

Seminar Proposal Tesis

Penentuan Jarak Konsekuensi
Ledakan Berbasis
Trinitrotoluene (TNT) Equivalent
menggunakan Visual Basic for
Applications (VBA)

Virida Nur Lu'lu (23024005)

virida.nurlulu@gmail.com

081281151464

Dosen Pembimbing:

Hary Devianto S.T., M.Eng., Ph.D.

Dr. Eng. Pramujo Widiatmoko S.T., M.T.

Program Studi Magister Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung



Brainstorming of Explosion Incident



Sumber :
<https://forensic-architecture.org/investigation/beirut-port-explosion>



PRESENTATION OUTLINE

01

LATAR BELAKANG

02

LITERATUR REVIEW

03

METODOLOGI PENELITIAN

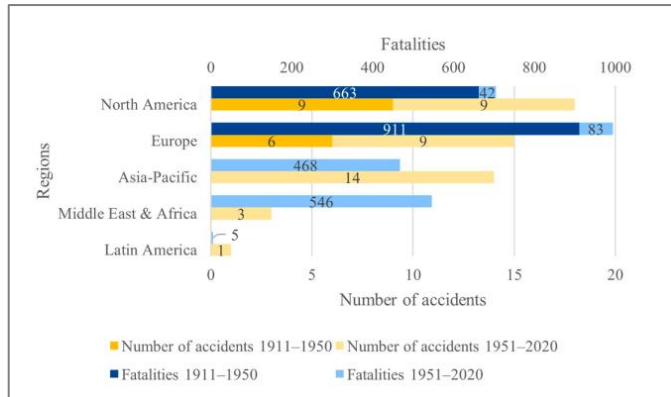
04

JADWAL PENELITIAN

BAHAYA LEDAKAN DI INDUSTRI

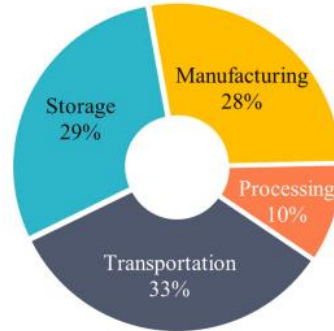
Potensi Bahaya Kebakaran dan Ledakan di Industri

- 1) Sifat Bahan yang Mudah terbakar, seperti bahan kimia volatile, gas mudah menyala, dan debu eksplosif
- 2) Reaktivitas kimia yang tinggi, seperti ammonium nitrat dan hidrogen, dapat bereaksi hebat dengan oksidator.
- 3) Kemungkinan terjadinya kebocoran zat.



Gambar 1. Data Kecelakaan & Fatalitas Ledakan AN (Yue dkk., 2023)

- 1) **Sebelum 1950**, sebagian besar korban jiwa terjadi di Eropa dan Amerika Utara.
- 2) **Setelah 1950**, pergeseran fatalitas ke Asia-Pasifik dan Timur Tengah & Afrika.



Gambar 2. Distribusi Kecelakaan Ledakan AN

Transportasi (33%) dan penyimpanan (29%) merupakan lokasi paling rawan Kecelakaan bahan kimia industri (Yue dkk., 2023)



1) **Insiden 1:** Ledakan **Ammonium Nitrat (AN)** berskala besar di gudang dekat area padat penduduk (Yue dkk., 2023).



2) **Insiden 2:** Ledakan tangki penyimpanan **Liquefied Petroleum Gas (LPG)** bahan kimia mudah terbakar.

✦ Berdasarkan studi (Sarvestani dkk., 2021), efek domino terjadi pada 70% kecelakaan LPG, menunjukkan bahwa ledakan pada satu tangki sering kali menyebar dan merusak unit lain di sekitarnya.



3) **Insiden 3:** Ledakan tangki **Hidrogen (H2)** yang sangat mudah terbakar dan berisiko meledak.

✦ Berdasarkan data Departemen Energi Amerika Serikat, terjadi 120 kecelakaan hidrogen selama periode 1999–2019. (Yang., 2021).

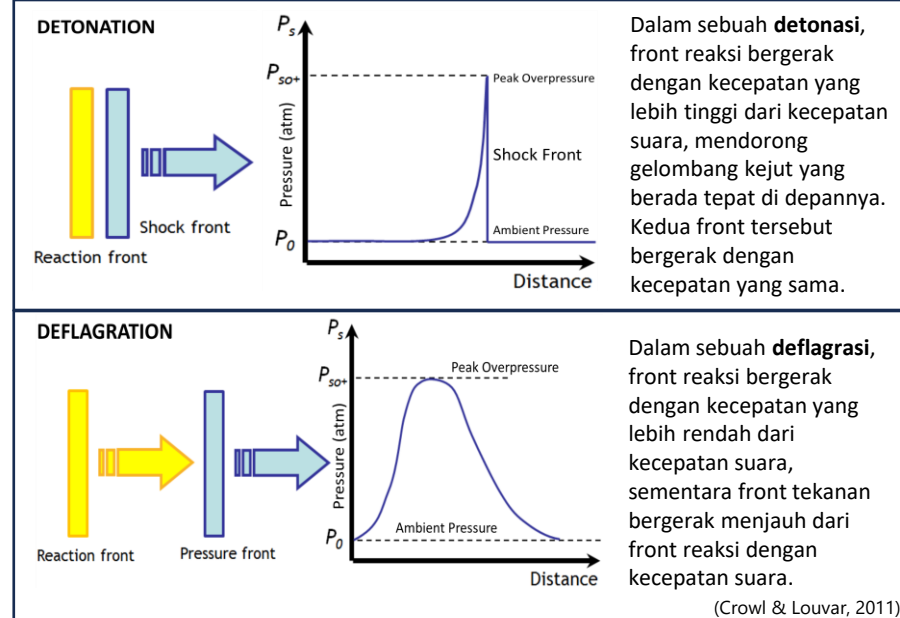
Segitiga Api (fire triangle)



Gambar 3. Segitiga Api

Kebakaran terjadi hanya jika bahan bakar, oksidator, dan sumber penyalaan tersedia dalam jumlah memadai. Hilangnya satu elemen mencegah pembakaran.

Perbedaan Karakteristik Tekanan Gelombang Ledakan



Gambar 4. Detonasi dan Deflagrasi

JENIS – JENIS LEDAKAN DALAM INDUSTRI



Ledakan dalam industri proses kimia diklasifikasikan ke beberapa kategori berdasarkan mekanisme pelepasan energi dan karakteristik media yang terlibat.

01 Physical Explosions



Gambar 5. Ledakan fisik
Sumber: [CSB](#)

Ledakan fisik terjadi akibat pelepasan energi mekanik dari sistem bertekanan tanpa adanya reaksi kimia.

