang telah mengijinkan tempat dan memberikan waktu, ilmu, serta pengalaman yang sangat bermanfaat bagi penulis.
8. Teman-teman yang penulis banggakan yang tidak dapat disebutkan satu per satu
9. Semua pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuannya yang telah diberikan.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi perbaikan dan kemajuan bersama. Akhir kata, penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 10 Februari 2026


Bagus Prasetyo

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
LEMBAR PENYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Mesin <i>Tunnel Kiln</i>	5
2.2 <i>Thermocouple</i>	6
2.3 <i>Ceramic Tube Thermocouple</i>	8
2.4 Analisis Kegagalan.....	9
2.4.1 <i>Prosedur dalam Analisis Kegagalan</i>	9
2.5 Diagram Fasa $Al_2O_3 - SiO_2$	9
2.6 <i>Fracture in Ceramic</i>	10
2.7 <i>Fractographic Analysis</i>	11
2.8 Analisis Kegagalan <i>Thermocouple</i> Suhu Tinggi	12
2.9 Macam – Macam Pengujian dalam Analisis Kegagalan	15
2.10 Penelitian Sebelumnya	15
2.10.1 <i>Thermal Shock</i>	16
2.10.2 <i>Oksidasi</i>	16
2.10.3 <i>Mechanical Fatigue</i>	17
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2 Metode Penelitian.....	20

3.3 Material yang digunakan.....	20
3.4 Peralatan.....	21
3.5 Tahapan Penelitian.....	22
3.5.1 Studi Literatur Perusahaan.....	22
3.5.2 Pengukuran Jarak.....	22
3.5.3 Pengukuran Vibrasi Velocity.....	22
3.5.4 Pengamatan Visual.....	23
3.5.5 Preparasi Spesimen.....	23
3.5.6 Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	23
3.5.7 Pengujian EDS (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>)	24
3.6 Rancangan Penelitian.....	24
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Analisis Data.....	25
4.1.1 Pembacaan HMI (<i>Human Machine Interface</i>).....	25
4.1.2 Data Kerusakan Ceramic Tube Thermocouple	27
4.1.3 Pengukuran Jarak	28
4.1.4 Hasil Pengukuran Kecepatan Getaran.....	29
4.1.5 Hasil Pengamatan Visual	30
4.1.6 Hasil Pengamatan SEM	31
4.1.7 Hasil Pengujian EDS (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>)	33
4.2 Pembahasan.....	36
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	41
LAMPIRAN.....	43
BIODATA.....	56

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Mesin <i>tunnel kiln</i> (PT.SPN, 2025).....	5
Gambar 2.2 Deskripsi skematik tata letak <i>tunnel kiln</i>	5
Gambar 2.3 <i>Thermocouple</i>	6
Gambar 2.4 Dimensi <i>Thermocouple</i>	7
Gambar 2.5 Desain Internal <i>Thermocouple</i>	8
Gambar 2.6 Diagram Fasa $Al_2O_3 - SiO_2$	10
Gambar 2.7 Contoh patahan transgranular di sekitar asal patahan. (a) adalah aluminium-oksinitrid. Perhatikan jejak <i>hackle</i> yang dipicu oleh batas butir dan beberapa pori kecil. (b) adalah silikon karbida alfa yang disinter.....	10
Gambar 2.8 Contoh permukaan patahan intergranular. (a) adalah butir silikon nitrida yang memanjang. (b) adalah alumina sintered 99,9 %.....	11
Gambar 2.9. Retakan buatan sebagai asal mula patahan dalam sampel EA yang diuji pada 1200 °C: Retakan awal ditunjukkan oleh panah putih dan retakan yang melebar akibat pertumbuhan retakan subkritis ditandai oleh panah kuning. Peralihan dari patahan transgranular ke intergranular disorot oleh garis putus putus putih di dalam jendela kuning.....	12
Gambar 2.10 Grafik data suhu pembakaran RP2-004 13	13
Gambar 2.11 Tabung paduan 600 dari salah satu termokopel tipe S dari RP2-004.13	13
Gambar 2.12 Laporan EDS untuk kemungkinan area inisiasi pada permukaan retakan sisi persimpangan TC/2. Fase aluminium hadir.....	14
Gambar 2.13 Laporan EDS untuk satu area pada sisi sambungan retak dari TC/2.14	14
Gambar 2.14 Retakan pendinginan akibat <i>thermal shock</i> pada batang alumina (a), dan sebuah disk (b). Retakan tersebut ditandai dengan pewarna penetran merah.....	16
Gambar 2.15 Contoh asal patahan rongga permukaan. (a) dan (b) adalah pada batang bengkok yang dibakar dari silikon nitrida sinter cetak injeksi. (c) dan (d) menunjukkan rongga permukaan dalam komponen silikon nitrida yang dibakar dengan bantuan sintering yttria (proses pemanasan yttrium oksida Y_2O_3) dan alumina. (d) dimiringkan agar permukaan luarnya terlihat. Analisis EDX menunjukkan konsentrasi aluminium yang berlebih di lokasi tersebut, sehingga cacat ini juga memiliki karakteristik ketidakhomogenan komposisi.....	17