02 Condensed Phase Explosions



Gambar 6. Ledakan fase terkondensasi

Sumber: [aa.com 2020](#)

Ledakan ini terjadi dari bahan dalam fase padat atau cair yang bersifat reaktif.

04 Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions (BLEVE)



Gambar 8. Ledakan cairan menguap
Sumber: [CSB 2011](#)

BLEVE terjadi ketika bejana berisi cairan di atas titik didih normalnya mengalami kegagalan struktural

06 Vapour Escapes into Buildings (VEEBs)



Gambar10. Ledakan Uap dalam bangunan

Sumber: [NET TV News](#)

VEEBs terjadi saat uap mudah terbakar lolos ke dalam bangunan atau ruang tertutup dan membentuk atmosfer yang mudah meledak.

03 Vapour Cloud Explosions (VCE)



Gambar 7. Ledakan awan uap
Sumber: [AIChE, 2011](#)

VCE terjadi ketika gas atau uap mudah terbakar bocor ke atmosfer yang membentuk awan yang tersebar.

05 Confined Explosions with Reaction



Gambar 9. Confined Explosions with Reaction

Sumber: [CSB 2006](#)

Ledakan ini melibatkan pembakaran uap atau reaksi dalam ruang tertutup

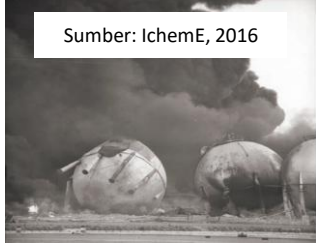



07 Dust Explosions



Gambar 11. Ledakan Debu
Sumber: [CSB 2004](#)

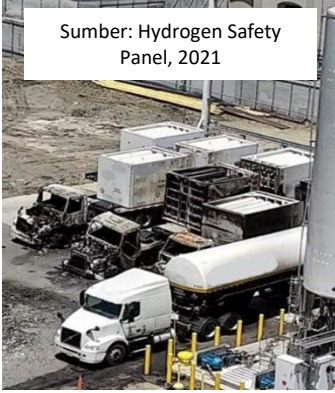
Ledakan ini terjadi akibat suspensi partikel padat halus di udara yang mudah terbakar.

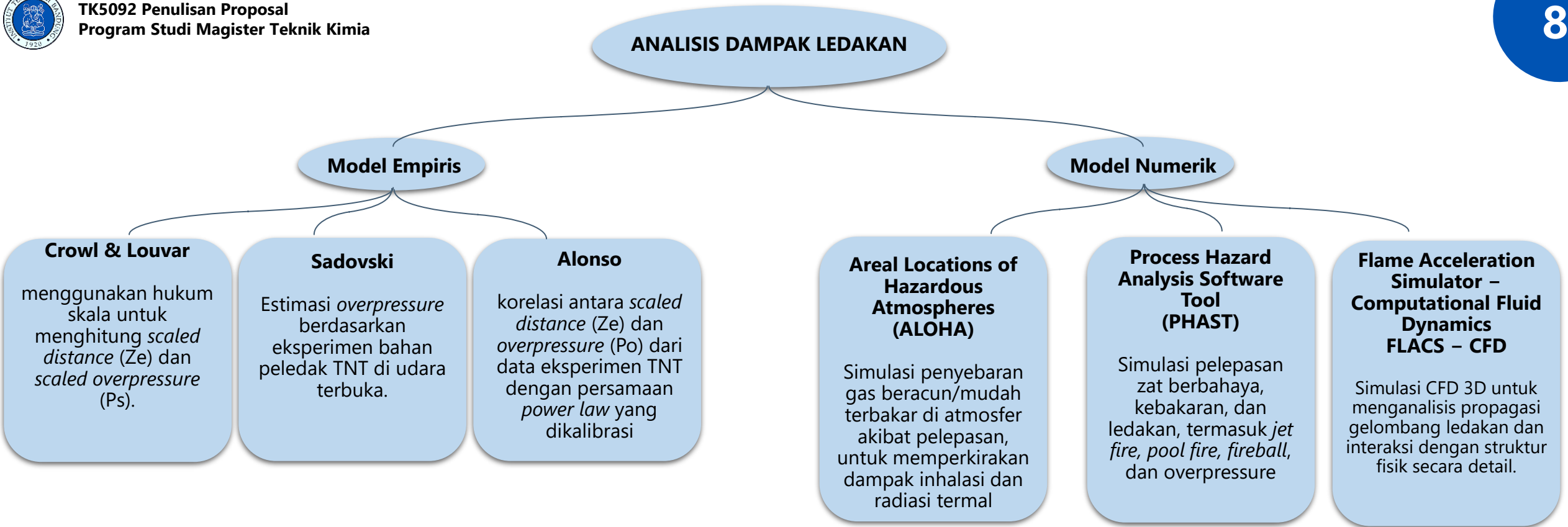
PERISTIWA KEJADIAN NYATA LEDAKAN AMONIUM NITRAT, LPG, DAN HIDROGEN

No	Peristiwa	Lokasi dan Tanggal Kejadian	Kuantitas Bahan	Jenis Ledakan	Penyebab	Dampak		Foto Pertistiwa
						Kerugian Harta Benda	Korban Jiwa	
1	Kebakaran dan ledakan tangki LPG	Feyzin, Prancis (4 Januari 1966)	Total kapasitas fasilitas penyimpanan LPG: 13.000 m ³	VCE / BLEVE	Kebocoran tak terkendali dari tangki penyimpanan propana dengan kapasitas 1200 m ³ (IChemE, 2016)	6 truk pemadam kebakaran, 1.475 bangunan rusak, 12 tangki penyimpanan rusak (Török dkk., 2010) dengan kerugian finansial sekitar \$18 juta pada saat kecelakaan (\$70 juta pada tahun 1990) (Kobayashi, M & Tamura, M., 1966).	18 orang tewas, 89 orang luka-luka (Török dkk., 2010).	 Sumber: IchemE, 2016
2		San Juan Ixhuatepec, Kota Mexico (19 Novermber 1984)	Total kapasitas fasilitas penyimpanan LPG: 16.000 m ³	VCE / BLEVE	Kebocoran uap LPG akibat pengisian (overfilling) dan penurunan tekanan pada 4 tangki berkapasitas 1.600 m ³ dan 2 tangki berkapasitas 2.400 m ³ (John A., 1988).	Luas area LPG plant seluas 100.000 m ² mengalami kerusakan parah, termasuk 270 rumah (Arturson, 1987). Kompensasi sebesar \$4 juta diberikan kepada 2.100 orang terdampak, dan pemerintah Meksiko menambah \$3,7 juta untuk rekonstruksi komunitas San Juan Ixhuatepec (LADB Staff, 1996).	Sekitar 500 tewas dan 7.000 orang luka-luka (John A., 1988).	 Sumber: IchemE, 2023
3	Ledakan Amonium	Pelabuhan Tianjin, China (12 Agustus 2015)	800 ton	Ledakan fasa terkondensasi (<i>Condensed Phase Explosions</i>)	Nitroselulosa kering mempercepat dekomposisi eksotermik dan akumulasi panas, sehingga memicu pembakaran spontan dan ledakan AN (Wang, 2023)	304 bangunan, 12.428 kendaraan komersial, dan 7.533 kontainer rusak (Wang dkk., 2023, dikutip dari Li dkk., 2015 dan 360 Baiker, 2021) dengan kerugian finansial hampir USD 2 miliar (Yu dkk., 2022)	173 tewas dan 798 luka-luka (The State Council of China, 2016)	 Sumber: BBC News, 2015
4	Nitrat	Pelabuhan Beirut, Lebanon (4 Agustus 2020)	2750 ton	Ledakan fasa terkondensasi (<i>Condensed Phase Explosions</i>)	Percikan api las menyulut bahan peledak di gudang, yang kemudian menyebabkan ledakan (Wang, 2023)	Sebanyak 300.000 orang kehilangan tempat tinggal, dengan kerugian mencapai \$15 miliar; selain itu, 50.000 rumah, 9 rumah sakit besar, dan 178 sekolah mengalami kerusakan (S. Devi, 2020; Wang dkk., 2023).	204 tewas dan >7,000 luka-luka (Yu dkk., 2021).	 Sumber: BBC News, 2020

PERISTIWA KEJADIAN NYATA LEDAKAN AMONIUM NITRAT, LPG, DAN HIDROGEN

Tabel 1. Peristiwa Kejadian Nyata Ledakan Amonium Nitrat, LPG, Dan Hidrogen

No	Peristiwa	Lokasi dan Tanggal Kejadian	Kuantitas Bahan	Jenis Ledakan	Penyebab	Dampak		Foto Pertistiwa
						Kerugian Harta Benda	Korban Jiwa	
5	Tangki hidrogen luar ruangan meledak selama pengujian elektroliser air yang dihubungkan ke sistem energi terbarukan	Kompleks usaha Research & Development (R&D), Gangwon Techno Park, Gangneung, Korea Selatan (23 Mei 2019)	40 m3, Setara TNT diperkirakan sekitar 50 kg	Ledakan deflagrasi / Confined explosion	Autoignition campuran gas hidrogen-oksigen di dalam tangki menyebabkan peningkatan konsentrasi yang memicu ledakan. (Center for Hydrogen Safety (CHS), 2020).	Bangunan R&D tiga lantai seluas 5.100 m ² yang berjarak sekitar 25-meter dari pusat ledakan hancur total dengan total kerugian sekitar \$30 juta (Center for Hydrogen Safety (CHS), 2020).	2 orang tewas dan 6 orang luka-luka Center for Hydrogen Safety (CHS), 2020).	 <p>Sumber: Koreaherald, 2019</p>
6	Pelepasan hidrogen bertekanan tinggi yang tidak terkendali dalam jumlah besar terjadi di fasilitas pengisian ulang trailer hidrogen Air Products	Santa Clara, California (1 Juni 2019)	250 kg	Confined explosion / deflagrasi hidrogen	Hidrogen secara tidak sengaja terlepas dari pipa yang terbuka akibat upaya tidak sah untuk memperbaiki katup yang bocor dan miskomunikasi berikutnya antara kedua pengemudi yang mengisi trailer (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2021)	3 kendaraan trailer Air Product mengalami kerusakan parah, asap hitam dari tangki solar dan kebakaran ban, dan kebakaran kolam solar terpisah di halaman(Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2021).	2 orang luka ringan (tidak ada korban jiwa) (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2021).	 <p>Sumber: Hydrogen Safety Panel, 2021</p>



Tabel 2. Perbandingan antara model empiris dan simulasi model numerik

Aspek	Model Empiris	Simulasi Model Numerik		
	Metode Crowl & Louvar, Alonso, Dan Sadovski	ALOHA	PHAST	FLACS (CFD)
Kompleksitas Input	Rendah: Input dasar (massa bahan, energi, jarak). Tidak butuh geometri atau data lingkungan.	Sedang: Butuh data bahan, kondisi cuaca, dan skenario pelepasan. Tidak perlu model 3D.	Tinggi: Butuh geometri 2D/3D, properti bahan, kondisi proses dan atmosferik.	Sangat Tinggi: Diperlukan CAD 3D, properti fluida, mesh domain, dan kondisi batas sangat rinci.
Biaya	Gratis	Gratis	Berbayar: \$8.919,74/ bulan (PHAST + add-on explosion) (veracity.com)	Berbayar tinggi: Software CFD industri khusus, lisensi dan hardware besar.
Waktu Pengerjaan	Detik – Menit (langsung hitung)	< 1 jam untuk 1 skenario sederhana	1–2 jam per skenario (Det Norske, 2012)	6–24 jam per kasus ledakan kompleks (FLACS CFD Brochure, 2010)
Visualisasi	Terbatas: Grafik 2D, tabel, GeoJson ledakan sederhana	Interaktif: Threat zones pada peta, hasil overlay di Google Earth	2D/3D: Peta Kontur Dampak (Overpressure & Thermal Radiation)	3D Dinamis: Contour, heatmap, animasi ledakan, dan propagation shockwave

Tabel 3. State of The Art

PENULIS	ASPEK YANG DI TELITI	METODE	KETERKAITAN DENGAN PENELITIAN
Yu, G dkk., 2021	Estimasi dampak ledakan amonium nitrat Beirut: massa TNT, ukuran kawah, radius fasilitas	Model empiris: Baker, Alonso, Sadoski	Relevan untuk estimasi dampak ledakan berbasis TNT equivalent.
Yu, G dkk., 2022	Estimasi ledakan AN di Tianjin dengan TNT equivalent, radius fatalitas, overpressure	Model empiris: Baker, Alonso, Sadoski	Dasar perhitungan overpressure dan radius ledakan
I & Cheng., 2021	Simulasi 3D ledakan tangki LPG menggunakan CFD	TNT equivalent dan simulasi numerik (Computational Fluid Dynamic)	Gabungan metode empiris dan simulasi numerik dengan perangkat lunak CFD
Bariha dkk., 2016	Ledakan truk LPG di India (ALOHA, PHAST, TNT)	ALOHA & PHAST + model empiris Crowl & Louvar.	Bandingkan prediksi overpressure dari ALOHA, PHAST, dan model empiris Crowl & Louvar
Lobato dkk., 2006	Ledakan hidrogen & analisis kerentanan manusia di lab fuel cell	Model TNT equivalent, TNO multi-energi, Baker-Strehlow-Tang (BST)	Dasar pemilihan model empiris TNT equivalent untuk overpressure ledakan hidrogen
Han dkk., 2025	Ledakan tangki hidrogen bertekanan (PVBs) – eksperimen & CFD	Massa TNT equivalent + efisiensi ledakan dari data uji + CFD	CFD dan estimasi massa TNT digunakan untuk analisis ledakan hidrogen

Penelitian ini bertujuan membangun **simulasi perhitungan otomatis dengan VBA** berbasis **metode Crowl & Louvar, Alonso, dan Sadoski** untuk bahan **Amonium Nitrat, LPG, dan Hidrogen**.