Gambar 2.16	Batang bengkok yang diuji hingga patah dalam pengujian kelelahan siklik. Materialnya adalah nitrida silikon yang disinter dengan aditif yttria dan alumina yang memiliki struktur butir memanjang untuk meningkatkan ketangguhan patah. (a) menunjukkan permukaan patah batang bengkok dengan asal ditandai oleh panah. (b) menunjukkan bagian patah cepat yang khas dari permukaan patah. (c) menunjukkan daerah asal dan sampah halus (panah) yang dihasilkan oleh siklus kelelahan.....	18
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	19
Gambar 3.2	Penampang patahan <i>ceramic tube thermocouple</i>	20
Gambar 3.3	Daerah pengambilan spesimen.....	21
Gambar 3.4	(a) Daerah terindikasi zat kontaminan, (b) Daerah crack.....	21
Gambar 3.5	Tecom Vibration Meter.....	22
Gambar 3.6	Dye Penetrant.....	23
Gambar 3.7	Alat uji SEM-EDS Teknik Mesin ITS.....	23
Gambar 4.1	HMI <i>Kiln</i> Pabrik 2, Th 2025/2026.....	25
Gambar 4.2	Grafik Kerusakan <i>Ceramic Tube</i>	27
Gambar 4.3	Jarak sensor <i>thermocouple</i>	28
Gambar 4.4	Jarak tempat susun body.....	28
Gambar 4.5	Jarak sambungan antar Rel.....	28
Gambar 4.6	Panjang patahan <i>ceramic tube</i>	29
Gambar 4.7	Pengujian <i>dye penetrant</i>	30
Gambar 4.8	Permukaan <i>ceramic tube alumina</i> akibat kontaminan (a). (sumber pengujian TA). Contoh, retakan pendinginan akibat <i>thermal shock</i> pada batang alumina (b). Retakan tersebut ditandai dengan pewarna penetrant merah. (courtesy of R. Danzer and T. Lube, Mountain Univ. Leoben).....	30
Gambar 4.9	Fraktografi patahan <i>Ceramic Tube Thermocouple</i> dengan pembesaran 1000x. (a) adalah Daerah Kontaminan. (b) adalah Daerah Crack.....	32
Gambar 4.10	Hasil Analisa EDS <i>Ceramic Tube Thermocouple</i> . (a) pada Daerah Kontaminan. (b) pada Daerah Crack.....	33
Gambar 4.11	Catalog <i>Thermocouple</i>	35

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian	24
Tabel 4.1 Data Kerusakan <i>Ceramic Tube Thermocouple</i>	27
Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Nilai Getaran Holder <i>Thermocouple</i>	29
Tabel 4.3 Material data sheet <i>Alumina Tube – C 799</i>	31
Tabel 4.4 Material data sheet <i>Alumina Tube – C 799</i>	32
Tabel 4.5 Komposisi material <i>Ceramic Tube Thermocouple Type S</i>	34