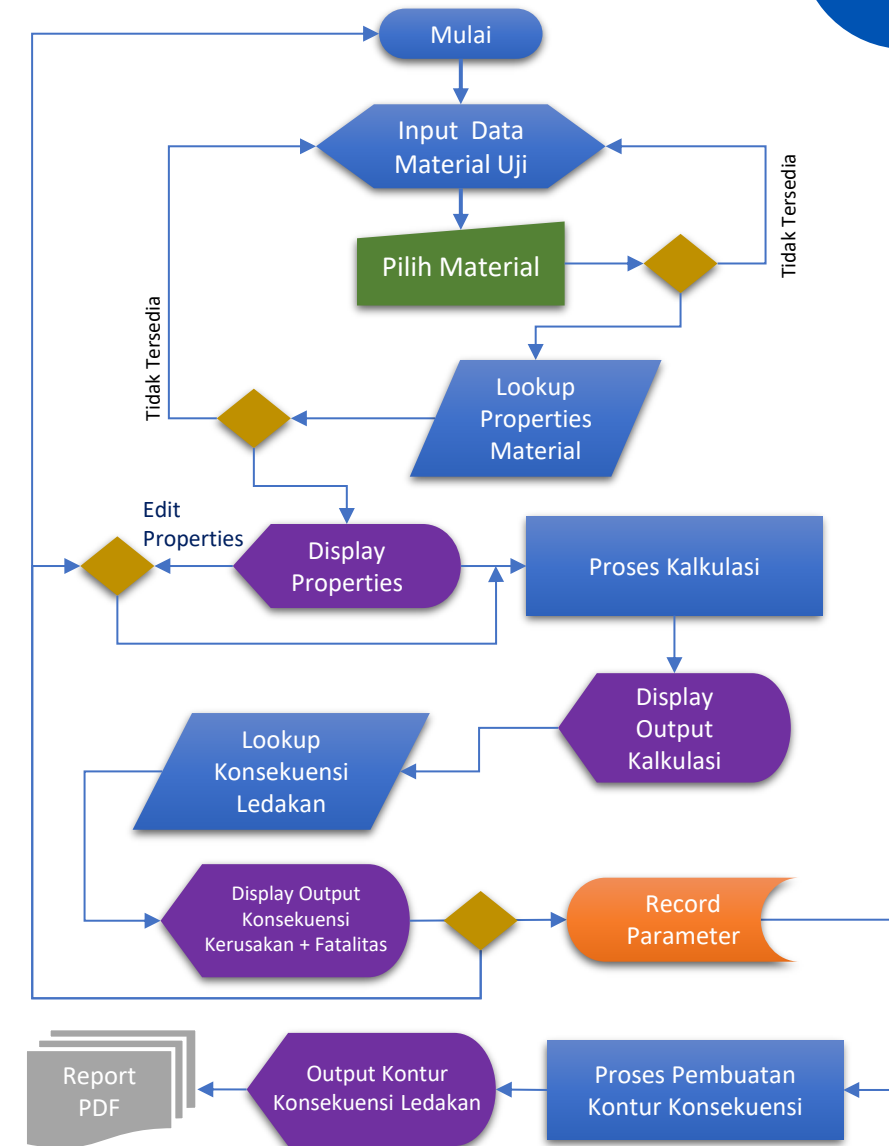
METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan Penelitian:

- 1** Membangun simulasi otomatis berbasis VBA
- 2** Mengimplementasikan metode Crowl & Louvar, Alonso, Sadovski
- 3** Menganalisis dampak ledakan bahan berbahaya (AN, LPG, H₂)
- 4** Validasi hasil dengan data kejadian nyata dan literatur teknis
- 5** Memberi rekomendasi mitigasi risiko industri berdasarkan hasil

Sasaran Penelitian:

- Sasaran 1** Evaluasi nilai overpressure bahan kimia (Amonium Nitrat, LPG, H₂) menggunakan metode empiris dan otomatisasi VBA.
- Sasaran 2** Menentukan jarak Konsekuensi ledakan berdasarkan kerusakan bangunan dan fatalitas.
- Sasaran 3** Melakukan analisis statistik (Full Factorial Design) terhadap pengaruh variable input.



Gambar 12. Diagram Alir Pendekatan Konsep Logika Simulasi dan Analisis Studi Dampak Ledakan berbasis TNT Equivalent menggunakan VBA

RANCANGAN PERCOBAAN PENELITIAN

Rancangan Percobaan menggunakan pendekatan statistik **Full Factorial Design 2⁴** dengan **4 Center Point** yang akan dilakukan pada masing-masing bahan (Amonium Nitrat, LPG, dan Hidrogen).

Tabel 4. Massa Bahan untuk Uji Eksperimen

Massa Bahan	Low (-1)	High(+1)
Massa Amonium Nitrat (ton)	800	2750
Massa Uap LPG (kg)	15540	20720
Massa Hidrogen (kg)	50	250

Tabel 5. Faktor – Faktor yang di amati dalam penelitian

Variabel	Low (-1)	High (+)
Massa (ton)	[Nilai rendah]	[Nilai tinggi]
Jarak (m)	[Nilai dekat]	[Nilai jauh]
Metode	Crowl/Alonso	Alonso/Sadovski
Efisiensi	[Nilai rendah]	[Nilai tinggi]
<ul style="list-style-type: none">Rentang Efisiensi LPG dan Hidrogen : 1% – 10% (Crowl& Louvar, 2011)Rentang Efisiensi Amonium Nitrat :30% – 40%(Török & Ozunu, 2015)Rentang Energi ledakan TNT (ETNT) : 4.230–4.836 kJ/kg (Wang dkk., 2023)		

Tabel 6. Konsep Matriks Percobaan Amonium Nitrat

Run	Massa Amonium Nitrat (kg)	Jarak (m)	Metode	Efisiensi
1	2750.000	1000	Crowl	0,4
2	800.000	300	Crowl	0,3
3	1775.000	650	Crowl	0,35
4	800.000	1000	Crowl	0,4
5	2750.000	1000	Alonso	0,3
6	800.000	1000	Alonso	0,4
7	800.000	300	Alonso	0,3
8	2750.000	300	Alonso	0,3
9	800.000	1000	Crowl	0,3
10	800.000	300	Alonso	0,4
11	2750.000	300	Crowl	0,4
12	1775.000	650	Crowl	0,3
13	1775.000	650	Alonso	0,35
14	800.000	300	Crowl	0,4
15	2750.000	300	Crowl	0,3
16	2750.000	300	Alonso	0,4
17	2750.000	1000	Alonso	0,4
18	1775.000	650	Alonso	0,35
19	800.000	1000	Alonso	0,3
20	2750.000	1000	Crowl	0,3

PROSES PERHITUNGAN OVERPRESSURE

1. Data Dasar dan Properties

Tabel 7. Data Dasar dan Properties

Data Dasar	Nilai	Unit	Sumber
Volume		m ³	
Densitas (ρ)			
Heat of Combustion(ΔH _c)		kJ/kg	
Efisiensi ledakan (η)			
Energi TNT (E TNT)		kJ/kg	
Tekanan Ambient (Pa)		kPa	

2. Perhitungan Awal

a. Massa bahan:

$$m = v \times \rho$$

Keterangan:

- m : massa bahan (kg)
- v : volume bahan (m³)
- ρ : densitas (kg/m³)

b. Energi total bahan:

$$E_{total} = m \times \Delta H_c \times \eta$$

Keterangan:

- m : massa bahan (kg)
- ΔH_c : Heat of Explosion (kJ/kg)
- η : Efisiensi ledakan

c. TNT Equivalent (massa TNT eq dalam kg):

$$W_{TNT} = \frac{E_{total}}{E_{TNT}}$$

3. Perhitungan Scaled Distance (Ze)

Tabel 8. Hasil Perhitungan Ze terhadap Jarak

$$Ze = \frac{R}{W^{1/3}}$$

Jarak R (m)	Ze (m. kg ^{-1/3})

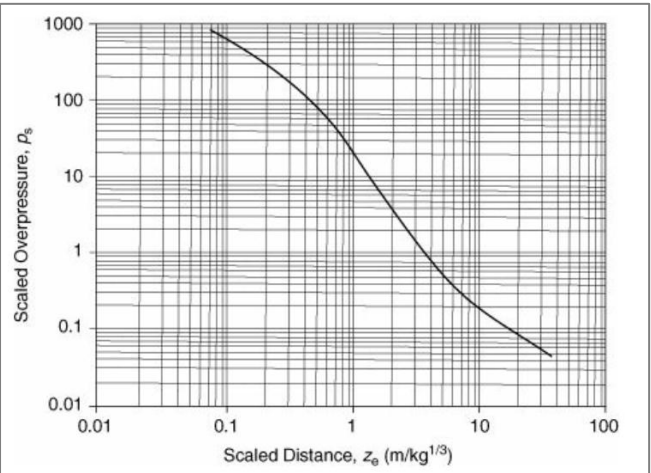
4. Peak Side-On Overpressure (Po)

1) Metode Crowl & Louvar [1]:

$$P_s = \text{fungsi}(Ze) \Rightarrow P_o = P_s \times P_a$$

Keterangan:

- P_s : Scaled Overpressure (Pa)
- P_o : Peak side-on Overpressure (kPa)
- P_a : Ambient Pressure (Pa)



Gambar 13. Scaled Distance (Ze) terhadap Scaled Overpressure Ps [4]

Korelasi antara scaled distance (Ze) terhadap scaled overpressure (Ps) direpresentasikan oleh pers. empiris:

$$\frac{p_o}{p_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{5.59}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{5.59}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{5.59}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{5.59}{1.35} \right)^2}}$$

2) Metode Alonso [2]:

Untuk Ze antara 1 hingga 10:

$$P_o = 1.13 \times 10^6 \times Ze^{(-2.01)}$$

Untuk Ze antara 10 hingga 200:

$$P_o = 1.83 \times 10^5 \times Ze^{(-1.16)}$$

3) Metode Sadovski [3]:

$$P_o = 0.085 \sqrt[3]{\frac{m_{TNT}}{R}} + 0.3 \left(\sqrt[3]{\frac{m_{TNT}}{R}} \right)^2 + 0.8 \left(\sqrt[3]{\frac{m_{TNT}}{R}} \right)^3$$

Keterangan:

- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications* (3rd ed.). Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. Prentice Hall.
- Alonso, F. D., Fernández, F., & Munoz, M. J. (2006). Characteristic overpressure–impulse–distance curves for the detonation of explosives. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(6), 724–728.
- Jeremić, R., & Bajić, Z. (2006). An approach to determining the TNT equivalent of high explosives. *Scientific-Technical Review*, 56(1), 58–61.
- Kinney, G. F., & Graham, K. J. (1985). *Explosive shocks in air*. Springer-Verlag.

OUTPUT NILAI OVERPRESSURE

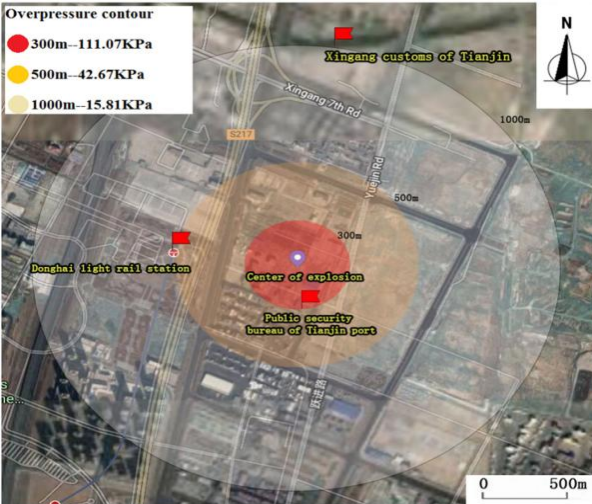
5. Validasi terhadap Kejadian Berdasarkan Konsekuensi Efek Overpressure terhadap Bangunan dan Fatality

Tabel 9. Hubungan antara korban jiwa dan tekanan berlebih akibat ledakan udara [1]

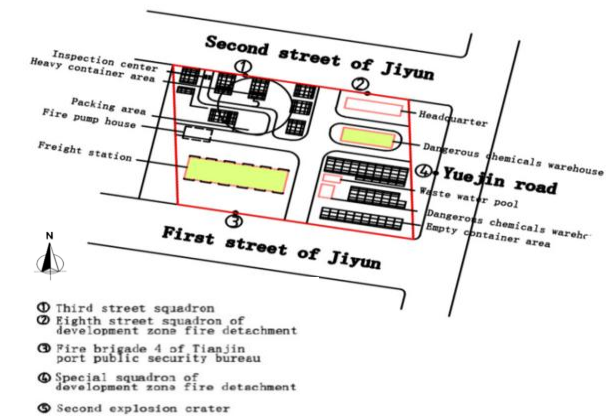
Overpressure (kPa)	Tingkat Cedera	Kondisi Cedera
20 – 30	Ringan (Mild)	Memar ringan (minor contusion)
30 – 50	Sedang (Moderate)	Cedera gendang telinga, memar sedang, patah tulang ringan, dll.
50 – 100	Berat (Severe)	Memar internal serius, bahkan kematian
>100	Sangat Berat (Extremely Severe)	90% – 100%Kematian

Tabel 10. Estimasi Overpressure Dampak Kerusakan terhadap Bangunan [2]

Overpressure (kPa)	Kerusakan pada Fasilitas
2.07	"Jarak aman" (probabilitas 0,95 tidak ada kerusakan serius di bawah nilai ini); batas proyektil; beberapa kerusakan pada langit-langit rumah; 10% kaca jendela pecah
2.76	Kerusakan struktural minor terbatas
3.4 – 6.9	Jendela besar dan kecil biasanya pecah; kerusakan sesekali pada bingkai jendela
4.8	Kerusakan ringan pada struktur rumah
6.9	Sebagian rumah runtuh menjadi tidak layak huni
6.9 – 13.8	Asbes bergelombang pecah; panel baja atau aluminium bergelombang, pengikatnya rusak, diikuti dengan tekukan; panel kayu (rumah standar), pengikatnya rusak, panel meledak
9.0	Kerangka baja bangunan berlapis sedikit terdistorsi
13.8	Sebagian atap dan dinding rumah runtuh
13.8 – 20.7	Dinding beton atau blok semen yang tidak diperkuat hancur
15.8	Batas bawah kerusakan struktural serius
2068	batas bibir kawah

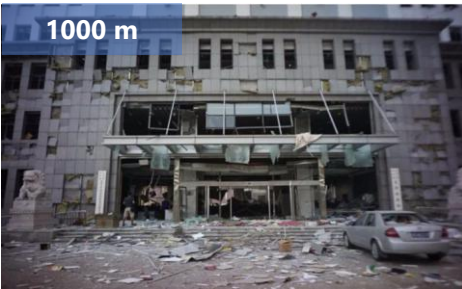


CONTOH KEJADIAN LEDAKAN AMONIUM NITRAT, TIANJIN PORT 2015



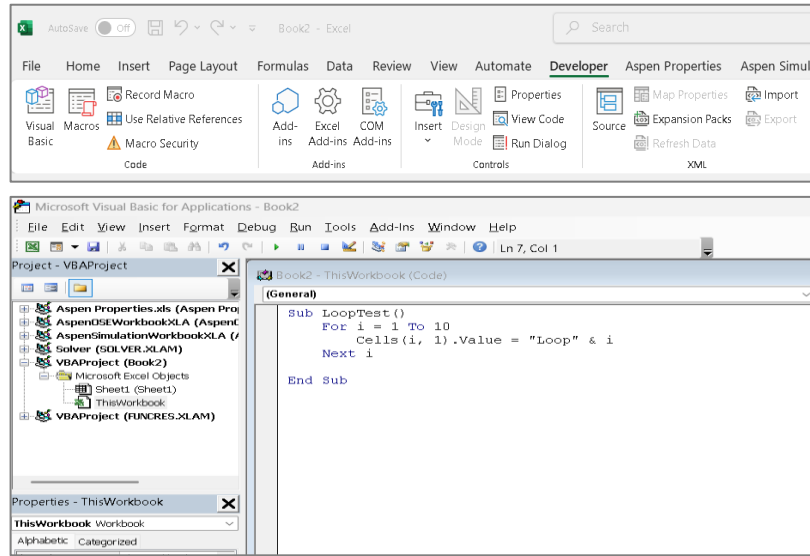
Keterangan:

- Wang, Q., Zhang, L., Wang, L., & Bu, L. (2023). A practical method for predicting and analyzing the consequences of ammonium nitrate explosion accidents adjacent to densely populated areas. *Heliyon*, 9.
- Clancey, V. J. (1972). Diagnostic features of explosion damage. In *Proceedings of the Sixth International Meeting of Forensic Sciences* (Edinburgh).
- ABC News. (2015). *Before and after the Tianjin explosions*.
- Yu, G., Duh, Y.-S., Yang, X., Li, Y., Chen, Y., Li, J., Li, J., Chen, R., Gong, L., Yang, B., & Huang, J. (2022). *Holistic case study on the explosion of ammonium nitrate in Tianjin port*. *Sustainability*, 14(6), 3429.



(Yu et al., 2022) [4]

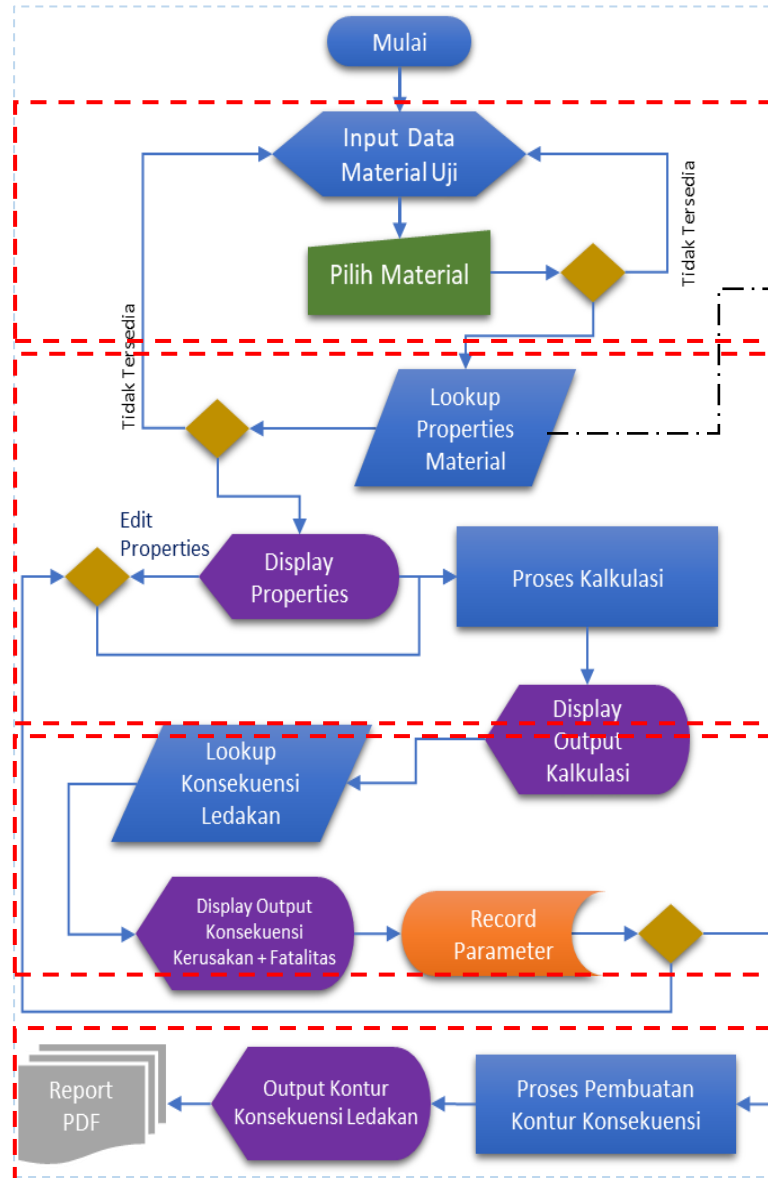
KONSEP LOGIKA SEMULASI MENGGUNAKAN VBA



Visual Basic for Applications (VBA) merupakan bahasa pemrograman terintegrasi yang terdapat dalam rangkaian Microsoft Office (Ms. Excell) dalam menulis makro.

Fungsi Utama VBA:

1. Mengotomatisasi tugas dalam excel, seperti input data, pemformatan, atau perhitungan
2. Membuat fungsi kustom yang tidak tersedia dalam fungsi standar excell
3. Mengembangkan antarmuka pengguna (User interface) interaktif seperti tombol, formulir input untuk memudahkan interaksi pengguna.



Material:	Ammonium Nitrate (Solid) / Input
	$2 \text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \rightarrow 2 \text{N}_2 + \text{O}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
Volume:	input m^3
Distance:	Input meters

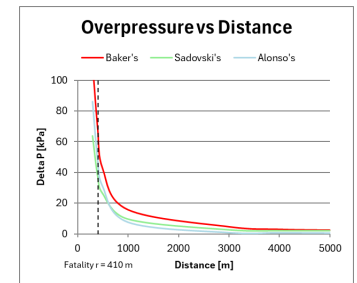
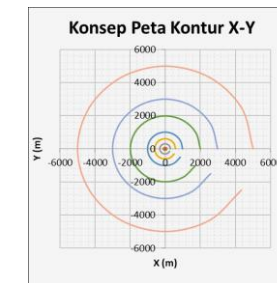
Pilih Material

Properties	Value
$\rho = m/V$ (Density)	Lookup Data
$\Delta H_{\text{expl}}/\text{com}$	Lookup Data
(Pa) Ambient Pressure	Lookup Data
η_{e} Explosion Efficiency	Lookup Data
E_TNT	Lookup Data

Edit Material Properties
Density
Heat of Explosion
Ambient Pressure
Explosion Efficiency

Parameters	Calculation
(W) Mass Material	$m = v \times \rho$
(E) Total of Energy Material	$E_{\text{total}} = m \times \Delta H_{\text{e}} \times \eta$
(W) TNT Equivalent	$W_{\text{TNT}} = \frac{E_{\text{total}}}{E_{\text{TNT}}}$
(Ze) Scaled Distance	$Z_e = \frac{R}{\sqrt{W_{\text{TNT}}}}$
(Ps) Scaled Overpressure	$P_s = \frac{P_a}{P_a}$
(Po) Crawl	$P_s = \frac{1616 \left(1 + \left(\frac{Z_e}{0.048}\right)^2\right)^{-1/3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{0.32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{1.35}\right)^2}}$
(Po) Alonso	$P_s = 1.13 \times 10^6 Z_e^{-2.01}$ $P_s = 1.83 \times 10^5 Z_e^{-1.46}$
(Po) Sadovski	$P_s = 0.085 \sqrt{\frac{m_{\text{TNT}}}{R}} + 0.3 \left(\sqrt{\frac{m_{\text{TNT}}}{R}}\right)^2 + 0.8 \left(\sqrt{\frac{m_{\text{TNT}}}{R}}\right)^3$

Consequences Explosion Assessments			Source: V.J. Clancy
Crawl	Alonso	Sadovski	
Injuries Consequences Analisis			
Crawl	Alonso	Sadovski	

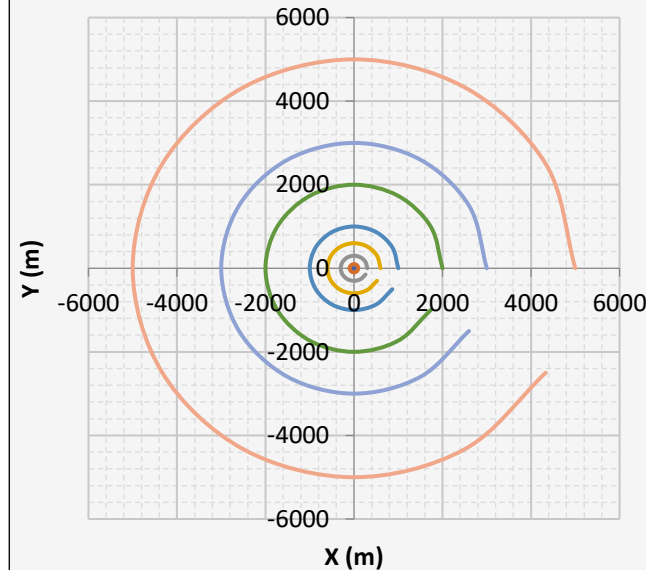


KONSEP DASAR PENGEMBANGAN - LAYOUT SPREADSHEET + VBA

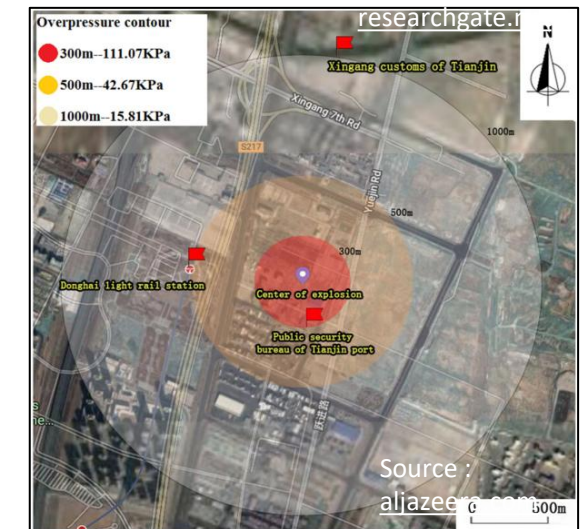
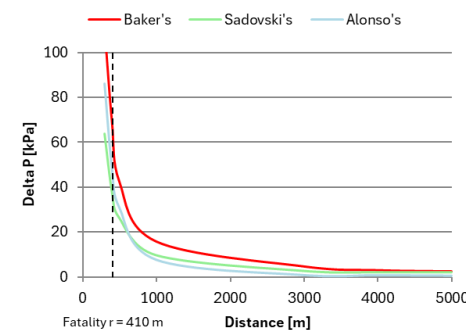
Material:	Ammonium Nitrate (Solid) / Input	
$2 \text{ NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \rightarrow 2 \text{ N}_2 + \text{O}_2 + 4 \text{ H}_2\text{O}(\text{g})$		
Volume:	input	m ³
Distance:	Input	meters
Properties	Value	
$\rho = m/V$ (Density)	Lookup Data	
ΔH expl /com	Lookup Data	
(Pa) Ambient Pressure	Lookup Data	
η_e Explosion Efficiency	Lookup Data	
E_TNT	Lookup Data	
Parameters	Calculation	
(W) Mass Material	$m = v \times \rho$	
(E) Total of Energy Material	$E_{\text{total}} = m \times \Delta H_c \times \eta$	
(W) TNT Equivalent	$W_{TNT} = \frac{E_{\text{total}}}{E_{TNT}}$	
(Ze) Scaled Distance	$Z_e = \frac{R}{m_{TNT}^{1/3}}$	
(Ps) Scaled Overpressure	$p_s = \frac{p_o}{p_a}$	
(Po) Crowl	$\frac{p_o}{p_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{z_e}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{1.35} \right)^2}}$	
(Po) Alonso	$P_o = 1.13 \times 10^6 Z_e^{(-2.01)} \quad P_o = 1.83 \times 10^5 Z_e^{(-1.16)}$	
(Po) Sadovski	$P_o = 0.085 \sqrt{\frac{m_{TNT}}{R}} + 0.3 \left(\sqrt{\frac{m_{TNT}}{R}} \right)^2 + 0.8 \left(\sqrt{\frac{m_{TNT}}{R}} \right)^3$	

Konsep Pengembangan Output VBA

Konsep Peta Kontur X-Y



Overpressure vs Distance



KONSEP OUTPUT STUDI
Pengembangan
Referensi Nilai Dampak

(Po) Peak side-on Overpressure	100	kPa	@Crawl method
(Po) Peak side-on Overpressure	50	kPa	@Alonso method
(Po) Peak side-on Overpressure	3	kPa	@Sadovski method

Consequences Explosion Assessments			Source: V.J. Clancey
Crawl	Alonso	Sadovski	
Overpressure : 100.00 kPa Press. Consequence : 68.90 kPa Kategori: Berat Jenis kerusakan: Probable total destruction of buildings; heavy machine tools (7000 lb), moved and badly damaged, very heavy machine tools (12,000 lb) survive	Overpressure : 50.00 kPa Press. Consequence : 48.20 kPa Kategori: Sedang Jenis kerusakan: Loaded train wagons overturned	Overpressure : 3.00 kPa Press. Consequence : 2.76 kPa Kategori: Ringan Jenis kerusakan: Limited minor structural damage	

Injuries Consequences Analisis			
Crawl	Alonso	Sadovski	
Tekanan Input : 100.00 kPa Kategori : Berat Tingkat Cedera : Berat (Severe) Kondisi Tubuh : Memar internal serius, bahkan kematian. Referensi :	Tekanan Input : 50.00 kPa Kategori : Sedang Tingkat Cedera : Sedang (Moderate) Kondisi Tubuh : Cedera gendang telinga, memar sedang, patah ringan. Referensi :	Tekanan Input : 3.00 kPa Kategori : Sangat Ringan Tingkat Cedera : Sangat Ringan Kondisi Tubuh : Memar sangat ringan Referensi :	

NILAI MANFAAT PENELITIAN

Sebagai Dasar Menentukan Buffer Zone di Area Proses Berbahaya

Definisi dan Tujuan Buffer Zone

Buffer zone adalah wilayah penyangga antara fasilitas industri yang menyimpan/proses bahan kimia berbahaya dan area publik.

Pembelajaran dari Insiden Besar:

1. Tianjin China (2015)
2. Beirut Lebanon (2020)

Banyak dari insiden tersebut menunjukkan bahwa absennya atau pelanggaran terhadap ketentuan zona penyangga dapat memperburuk dampak kecelakaan industri.

Penerapan Buffer Zone di Industri

Buffer zone harus memenuhi tiga prinsip:

1. Jarak aman teknis
2. Fungsi ekologis (misalnya, *constructed wetlands*).
Alternatif Pengolahan air Limbah industri
3. Integrasi tata ruang agar tidak mengganggu perencanaan wilayah. (Peta Zonasi)



▲ **Figure 1.** The constructed wetlands within the buffer zone area of an operating facility were used to meet requirements for wastewater treatment instead of a more traditional sequencing batch reactor.



- Yellow box: Dowville perimeter
- Red circle: Dowville potential impact distance for worst-case scenarios
- Purple box: Company XYZ perimeter

▲ **Figure 2.** The Dowville site managed to purchase land that falls within their potential impact area, further increasing their greenbelt buffer zone.

Dow Chemical Company menerapkan standar buffer zone yang disebut **Greenbelt Standard** untuk melindungi masyarakat sekitar dari potensi dampak skenario kecelakaan terburuk. (AiChe 2023)


KESIMPULAN


Sorotan Penelitian: Nilai & Keterbaruan


Membangun simulasi dampak ledakan industri berbasis TNT Equivalent yang efisien, terjangkau, dan dapat mudah diakses dan dioperasikan




Nilai Manfaat Penelitian

 **Otomatisasi Analisis:** Tool berbasis VBA Excel untuk hitung cepat zona bahaya ledakan bahan kimia.


 **Solusi Low-Cost:** Alternatif dari software simulasi mahal seperti FLACS atau PHAST.


 **Relevansi Industri:** Dapat digunakan langsung oleh praktisi safety di industri kimia, LPG, dan energi.


 **Pendukung Mitigasi Risiko:** Memberikan radius evakuasi dan rekomendasi proteksi berdasarkan overpressure.




Keterbaruan Penelitian

 Integrasi tiga metode empiris (Crowl & Louvar, Alonso, Sadovski) dalam satu aplikasi interaktif.

 Validasi model dengan data nyata dari insiden Beirut, Tianjin, Mexico, dll.

 Analisis statistik *Full Factorial Design* untuk eksplorasi sensitivitas parameter input.

 Implementasi dalam Visual Basic for Applications (VBA) yang belum dikembangkan untuk simulasi ledakan TNT Equivalent.

TERIMA KASIH

Semoga Proposal diterima, Lanjut Penelitian
Amin..